

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



**ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ**

**В.А. Толмачев, А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев, М.В. Никитина**

## **ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Методические рекомендации по выполнению  
домашних заданий



**Санкт-Петербург**

**2009**

Толмачёв В.А., Усольцев А.А., Лукичев Д.В., Никитина М.В. Общая электротехника: Методические рекомендации по выполнению домашних заданий. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 94 с.

Пособие содержит методические рекомендации по выполнению четырех домашних заданий раздела «Электрические цепи» курса «Общая электротехника».

Задания, помещенные в пособие, содержат задачи разной степени сложности и могут быть использованы для организации самостоятельной работы студентов.

Пособие предназначено для студентов технических направлений подготовки (специальностей) неэлектротехнического профиля.

Рекомендовано к печати учёным советом факультета компьютерных технологий и управления, 11.11.2008, протокол №4



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009

© В.А. Толмачев, А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев, М.В. Никитина, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчет установившегося режима в электрических цепях с источниками постоянного напряжения и тока. <i>Методические рекомендации по выполнению задания</i> .....	4
ЗАДАНИЕ 1.1 .....	16
ЗАДАНИЕ 1.2.....	21
2. Расчет переходных процессов в электрических цепях с источниками постоянного напряжения и тока. <i>Методические рекомендации по выполнению задания</i> .....	26
ЗАДАНИЕ 2.1 .....	33
ЗАДАНИЕ 2.2.....	42
3. Расчет электрических цепей однофазного синусоидального тока. <i>Методические рекомендации по выполнению задания</i> .....	51
ЗАДАНИЕ 3.1 .....	60
ЗАДАНИЕ 3.2.....	65
4. Расчет электрических цепей несинусоидального периодического тока. <i>Методические рекомендации по выполнению задания</i> .....	70
ЗАДАНИЕ 4.....	84

# 1. Расчет установившегося режима в электрических цепях с источниками постоянного напряжения и тока

*Методические рекомендации по выполнению задания*

## **Основные законы и методы анализа**

Закон Ома: напряжение участка цепи определяется как произведение сопротивления этого участка на протекающий через него ток

$$U = R \cdot I.$$

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю

$$\sum_{k=1}^K I_k = 0.$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма напряжений контура равна алгебраической сумме ЭДС этого контура

$$\sum_{m=1}^M R_m \cdot I_m = \sum_{k=1}^K E_k.$$

Применение законов Кирхгофа.

Устанавливается число неизвестных токов  $p = p_v - p_t$ , где  $p_v$  – общее количество ветвей цепи,  $p_t$  – количество ветвей с источниками тока. Устанавливается число узлов  $q$ . Устанавливается число независимых контуров  $n = p - (q - 1)$ .

Для каждой ветви задаются положительным направлением тока. Число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, составляет  $(q - 1)$ . Число уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа, составляет  $n$ . При составлении последних следует выбирать независимые контуры, не содержащие источников тока. Общее количество уравнений, составленных по законам Кирхгофа, должно составлять  $p$ .

Примеры рассмотрены в задачах 1.1, 1.2.

Метод эквивалентных преобразований.

Сущность метода заключается в том, чтобы сложную разветвленную цепь с помощью эквивалентных преобразований привести к простейшей одноконтурной цепи, включающей ветвь с искомым током, значение которого определяется затем по закону Ома. К эквивалентным преобразованиям относятся: а) преобразование представления источников электрической энергии<sup>\*</sup>; б) замена последовательных и параллельных соединений однотипных элементов эквивалентными одиночными элементами; в) преобразование соединений «звезда»–«треугольник» и «треугольник»–«звезда».

Примеры рассмотрены в задачах 1.3 и 1.4.

Метод эквивалентного генератора (метод активного двухполюсника).

Для нахождения тока в произвольной ветви всю внешнюю по отношению к ней электрическую цепь представляют в виде некоторого эквивалентного гене-

---

\* Под этим преобразованием понимается переход от представления источника электрической энергии последовательным соединением источника ЭДС и внутреннего сопротивления к параллельному соединению источника тока и внутренней проводимости, а также обратное преобразование.



### Баланс мощностей.

Для любой электрической цепи суммарная мощность  $P_{\Sigma}$ , развиваемая источниками электрической энергии (источниками тока и ЭДС), равна суммарной мощности  $P_{\Sigma}$ , расходуемой потребителями (резисторами).

$P_R = U_{\mathcal{A}} = R \cdot I^2 = U^2/R$  – мощность, рассеиваемая резистором.

$P_E = \pm E \cdot I$  – мощность источника ЭДС.

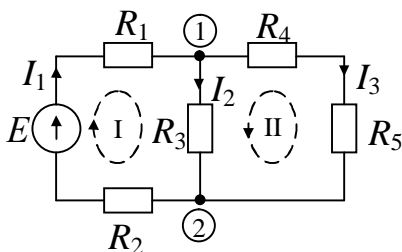
$P_J = \pm U_J \cdot J$  – мощность источника тока.

Мощности, рассеиваемые резисторами, всегда положительны, в то время как мощности источников электрической энергии, в зависимости от соотношения направлений падения напряжения и тока в них, могут иметь любой знак. Если направление протекания тока через источник противоположно направлению падения напряжения на нём, то мощность источника положительна, т.е. он отдаёт энергию в электрическую цепь. В противном случае мощность источника отрицательна, и он является потребителем электрической энергии. Следует заметить, что направление падения напряжения всегда противоположно направлению ЭДС, поэтому для источника ЭДС условием положительной мощности является совпадение направлений ЭДС и тока.

Примеры рассмотрены в задачах 1.1 и 1.2.

*Далее приведены задачи, решённые описанными выше методами расчета.*

### ЗАДАЧА 1.1



*Дано:*  $E=100$  В;  $R_1=5$  Ом;  $R_2=15$  Ом;  $R_3=40$  Ом;  $R_4=35$  Ом;  $R_5=85$  Ом.

*Найти:* все неизвестные токи, используя законы Кирхгофа; показать, что баланс мощностей имеет место.

*Решение:*

Всего в схеме три ветви  $p_{\text{в}}=3$ , ветвей с источниками тока нет  $p_{\text{т}}=0$ , число неизвестных токов равно  $p=(p_{\text{в}}-p_{\text{т}})=3-0=3$ , количество узлов –  $q=2$ , число уравнений по первому закону Кирхгофа –  $(q-1)=2-1=1$ , число уравнений по второму закону Кирхгофа –  $n=p-(q-1)=3-(2-1)=2$ .

Выберем положительные направления токов и обозначим их стрелками. Выберем и обозначим стрелками направления обхода двух независимых контуров: I и II. Составим систему уравнений Кирхгофа

$$\text{для узла 2} \quad -I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$\text{для контура I} \quad (R_1 + R_2) \cdot I_1 + R_3 \cdot I_2 = E$$

$$\text{для контура II} \quad R_3 \cdot I_2 - (R_4 + R_5) \cdot I_3 = 0$$

Полученные уравнения после подстановки в них числовых значений будут иметь следующий вид

$$\begin{cases} -I_1 + I_2 + I_3 = 0 \\ 20 \cdot I_1 + 40 \cdot I_2 = 100. \\ 40 \cdot I_2 - 120 \cdot I_3 = 0 \end{cases}$$

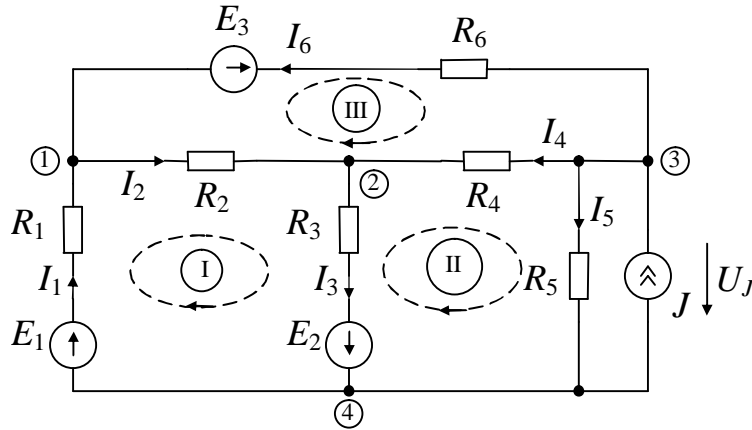
Решение данной системы:  $I_1 = 2$  [А],  $I_2 = 1,5$  [А],  $I_3 = 0,5$  [А].

Баланс мощностей для рассматриваемой цепи  
 $E \cdot I_1 = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_2^2 + R_4 \cdot I_3^2 + R_5 \cdot I_3^2$  или  
 $100 \cdot 2 = 5 \cdot 2^2 + 15 \cdot 2^2 + 40 \cdot 1,5^2 + 35 \cdot 0,5^2 + 85 \cdot 0,5^2$ .

Получено тождество  $200 = 200$ .

Ответ:  $I_1 = 2$  [А],  $I_2 = 1,5$  [А],  $I_3 = 0,5$  [А],  $P_{\text{и}} = P_{\text{п}} = 200$  [Вт].

### ЗАДАЧА 1.2



Дано:  $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=1$  Ом,  $E_1=E_2=E_3=10$  В,  $J=2$  А.

Найти: все неизвестные токи, используя законы Кирхгофа; показать, что баланс мощностей имеет место.

Решение:

Всего в схеме семь ветвей  $p_{\text{в}}=7$ , ветвей с источниками тока  $p_{\text{т}}=1$ , число неизвестных токов равно  $p=(p_{\text{в}}-p_{\text{т}})=7-1=6$ , количество узлов –  $q=4$ , число уравнений по первому закону Кирхгофа –  $(q-1)=4-1=3$ , число уравнений по второму закону Кирхгофа –  $n=p-(q-1)=6-(4-1)=3$ .

Выберем положительные направления токов и обозначим их стрелками. Выберем и обозначим стрелками направления обхода трех независимых контуров: I, II, III. Составим систему уравнений Кирхгофа

для узла 1	$I_1 - I_2 + I_6 = 0$ ;
для узла 2	$I_2 - I_3 + I_4 = 0$ ;
для узла 3	$-I_4 - I_5 - I_6 + J = 0$ или $-I_4 - I_5 - I_6 = -J$ ;
для контура I	$R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 = E_1 + E_2$ ;
для контура II	$-R_3 \cdot I_3 - R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 = -E_2$ ;
для контура III	$-R_2 \cdot I_2 + R_4 \cdot I_4 - R_6 \cdot I_6 = E_3$ ;

Полученные уравнения после подстановки в них числовых значений будут иметь следующий вид

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + I_6 = 0 \\ I_2 - I_3 + I_4 = 0 \\ -I_4 - I_5 - I_6 = -2 \\ I_1 + I_2 + I_3 = 20 \\ -I_3 - I_4 + I_5 = -10 \\ -I_2 + I_4 - I_6 = 10 \end{cases}.$$

Решение данной системы:  $I_1=9,5$  [А],  $I_2=2,5$  [А],  $I_3=8$  [А],  $I_4=5,5$  [А],  $I_5=3,5$  [А],  $I_6 = -7$  [А].

Отрицательный знак тока  $I_6$  означает, что истинное направление тока через данную ветвь противоположно принятому.

Баланс мощностей для рассматриваемой цепи

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_3 - E_3 \cdot I_6 + J \cdot R_5 \cdot I_5 = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2 + R_6 \cdot I_6^2 \text{ или}$$

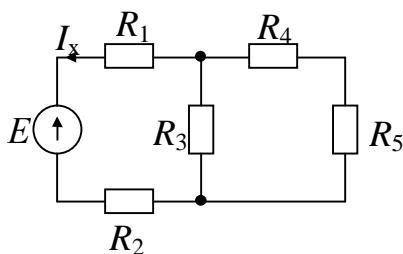
$$10 \cdot 9,5 + 10 \cdot 8 - 10 \cdot (-7) + 2 \cdot 1 \cdot 3,5 = 1 \cdot 9,5^2 + 1 \cdot 2,5^2 + 1 \cdot 8^2 + 1 \cdot 5,5^2 + 1 \cdot 3,5^2 + 1 \cdot (-7)^2.$$

Получено тождество  $252 = 252$ .

Примечание: падение напряжения на источнике тока  $U_J$ , определено по второму закону Кирхгофа для контура, содержащего  $J$  и  $R_5$ , как  $-U_J + I_5 R_5 = 0 \Rightarrow U_J = I_5 R_5$ .

*Ответ:*  $I_1=9,5$  [А],  $I_2=2,5$  [А],  $I_3=8$  [А],  $I_4=5,5$  [А],  $I_5=3,5$  [А],  $I_6=-7$  [А],  $P_{\text{и}}=P_{\text{п}}=252$  [Вт].

### ЗАДАЧА 1.3



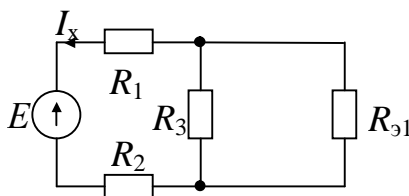
*Дано:*  $E=100$  В;  $R_1=5$  Ом;  $R_2=15$  Ом;  $R_3=40$  Ом;  $R_4=35$  Ом;  $R_5=85$  Ом.

*Найти:* ток через источник  $E$ , используя метод эквивалентных преобразований.

*Решение:*

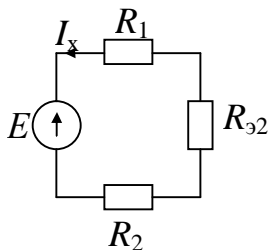
Обозначим положительное направление искомого тока  $I_x$ .

Заменим последовательное соединение сопротивлений  $R_4$  и  $R_5$  эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{э}1}$



$$R_{\text{э}1} = R_4 + R_5 = 35 + 85 = 120 \text{ [Ом]}.$$

Заменим параллельное соединение сопротивлений  $R_3$  и  $R_{\text{э}1}$  эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{э}2}$



$$R_{\text{э}2} = \frac{R_3 \cdot R_{\text{э}1}}{R_3 + R_{\text{э}1}} = \frac{40 \cdot 120}{40 + 120} = 30 \text{ [Ом]}.$$

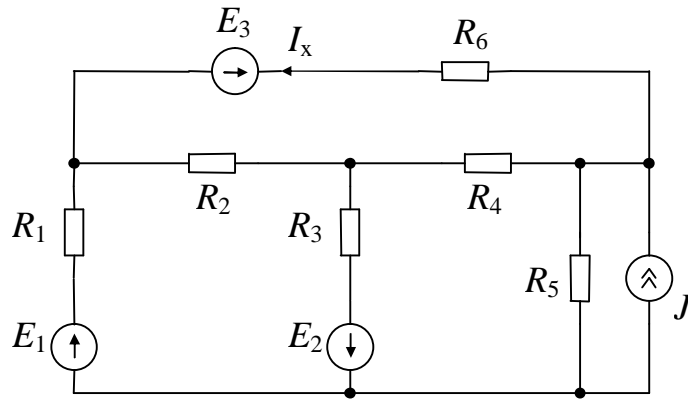
Согласно закону Ома искомый ток будет определяться как

$$I_x = \frac{-E}{R_1 + R_2 + R_{\text{э}2}} = \frac{-100}{5 + 15 + 30} = -2 \text{ [А]}.$$

*Ответ:*  $I_x = -2$  [А].



### ЗАДАЧА 1.4



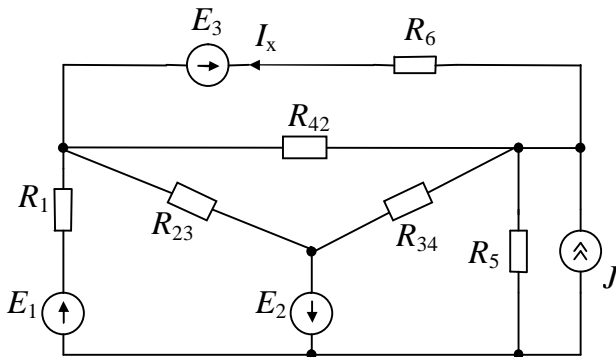
Дано:  $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=1 \text{ Ом}$ ,  $E_1=E_2=E_3=10 \text{ В}$ ,  $J=2 \text{ А}$ .

Найти: ток через  $E_3$ , используя метод эквивалентных преобразований.

Решение:

Обозначим положительное направление искомого тока  $I_x$ .

Заменяем «звезду»  $R_2R_3R_4$  на «треугольник»

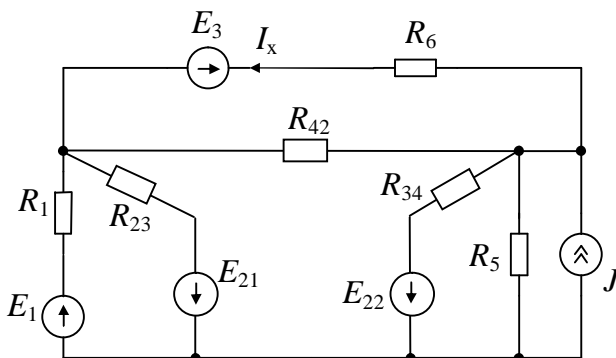


$$R_{23}=R_2+R_3+R_2 \cdot R_3 / R_4=3 \text{ [Ом]},$$

$$R_{34}=R_3+R_4+R_3 \cdot R_4 / R_2=3 \text{ [Ом]},$$

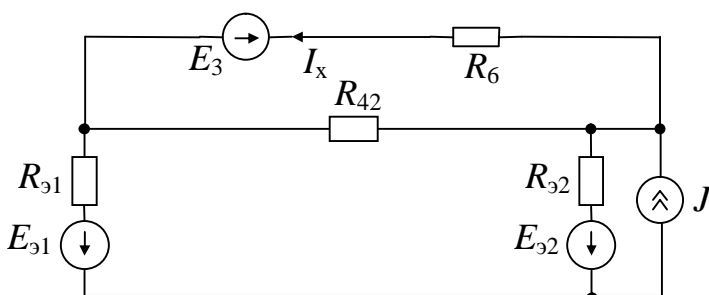
$$R_{42}=R_4+R_2+R_4 \cdot R_2 / R_3=3 \text{ [Ом]}.$$

Расцепим»  $E_2$



$$E_{21}=E_{22}=10 \text{ [В]}.$$

Параллельные соединения  $E_1R_1 \parallel E_{21}R_{23}$  и  $E_{22}R_{34} \parallel R_5$  заменим на эквивалентные



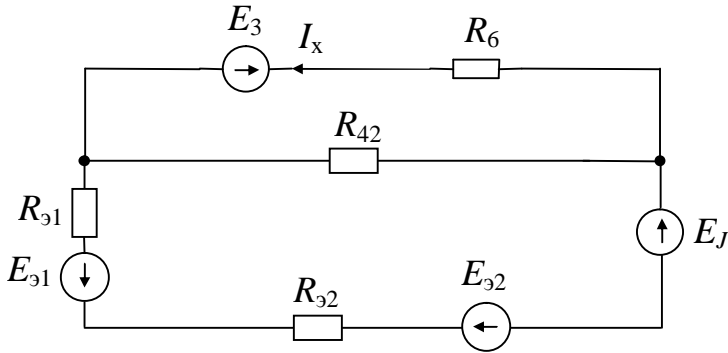
$$R_{31}=R_1 \cdot R_{23} / (R_1+R_{23})=3/4 \text{ [Ом]},$$

$$R_{32}=R_5 \cdot R_{34} / (R_5+R_{34})=3/4 \text{ [Ом]},$$

$$E_{31}=(-E_1/R_1+E_{21}/R_{23}) \cdot R_{31}=-5 \text{ [В]},$$

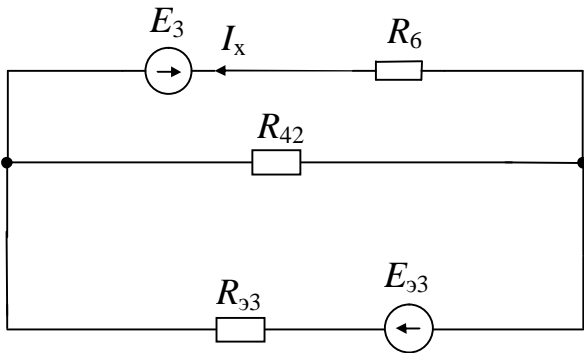
$$E_{32}=(E_{22}/R_{34}) \cdot R_{31}=2,5 \text{ [В]}.$$

Источник тока  $J$  преобразуем в источник ЭДС



$$E_J = J \cdot R_{32} = 1,5 \text{ [В]}.$$

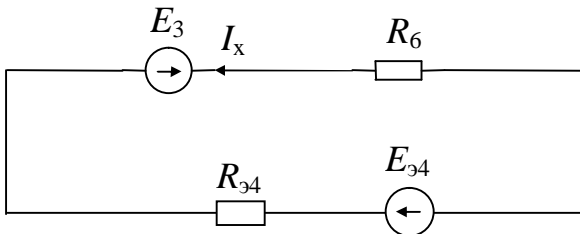
Последовательные соединения  $E_{31}, E_{32}, E_J$  и  $R_{31}, R_{32}$  заменим на эквивалентные



$$E_{33} = -E_{31} + E_{32} - E_J = 6 \text{ [В]},$$

$$R_{33} = R_{31} + R_{32} = 1,5 \text{ [Ом]}.$$

Параллельное соединение  $E_{33}R_{33} \parallel R_{42}$  заменим на эквивалентное



$$R_{34} = R_{33} \cdot R_{42} / (R_{33} + R_{42}) = 1 \text{ [Ом]},$$

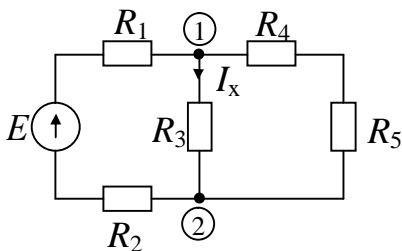
$$E_{34} = (E_{33} / R_{33}) \cdot R_{34} = 4 \text{ [В]}.$$

Согласно закону Ома искомый ток будет определяться как

$$I_x = -\frac{E_3 + E_{34}}{R_6 + R_{34}} = -\frac{10 + 6}{1 + 1} = -7 \text{ [А]}.$$

Ответ:  $I_x = -7 \text{ [А]}.$

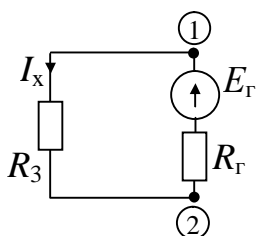
### ЗАДАЧА 1.5



Дано:  $E=100 \text{ В}; R_1=5 \text{ Ом}; R_2=15 \text{ Ом}; R_3=40 \text{ Ом};$   
 $R_4=35 \text{ Ом}; R_5=85 \text{ Ом}.$

Найти: ток через резистор  $R_3$ , используя метод эквивалентного генератора.

Решение:

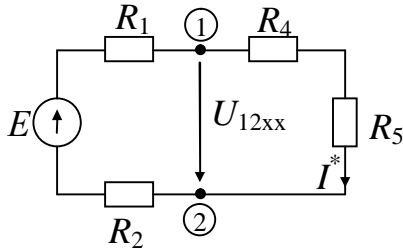


Обозначим положительное направление искомого тока  $I_x$ . Нарисуем эквивалентную электрическую схему с эквивалентным генератором. На схеме произвольно выбрано положительно направление ЭДС  $E_{Г}$ . Это позволяет записать

для режима холостого хода эквивалентного генератора с отключенной ветвью

$$E_r = U_{12xx}.$$

Индекс «xx» указывает на то, что величины соответствуют режиму холостого хода. Развернутая схема режима холостого хода будет выглядеть следующим образом



Напряжение холостого хода  $U_{12xx}$ , определяющее величину  $E_r$ , будет определяться как

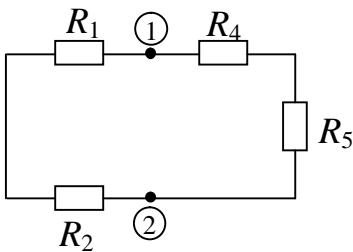
$$U_{12xx} = (R_4 + R_5) \cdot I^*$$

Определим ток  $I^*$ , используя закон Ома

$$I^* = E / (R_1 + R_2 + R_4 + R_5) = 100 / (5 + 15 + 35 + 85) = 5/7 \text{ [A]}.$$

$$\text{Тогда } U_{12xx} = (R_4 + R_5) \cdot I^* = (35 + 85) \cdot (5/7) = 600/7 \text{ [В]}.$$

Найдем сопротивление  $R_r$ . Для этого преобразуем предыдущую схему, удалив из нее источники энергии



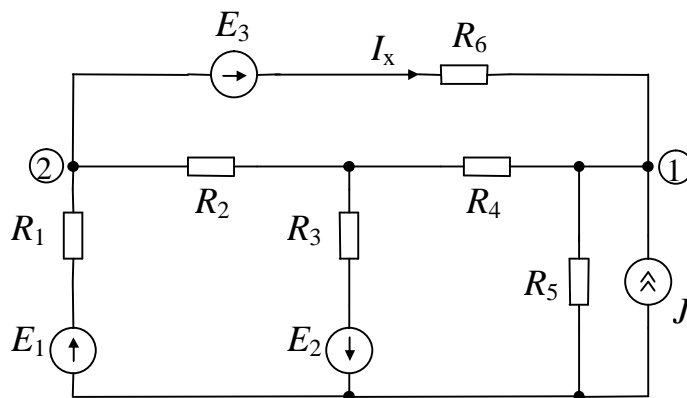
$$R_r = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_4 + R_5)}{R_1 + R_2 + R_4 + R_5} = \frac{(5 + 15) \cdot (35 + 85)}{5 + 15 + 35 + 85} = 120/7 \text{ [Ом]}.$$

Возвращаясь к схеме с эквивалентным генератором, находим искомый ток по закону Ома

$$I_x = \frac{E}{R_3 + R_r} = \frac{600/7}{40 + 120/7} = 1,5 \text{ [A]}.$$

Ответ :  $I_x = 1,5 \text{ [A]}$ .

### ЗАДАЧА 1.6



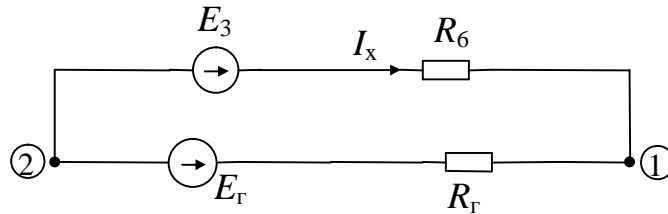
Дано:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ ,  $E_1 = E_2 = E_3 = 10 \text{ В}$ ,  $J = 2 \text{ А}$ .

Найти: ток через  $E_3$ , используя метод эквивалентного генератора.

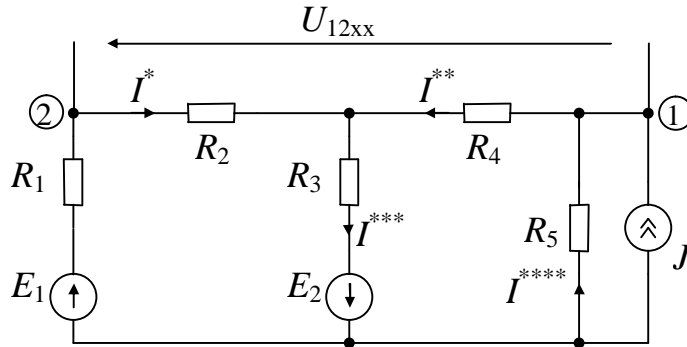
Решение:

Обозначим положительное направление искомого тока  $I_x$ .

Нарисуем эквивалентную электрическую схему с эквивалентным генератором



Изобразим схему режима холостого хода



Напряжение холостого хода  $U_{12xx} = E_Г$  будет определяться как

$$U_{12xx} = R_4 \cdot I^{**} - R_2 \cdot I^*$$

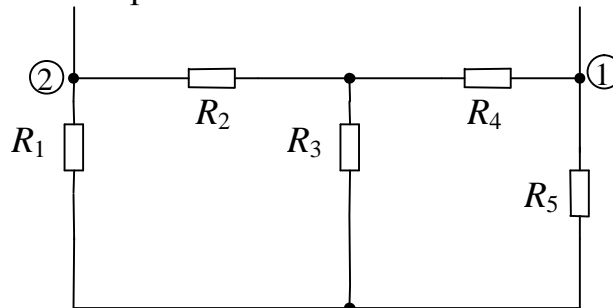
Определим токи  $I^*$  и  $I^{**}$ , используя законы Кирхгофа. Система уравнений по законам Кирхгофа будет выглядеть как

$$\begin{cases} I^* + I^{**} - I^{***} = 0 \\ -I^{**} + I^{****} = -J \\ (R_1 + R_2) \cdot I^* + R_3 \cdot I^{***} = E_1 + E_2 \\ R_4 \cdot I^{**} + R_3 \cdot I^{***} + R_5 \cdot I^{****} = E_2 \end{cases}$$

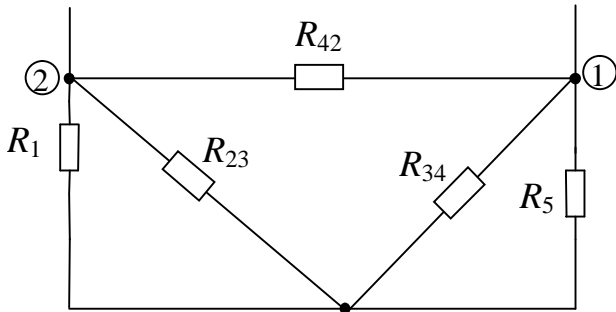
Решение данной системы:  $I^* = 6$  [A],  $I^{**} = 2$  [A],  $I^{***} = 8$  [A],  $I^{****} = 0$  [A].

Тогда  $E_Г = U_{12xx} = R_4 \cdot I^{**} - R_2 \cdot I^* = 1 \cdot 2 - 1 \cdot 6 = -4$  [В].

Найдем сопротивление  $R_Г$ . Для этого преобразуем предыдущую схему, удалив из нее источники энергии

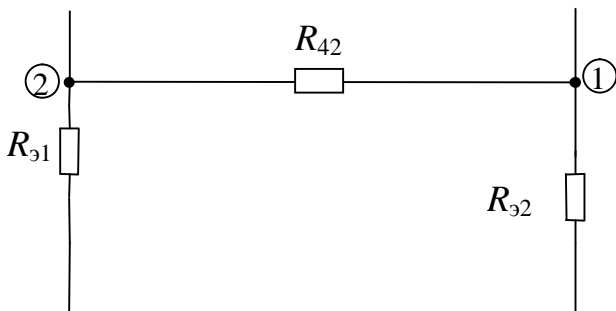


Заменяем «звезду»  $R_2R_3R_4$  на «треугольник»



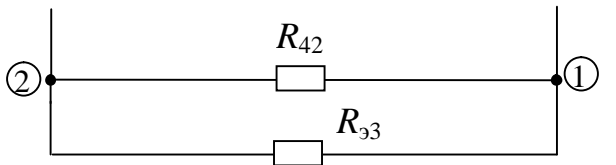
$$\begin{aligned} R_{23} &= R_2 + R_3 + R_2 \cdot R_3 / R_4 = 3 \text{ [Ом]}, \\ R_{34} &= R_3 + R_4 + R_3 \cdot R_4 / R_2 = 3 \text{ [Ом]}, \\ R_{42} &= R_4 + R_2 + R_4 \cdot R_2 / R_3 = 3 \text{ [Ом]}. \end{aligned}$$

Заменяем параллельные соединения  $R_1 || R_{23}$  и  $R_5 || R_{34}$  на эквивалентные



$$\begin{aligned} R_{31} &= R_1 \cdot R_{23} / (R_1 + R_{23}) = 3/4 \text{ [Ом]}, \\ R_{32} &= R_5 \cdot R_{34} / (R_5 + R_{34}) = 3/4 \text{ [Ом]}. \end{aligned}$$

Заменяем последовательное соединение  $R_{31}$  и  $R_{32}$  на эквивалентное



$$R_{33} = R_{31} + R_{32} = 3/2 \text{ [Ом]}.$$

Входное сопротивление схемы является сопротивлением эквивалентного генератора

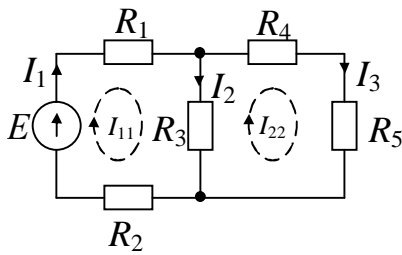
$$R_{\Gamma} = \frac{R_{42} \cdot R_{33}}{R_{42} + R_{33}} = \frac{3 \cdot 1,5}{3 + 1,5} = 1 \text{ [Ом]}.$$

Возвращаясь к схеме с эквивалентным генератором, находим искомый ток по закону Ома

$$I_x = \frac{E - E_{\Gamma}}{R_6 + R_{\Gamma}} = \frac{10 - (-4)}{1 + 1} = 7 \text{ [А]}.$$

Ответ :  $I_x = 7 \text{ [А]}$ .

### ЗАДАЧА 1.7



Дано:  $E=100$  В;  $R_1=5$  Ом;  $R_2=15$  Ом;  $R_3=40$  Ом;  
 $R_4=35$  Ом;  $R_5=85$  Ом.

Найти: все неизвестные токи методом контурных токов.

*Решение:*

Выберем направления контурных токов, которые обозначим  $I_{11}$  и  $I_{22}$ .

Составим систему уравнений для контуров

$$\begin{cases} (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I_{11} - R_3 \cdot I_{22} = E \\ -R_3 \cdot I_{11} + (R_3 + R_4 + R_5) \cdot I_{22} = 0 \end{cases}$$

После подстановки численных значений имеем

$$\begin{cases} 60 \cdot I_{11} - 40 \cdot I_{22} = 100 \\ -40 \cdot I_{11} + 160 \cdot I_{22} = 0 \end{cases}$$

Решив эту систему уравнений, найдем контурные токи  $I_{11} = 2$  [А],  $I_{22} = 0,5$  [А], а затем найдем истинные токи во всех ветвях.

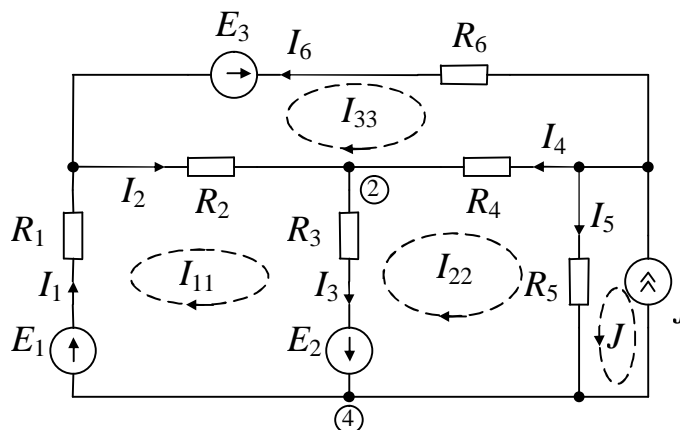
В ветви с  $E$ ,  $R_1$  и  $R_2$  истинный ток  $I_1$  имеет направление контурного тока  $I_{11}$  и равен  $I_1 = I_{11} = 2$  [А].

В ветви с  $R_3$  истинный ток  $I_2$  получится сложением контурных токов  $I_{11}$  и  $I_{22}$  с учётом их направлений и будет равен  $I_2 = I_{11} - I_{22} = 2 - 0,5 = 1,5$  [А].

В ветви с  $R_4$  и  $R_5$  истинный ток  $I_3$  имеет направление контурного тока  $I_{22}$  и равен  $I_3 = I_{22} = 0,5$  [А].

Ответ:  $I_1 = 2$  [А],  $I_2 = 1,5$  [А],  $I_3 = 0,5$  [А].

### ЗАДАЧА 1.8



Дано:  $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=1$  Ом,  $E_1=E_2=E_3=10$  В,  $J=2$  А.

Найти: все неизвестные токи методом контурных токов.

*Решение:*

Выберем направления контурных токов, которые обозначим  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$  и  $J$  (последний известен).

Составим систему уравнений для контуров

$$\begin{cases} (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I_{11} - R_3 \cdot I_{22} - R_2 \cdot I_{33} = E_1 + E_2 \\ -R_3 \cdot I_{11} + (R_3 + R_4 + R_5) \cdot I_{22} - R_4 \cdot I_{33} + R_5 \cdot J = -E_2 \\ -R_2 \cdot I_{11} - R_4 \cdot I_{22} + (R_3 + R_4 + R_5) \cdot I_{33} = E_3 \end{cases}$$

После подстановки численных значений имеем

$$\begin{cases} 3 \cdot I_{11} - I_{22} - I_{33} = 20 \\ -I_{11} + 3 \cdot I_{22} - I_{33} + 2 = -10 \\ -I_{11} - I_{22} + 3 \cdot I_{33} = 10 \end{cases}$$

Решив эту систему уравнений, найдем контурные токи  $I_{11}=9,5$  [A],  $I_{22}=1,5$  [A],  $I_{33}=7$  [A], а затем найдем истинные токи во всех ветвях.

В ветви с  $E_1$ ,  $R_1$  истинный ток  $I_1$  имеет направление контурного тока  $I_{11}$  и равен  $I_1=I_{11}=9,5$  [A].

В ветви с  $R_2$  истинный ток  $I_2$  получится от наложения контурных токов  $I_{11}$  и  $I_{33}$  и будет равен  $I_2=I_{11}-I_{33}=9,5-7=2,5$  [A].

В ветви с  $R_3$  и  $E_2$  истинный ток  $I_3$  получится от наложения контурных токов  $I_{11}$  и  $I_{22}$  и будет равен  $I_3=I_{11}-I_{22}=9,5-1,5=8$  [A].

В ветви с  $R_4$  истинный ток  $I_4$  получится от наложения контурных токов  $I_{22}$  и  $I_{33}$  и будет равен  $I_4=I_{33}-I_{22}=7-1,5=5,5$  [A].

В ветви с  $R_5$  истинный ток  $I_5$  получится от наложения контурных токов  $I_{22}$  и  $J$  и будет равен  $I_5=I_{22}+J=1,5+2=3,5$  [A].

В ветви с  $R_6$  и  $E_3$  истинный ток  $I_6$  противоположен по направлению контурному току  $I_{33}$  и будет равен  $I_6=-I_{33}=-7$  [A].

*Ответ:*  $I_1=9,5$  [A],  $I_2=2,5$  [A],  $I_3=8$  [A],  $I_4=5,5$  [A],  $I_5=3,5$  [A],  $I_6=-7$  [A].

## ЗАДАНИЕ 1.1

На рисунке 1.1 показана структура схемы электрической цепи. Для выполнения задания необходимо заменить условные элементы схемы 1...8 резистивными элементами и источниками ЭДС согласно таблицам 1.1.1...1.1.4 в соответствии с заданным преподавателем вариантом. Обычным шрифтом в таблицах указаны значения сопротивлений в омах, а жирным курсивом – значения ЭДС источников в вольтах. Направление действия ЭДС источников выбирается произвольно.

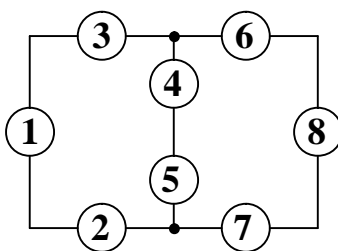


Рис. 1.1

Рассчитать значения всех неизвестных токов, используя: а) законы Кирхгофа, б) метод эквивалентных преобразований, в) метод эквивалентного генератора, г) метод контурных токов. Показать, что баланс мощностей имеет место.



**Таблица 1.1.1**

Вариант	Номера элементов структурной схемы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	2	6	-	10	13	7	<b>27,5B</b>
2	<b>42B</b>	30	-	10	-	4	6	-
3	30	-	-	<b>22,75</b>	10	6	-	4
4	10	-	-	30	-	<b>24,5B</b>	2	8
5	20	<b>41,25</b>	-	-	30	4	6	-
6	-	-	20	10	<b>35,2B</b>	12	-	18
7	-	30	-	-	30	7	<b>42,5B</b>	3
8	10	20	<b>67,5B</b>	10	-	10	5	15
9	<b>71,25</b>	20	10	-	10	-	-	30
10	14	-	6	<b>40B</b>	10	-	20	-
11	-	20	-	12	8	<b>44B</b>	30	-
12	12	8	<b>38,4B</b>	-	30	-	-	20
13	7	-	13	20	<b>41,6B</b>	13	17	-
14	-	20	-	12	8	40	<b>70B</b>	-
15	25	<b>78B</b>	15	-	30	-	13	7
16	-	20	-	12	18	40	-	<b>83,2B</b>
17	<b>93,5B</b>	-	40	10	20	14	16	-
18	10	20	-	<b>85,5B</b>	40	-	10	-
19	2	-	8	-	30	25	<b>90,25</b>	15
20	-	30	<b>76B</b>	15	25	6	4	-
21	-	6	4	30	<b>41,8B</b>	-	-	40
22	-	3	7	40	-	<b>33,6B</b>	11	9
23	13	<b>36,4B</b>	7	-	40	7	-	3
24	4	3	3	15	-	-	5	<b>15,4B</b>
25	<b>21B</b>	3	7	5	-	-	14	6
26	2	2	6	15	<b>32B</b>	10	-	-
27	5	4	6	-	10	-	<b>27,2B</b>	10
28	2	8	<b>28,8B</b>	-	10	5	6	4
29	2	3	5	-	10	<b>47,5B</b>	-	20
30	5	6	9	<b>38B</b>	15	-	5	-

Таблица 1.1.2

Вариант	Номера элементов структурной схемы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	10	10	-	-	10	40	<b>34B</b>	10
2	20	20	10	20	20	20	<b>94B</b>	10
3	<b>38B</b>	40	10	20	-	30	-	10
4	10	30	10	30	<b>62B</b>	-	-	20
5	-	10	-	10	40	<b>46B</b>	20	10
6	10	<b>51B</b>	-	-	20	10	30	10
7	10	<b>141B</b>	20	30	10	10	30	10
8	30	10	10	40	<b>76B</b>	20	-	-
9	-	20	-	10	40	10	20	<b>93B</b>
10	<b>69B</b>	10	20	30	20	-	10	-
11	10	-	<b>68B</b>	40	10	20	-	-
12	20	10	-	<b>188B</b>	40	20	-	30
13	-	20	-	20	30	10	30	<b>114B</b>
14	10	10	<b>124B</b>	40	10	20	10	-
15	30	10	10	<b>92B</b>	10	30	-	-
16	10	-	-	30	20	<b>85B</b>	-	20
17	20	10	20	30	-	30	10	<b>235B</b>
18	20	-	<b>152B</b>	20	30	10	10	20
19	-	10	20	<b>155B</b>	20	10	30	10
20	-	30	-	30	20	10	-	<b>115B</b>
21	<b>102B</b>	10	10	40	10	-	10	-
22	<b>282B</b>	30	20	10	30	10	10	10
23	40	<b>57B</b>	10	20	20	-	20	-
24	10	20	-	<b>186B</b>	50	10	-	10
25	-	10	20	-	10	30	20	<b>138B</b>
26	<b>119B</b>	40	10	10	-	-	10	10
27	20	-	10	50	<b>329B</b>	10	10	20
28	30	10	-	-	50	<b>190B</b>	10	10
29	20	30	<b>217B</b>	20	-	10	-	20
30	-	10	-	50	<b>161B</b>	20	10	-

Таблица 1.1.3

Вариант	Номера элементов структурной схемы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	13	7	-	<b>2B</b>	10	-	20	-
2	-	-	20	6	14	30	<b>8B</b>	-
3	9	11	<b>9,6B</b>	30	-	-	20	-
4	-	5	15	<b>12,8B</b>	20	12	-	18
5	20	-	-	9	11	-	40	<b>25B</b>
6	<b>31,2B</b>	21	19	30	-	6	-	14
7	-	-	20	16	14	-	<b>36,4B</b>	40
8	40	<b>44B</b>	-	13	17	11	-	19
9	18	-	12	40	<b>42,75</b>	10	-	-
10	6	4	-	30	-	<b>47,5B</b>	24	16
11	<b>41,8B</b>	-	30	24	16	5	-	5
12	3	-	7	<b>45,6B</b>	30	40	-	-
13	6	4	-	-	40	8	<b>36,4B</b>	12
14	14	6	<b>39,2B</b>	40	-	3	7	-
15	2	3	5	-	15	<b>16,5B</b>	-	5
16	8	<b>22,4B</b>	2	-	5	7	-	13
17	3	6	1	<b>34B</b>	15	-	10	-
18	6	5	4	10	-	<b>28,8B</b>	-	10
19	<b>30,4B</b>	7	3	-	10	3	6	6
20	4	4	2	10	-	20	<b>50B</b>	-
21	7	8	5	15	<b>39,9B</b>	5	-	-
22	5	3	2	10	-	<b>55B</b>	8	12
23	30	-	<b>80,5B</b>	-	10	7	-	3
24	-	30	-	10	<b>42B</b>	-	2	8
25	-	-	10	-	30	6	4	<b>43,75</b>
26	<b>71,5B</b>	-	20	30	-	5	-	5
27	-	20	-	<b>59,4B</b>	10	16	14	-
28	30	-	-	-	30	<b>70B</b>	4	6
29	18	<b>108,75</b>	12	10	-	14	6	10
30	11	19	<b>112,5</b>	-	10	-	30	-

Таблица 1.1.4

Вариант	Номера элементов структурной схемы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>47B</b>	3	2	1	3	1	1	1
2	4	<b>19B</b>	1	2	2	-	2	-
3	1	2	-	<b>31B</b>	5	1	-	1
4	-	1	2	-	1	3	2	<b>23B</b>
5	<b>17B</b>	4	1	1	-	-	1	1
6	2	-	1	5	<b>47B</b>	1	1	2
7	3	1	-	-	5	<b>38B</b>	1	1
8	2	3	<b>31B</b>	2	-	1	-	2
9	-	1	-	5	<b>23B</b>	2	1	-
10	1	1	-	-	1	4	<b>17B</b>	1
11	2	2	1	2	2	2	<b>47B</b>	1
12	<b>19B</b>	4	1	2	-	3	-	1
13	1	3	1	3	<b>31B</b>	-	-	2
14	-	1	-	1	4	<b>23B</b>	2	1
15	1	<b>17B</b>	-	-	2	1	3	1
16	1	<b>47B</b>	2	3	1	1	3	1
17	3	1	1	4	<b>38B</b>	2	-	-
18	-	2	-	1	4	1	2	<b>31B</b>
19	<b>23B</b>	1	2	3	2	-	1	-
20	1	-	<b>17B</b>	4	1	2	-	-
21	<b>2</b>	1	-	<b>47B</b>	4	2	-	3
22	-	2	-	2	3	1	3	<b>38B</b>
23	1	1	<b>31B</b>	4	1	2	1	-
24	3	1	1	<b>23B</b>	1	3	-	-
25	1	-	-	3	2	<b>17B</b>	-	2
26	2	1	2	3	-	3	1	<b>47B</b>
27	2	-	<b>38B</b>	2	3	1	1	2
28	-	1	2	<b>31B</b>	2	1	3	1
29	-	3	-	3	2	1	-	<b>23B</b>
30	<b>17B</b>	1	1	4	1	-	1	-

## ЗАДАНИЕ 1.2

На рисунке 1.2 показаны три варианта структур схем электрической цепи. Для выполнения задания необходимо заменить условные элементы схем 1...6 резистивными элементами и источниками согласно таблицам 1.2.1...1.2.4 в соответствии с заданным преподавателем вариантом. Индексы значений токов и ЭДС источников в таблицах соответствуют номерам элементов структурных схем, а направление их действия – направлению стрелок.

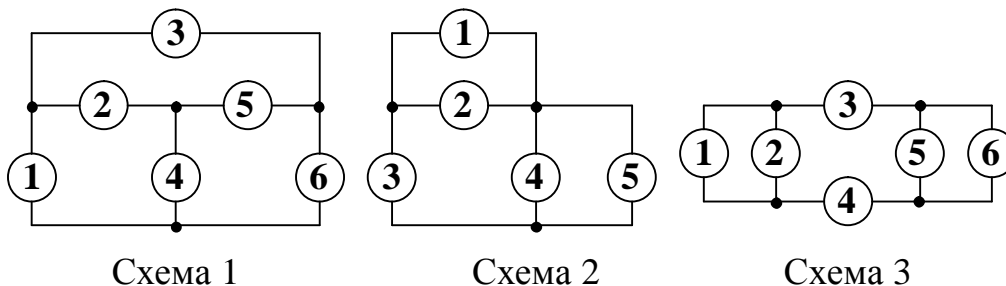


Рис. 1.2

Рассчитать значения всех неизвестных токов, используя: а) законы Кирхгофа, б) метод контурных токов. Рассчитать ток любой ветви, не содержащей источник тока: а) методом эквивалентных преобразований, б) методом эквивалентного генератора. Показать, что баланс мощностей имеет место.

Таблица 1.2.1

Вариант	Схема	Параметры источников энергии: $J$ [А], $E$ [В]			Параметры резисторов [Ом]					
					1	2	3	4	5	6
1	1	$\acute{a}J_1 = 0,1$	$\grave{a}E_3 = 11$	$\acute{a}E_4 = 29$	-	8	5	6	2	9
2	1	$\hat{a}J_6 = 0,15$	$\grave{a}E_6 = 12$	$\beta E_2 = 28$	6	8	7	4	1	-
3	2	$\hat{a}J_3 = 0,2$	$\grave{a}E_1 = 13$	$\hat{a}E_4 = 27$	4	9	-	4	3	2
4	2	$\beta J_1 = 0,25$	$\hat{a}E_3 = 14$	$\beta E_5 = 26$	-	5	3	1	2	6
5	1	$\beta J_3 = 0,3$	$\beta E_5 = 15$	$\hat{a}E_1 = 25$	5	1	-	3	3	9
6	1	$\acute{a}J_6 = 0,35$	$\acute{a}E_1 = 16$	$\beta E_3 = 24$	3	-	7	5	7	4
7	2	$\grave{a}J_2 = 0,4$	$\beta E_1 = 17$	$\hat{a}E_4 = 23$	1	-	1	4	2	3
8	2	$\grave{a}J_1 = 0,45$	$\acute{a}E_3 = 18$	$\acute{a}E_5 = 22$	-	5	7	1	8	4
9	1	$\acute{a}J_6 = 0,5$	$\beta E_5 = 19$	$\acute{a}E_1 = 21$	5	4	7	2	9	-
10	1	$\grave{a}J_3 = 0,55$	$\acute{a}E_1 = 20$	$\acute{a}E_4 = 20$	9	5	-	5	4	1
11	2	$\beta J_1 = 0,6$	$\hat{a}E_3 = 21$	$\hat{a}E_4 = 19$	-	2	9	3	9	8
12	1	$\hat{a}J_6 = 0,65$	$\hat{a}E_4 = 22$	$\grave{a}E_3 = 18$	6	9	3	8	2	-
13	2	$\beta J_1 = 0,7$	$\hat{a}E_3 = 23$	$\hat{a}E_4 = 17$	-	6	8	5	9	5
14	1	$\hat{a}J_6 = 0,75$	$\beta E_3 = 24$	$\acute{a}E_1 = 16$	2	6	7	5	9	-
15	3	$\acute{a}J_6 = 0,8$	$\acute{a}E_2 = 25$	$\grave{a}E_4 = 15$	5	7	1	2	4	-
16	1	$\grave{a}J_3 = 0,85$	$\hat{a}E_1 = 26$	$\beta E_5 = 14$	8	6	-	9	5	4
17	1	$\acute{a}J_1 = 0,9$	$\grave{a}E_3 = 27$	$\acute{a}E_4 = 13$	-	3	4	8	5	6
18	2	$\grave{a}J_2 = 0,95$	$\acute{a}E_3 = 28$	$\acute{a}E_5 = 12$	7	-	5	4	3	5
19	2	$\acute{a}J_5 = 1$	$\grave{a}E_2 = 29$	$\hat{a}E_3 = 11$	8	4	8	5	-	2
20	1	$\acute{a}J_6 = 1,1$	$\hat{a}E_4 = 30$	$\beta E_3 = 10$	6	7	4	6	1	-
21	1	$\acute{a}J_1 = 1,2$	$\acute{a}E_4 = 31$	$\grave{a}E_3 = 10,5$	-	5	1	4	8	3
22	2	$\acute{a}J_5 = 1,3$	$\beta E_2 = 32$	$\hat{a}E_4 = 11,5$	8	9	8	5	-	7
23	2	$\acute{a}J_5 = 1,4$	$\grave{a}E_2 = 33$	$\acute{a}E_3 = 12,5$	4	3	4	9	-	6
24	1	$\hat{a}J_1 = 1,5$	$\grave{a}E_3 = 34$	$\beta E_5 = 13,5$	-	8	4	7	4	6
25	1	$\acute{a}J_6 = 1,6$	$\beta E_2 = 35$	$\grave{a}E_3 = 14,5$	6	5	8	3	2	-
26	2	$\beta J_2 = 1,7$	$\beta E_1 = 36$	$\hat{a}E_5 = 15,5$	3	-	1	3	9	2
27	1	$\hat{a}J_1 = 1,8$	$\beta E_2 = 37$	$\beta E_3 = 16,5$	-	2	8	6	5	7
28	2	$\hat{a}J_5 = 1,9$	$\hat{a}E_3 = 38$	$\grave{a}E_2 = 17,5$	5	3	6	2	-	2
29	1	$\acute{a}J_1 = 2$	$\beta E_3 = 39$	$\grave{a}E_5 = 18,5$	-	5	4	1	3	7
30	3	$\hat{a}J_1 = 2,1$	$\beta E_4 = 40$	$\acute{a}E_6 = 19$	-	2	6	7	4	8

Таблица 1.2.2

Вариант	Схема	Параметры источников энергии: $J$ [А], $E$ [В]			Параметры резисторов [Ом]					
					1	2	3	4	5	6
1	1	$\beta J_3 = 0,1$	$\hat{a} E_2 = 40$	$\hat{a} E_6 = 10$	2	9	-	9	6	1
2	1	$\beta J_3 = 0,15$	$\hat{a} E_2 = 39$	$\acute{a} E_4 = 11$	7	1	-	8	2	7
3	2	$\hat{a} J_1 = 0,2$	$\acute{a} E_5 = 38$	$\hat{a} E_2 = 12$	-	2	7	5	4	-
4	2	$\acute{a} J_3 = 0,25$	$\acute{a} E_5 = 37$	$\beta E_2 = 13$	-	6	9	7	3	-
5	1	$\beta J_3 = 0,3$	$\hat{a} E_2 = 36$	$\hat{a} E_6 = 14$	3	9	-	2	7	9
6	1	$\beta J_3 = 0,35$	$\beta E_5 = 35$	$\acute{a} E_1 = 15$	7	4	-	4	5	1
7	2	$\acute{a} J_5 = 0,4$	$\hat{a} E_4 = 34$	$\beta E_2 = 16$	9	3	9	5	-	-
8	2	$\beta J_1 = 0,45$	$\hat{a} E_2 = 33$	$\hat{a} E_5 = 17$	-	4	6	3	5	-
9	1	$\hat{a} J_3 = 0,5$	$\hat{a} E_5 = 32$	$\hat{a} E_4 = 18$	7	2	-	3	9	3
10	1	$\beta J_3 = 0,55$	$\beta E_2 = 31$	$\acute{a} E_1 = 19$	4	3	-	9	8	4
11	2	$\hat{a} J_4 = 0,6$	$\hat{a} E_3 = 30$	$\hat{a} E_1 = 20$	9	8	1	-	9	-
12	1	$\beta J_3 = 0,65$	$\acute{a} E_4 = 29$	$\acute{a} E_1 = 21$	2	9	-	8	6	6
13	2	$\acute{a} J_4 = 0,7$	$\acute{a} E_3 = 28$	$\beta E_2 = 22$	9	5	4	-	6	-
14	1	$\hat{a} J_3 = 0,75$	$\acute{a} E_4 = 27$	$\acute{a} E_6 = 23$	6	4	-	5	7	3
15	3	$\hat{a} J_1 = 0,8$	$\hat{a} E_3 = 26$	$\acute{a} E_5 = 24$	-	6	9	6	8	3
16	1	$\hat{a} J_2 = 0,85$	$\hat{a} E_3 = 25$	$\hat{a} E_1 = 25$	5	-	8	8	5	3
17	1	$\beta J_2 = 0,9$	$\beta E_3 = 24$	$\hat{a} E_6 = 26$	5	-	1	6	9	1
18	2	$\hat{a} J_4 = 0,95$	$\beta E_1 = 23$	$\beta E_2 = 27$	3	5	2	-	5	-
19	2	$\hat{a} J_4 = 1$	$\hat{a} E_3 = 22$	$\hat{a} E_1 = 28$	6	2	4	-	8	-
20	1	$\hat{a} J_2 = 0,95$	$\beta E_3 = 21$	$\hat{a} E_5 = 29$	1	-	8	8	6	6
21	1	$\hat{a} J_2 = 0,9$	$\hat{a} E_3 = 20$	$\acute{a} E_6 = 30$	8	-	1	3	6	6
22	2	$\hat{a} J_1 = 0,85$	$\hat{a} E_3 = 19$	$\hat{a} E_4 = 31$	-	7	3	4	8	-
23	2	$\acute{a} J_5 = 0,8$	$\acute{a} E_3 = 18$	$\beta E_1 = 32$	8	6	5	9	-	-
24	1	$\beta J_2 = 0,75$	$\beta E_5 = 17$	$\hat{a} E_1 = 33$	4	9	3	-	7	6
25	1	$\beta J_5 = 0,7$	$\beta E_2 = 16$	$\acute{a} E_4 = 34$	2	3	4	9	-	7
26	2	$\hat{a} J_5 = 0,65$	$\hat{a} E_2 = 15$	$\acute{a} E_4 = 35$	9	2	7	8	-	-
27	1	$\acute{a} J_2 = 0,6$	$\hat{a} E_5 = 14$	$\acute{a} E_6 = 36$	5	-	8	7	1	4
28	2	$\acute{a} J_1 = 0,55$	$\beta E_2 = 13$	$\hat{a} E_5 = 37$	7	2	-	2	8	-
29	1	$\beta J_2 = 0,5$	$\hat{a} E_6 = 12$	$\hat{a} E_4 = 38$	3	-	3	5	7	9
30	3	$\hat{a} J_6 = 0,45$	$\hat{a} E_1 = 11$	$\beta E_3 = 39$	4	8	1	9	5	-

Таблица 1.2.3

Вариант	Схема	Параметры источников энергии: $J$ [А], $E$ [В]			Параметры резисторов [Ом]					
					1	2	3	4	5	6
1	1	$\acute{a}J_6 = 2$	$\beta E_5 = 6$	$\acute{a}E_1 = 35$	8	9	1	6	9	-
2	1	$\acute{a}J_6 = 1,95$	$\beta E_5 = 7$	$\beta E_2 = 34,5$	8	6	7	2	7	-
3	2	$\hat{a}J_5 = 1,9$	$\grave{a}E_1 = 8$	$\beta E_2 = 34$	9	4	3	4	-	-
4	2	$\acute{a}J_5 = 1,85$	$\hat{a}E_3 = 9$	$\grave{a}E_1 = 33,5$	7	3	6	3	-	-
5	1	$\acute{a}J_6 = 1,8$	$\beta E_5 = 10$	$\beta E_3 = 33$	2	5	9	7	4	-
6	1	$\hat{a}J_6 = 1,75$	$\hat{a}E_4 = 11$	$\beta E_3 = 32,5$	2	1	3	5	4	-
7	2	$\hat{a}J_4 = 1,7$	$\hat{a}E_5 = 12$	$\beta E_2 = 32$	2	1	3	-	5	-
8	2	$\beta J_2 = 1,65$	$\grave{a}E_1 = 13$	$\acute{a}E_5 = 31,5$	5	-	2	5	3	-
9	1	$\acute{a}J_6 = 1,6$	$\hat{a}E_4 = 14$	$\beta E_2 = 31$	4	5	9	7	3	-
10	1	$\hat{a}J_1 = 0,55$	$\hat{a}E_4 = 15$	$\hat{a}E_6 = 30,5$	-	9	5	8	9	4
11	2	$\acute{a}J_4 = 1,5$	$\beta E_1 = 16$	$\acute{a}E_5 = 30$	2	6	9	-	6	-
12	1	$\acute{a}J_6 = 1,45$	$\acute{a}E_2 = 17$	$\grave{a}E_3 = 29,5$	8	-	7	6	8	6
13	2	$\acute{a}J_4 = 1,4$	$\beta E_2 = 18$	$\hat{a}E_5 = 29$	6	8	5	-	9	-
14	1	$\hat{a}J_6 = 1,35$	$\grave{a}E_2 = 19$	$\hat{a}E_1 = 28,5$	6	2	3	7	5	-
15	3	$\acute{a}J_1 = 1,3$	$\grave{a}E_4 = 20$	$\hat{a}E_5 = 28$	-	5	3	8	6	9
16	1	$\hat{a}J_1 = 1,25$	$\beta E_3 = 21$	$\beta E_2 = 27,5$	-	8	3	5	8	4
17	1	$\acute{a}J_1 = 1,2$	$\beta E_3 = 22$	$\grave{a}E_5 = 27$	-	6	1	9	6	3
18	2	$\acute{a}J_3 = 1,15$	$\beta E_2 = 23$	$\hat{a}E_4 = 26,5$	7	9	-	5	5	-
19	2	$\grave{a}J_1 = 1,1$	$\grave{a}E_2 = 24$	$\acute{a}E_5 = 26$	-	8	1	8	3	-
20	1	$\acute{a}J_1 = 1$	$\beta E_3 = 25$	$\hat{a}E_4 = 25,5$	-	5	6	7	8	7
21	1	$\acute{a}J_1 = 0,95$	$\beta E_3 = 26$	$\acute{a}E_6 = 25$	-	1	6	6	9	1
22	2	$\hat{a}J_3 = 0,9$	$\hat{a}E_5 = 27$	$\grave{a}E_2 = 24,5$	4	8	-	8	6	-
23	2	$\hat{a}J_3 = 0,85$	$\beta E_1 = 28$	$\hat{a}E_5 = 24$	3	4	-	5	9	-
24	1	$\hat{a}J_1 = 0,8$	$\beta E_2 = 29$	$\beta E_5 = 23,5$	-	6	6	7	3	8
25	1	$\acute{a}J_6 = 0,75$	$\grave{a}E_5 = 30$	$\hat{a}E_4 = 23$	5	6	7	4	9	-
26	2	$\grave{a}J_1 = 0,7$	$\acute{a}E_3 = 31$	$\acute{a}E_4 = 22,5$	-	3	1	4	8	-
27	1	$\acute{a}J_1 = 0,65$	$\hat{a}E_6 = 32$	$\acute{a}E_3 = 22$	-	3	4	1	3	8
28	2	$\grave{a}J_1 = 0,6$	$\acute{a}E_3 = 33$	$\acute{a}E_5 = 21,5$	1	5	3	8	2	-
29	1	$\hat{a}J_1 = 0,55$	$\grave{a}E_5 = 34$	$\hat{a}E_4 = 21$	-	4	5	7	5	3
30	3	$\acute{a}J_5 = 0,5$	$\acute{a}E_2 = 35$	$\grave{a}E_4 = 20,5$	2	3	7	5	-	1



Таблица 1.2.4

Вариант	Схема	Параметры источников энергии: $J$ [А], $E$ [В]			Параметры резисторов [Ом]					
					1	2	3	4	5	6
1	1	$\hat{a}J_1=0,25$	$\acute{a}E_4 = 6$	$\acute{a}E_6 = 25$	-	2	6	5	4	8
2	1	$\hat{a} J_1=0,3$	$\acute{a}E_4 = 7$	$\grave{a} E_5=24,5$	-	9	4	7	3	1
3	2	$\acute{a}J_4=0,35$	$\mathcal{B}E_1 = 8$	$\grave{a} E_2 = 24$	2	3	4	-	7	-
4	2	$\hat{a}J_4=0,4$	$\acute{a}E_3 = 9$	$\mathcal{B}E_1=23,5$	6	2	1	-	4	-
5	1	$\hat{a}J_1=0,45$	$\acute{a}E_4=10$	$\mathcal{B}E_3 = 23$	-	3	7	3	7	9
6	1	$\hat{a}J_1=0,5$	$\acute{a}E_2=11$	$\hat{a}E_6=22,5$	-	7	5	7	5	1
7	2	$\grave{a}J_2=0,55$	$\acute{a}E_3=12$	$\acute{a}E_5 = 22$	3	-	4	1	9	-
8	2	$\hat{a}J_4=0,6$	$\hat{a}E_3=13$	$\grave{a} E_2=21,5$	4	8	1	-	3	-
9	1	$\acute{a}J_1=0,65$	$\grave{a} E_2=14$	$\mathcal{B}E_5 = 21$	-	9	5	7	8	2
10	1	$\acute{a}J_6=0,7$	$\grave{a} E_5=15$	$\grave{a} E_3=20,5$	9	4	5	6	5	-
11	2	$\acute{a}J_5=0,75$	$\acute{a}E_3 = 16$	$\mathcal{B}E_2 = 20$	8	9	3	9	-	-
12	1	$\hat{a}J_1=0,8$	$\mathcal{B}E_5=17$	$\hat{a}E_6=19,5$	-	2	8	3	2	3
13	2	$\acute{a}J_5=0,85$	$\acute{a}E_3 = 18$	$\grave{a} E_1 = 19$	5	9	5	8	-	-
14	1	$\hat{a}J_1=0,9$	$\grave{a} E_5=19$	$\grave{a} E_3=18,5$	-	9	4	7	5	4
15	3	$\hat{a}J_2=0,95$	$\acute{a}E_5 = 20$	$\acute{a}E_6 = 18$	6	-	2	1	2	3
16	1	$\hat{a}J_4= 1$	$\grave{a} E_3=21$	$\mathcal{B}E_2=17,5$	4	5	9	-	8	9
17	1	$\acute{a}J_4=1,05$	$\mathcal{B}E_3=22$	$\mathcal{B}E_5 = 17$	1	5	8	-	8	6
18	2	$\grave{a}J_1=1,1$	$\hat{a}E_4 = 23$	$\mathcal{B}E_2=16,5$	-	3	5	5	9	-
19	2	$\hat{a}J_5=1,15$	$\hat{a}E_4 = 24$	$\grave{a} E_2 = 16$	2	6	9	8	-	-
20	1	$\hat{a} J_4=1,2$	$\mathcal{B}E_3=25$	$\hat{a}E_1=15,5$	6	1	4	-	1	5
21	1	$\acute{a}J_4=1,25$	$\grave{a} E_3=26$	$\acute{a}E_6 = 15$	3	8	1	-	2	3
22	2	$\hat{a}J_4=1,3$	$\hat{a}E_3 = 27$	$\mathcal{B}E_2=14,5$	7	8	5	-	2	
23	2	$\hat{a}J_4=1,35$	$\mathcal{B}E_1=28$	$\hat{a}E_5 = 14$	6	8	9	-	5	
24	1	$\mathcal{B}J_4=1,4$	$\grave{a} E_2=29$	$\acute{a}E_6=13,5$	9	4	7	-	4	5
25	1	$\acute{a}J_1=1,45$	$\grave{a} E_5=30$	$\acute{a}E_6 = 13$	-	2	3	8	5	9
26	2	$\hat{a} J_5=1,5$	$\hat{a}E_4 = 31$	$\mathcal{B}E_2=12,5$	2	9	3	7	-	
27	1	$\acute{a}J_4=1,55$	$\grave{a} E_2=32$	$\mathcal{B}E_5 = 12$	7	5	8	-	8	6
28	2	$\acute{a}J_5=1,6$	$\acute{a}E_4 = 33$	$\grave{a} E_1=11,5$	2	7	2	6	-	
29	1	$\grave{a}J_3=1,65$	$\grave{a} E_5=34$	$\acute{a}E_1 = 11$	1	3	-	7	6	2
30	3	$\hat{a}J_5=1,7$	$\hat{a}E_1=35$	$\mathcal{B}E_3=10,5$	8	4	7	6	-	5

## 2. Расчет переходных процессов в электрических цепях с источниками постоянного напряжения и тока

Методические рекомендации по выполнению задания

### Основные законы и методы анализа

#### Законы коммутации

Ток в индуктивности и напряжение на емкости сразу после коммутации (в момент времени  $t=0_+$ ) остаются такими же, какими они были непосредственно до коммутации (в момент времени  $t=0_-$ ).

В краткой записи:  $i_L(0_-) = i_L(0_+)$  и  $u_C(0_-) = u_C(0_+)$ .

#### Формула разложения

Если изображение искомой величины имеет вид рациональной дроби

$$F(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \mathbf{K} + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \mathbf{K} + a_{n-1} p + a_n} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \mathbf{K} + b_{m-1} p + b_m}{a_0 (p - p_1)(p - p_2)\mathbf{K}(p - p_n)} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)},$$

причём, все коэффициенты многочленов вещественные числа и  $m < n$ , то оригинал функции  $A(p)$  находят как

- $F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \in \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} = f(t)$ , если корни уравнения  $F_2(p) = 0$

вещественные различные;

- $F(p) = \frac{F_1(p)}{p F_3(p)} \in \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=2}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t} = f(t)$ , если уравнение

$F_2(p) = 0 = p F_3(p)$ , где  $F_3(p) = a_0 (p - p_2)(p - p_3)\mathbf{K}(p - p_n)$ , имеет один нулевой корень  $p_1 = 0$ ;

- $F(p) = \frac{F_1(p)}{p F_3(p)} \in \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} e^{p_2 t} \right] + \sum_{k=4}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t} =$

$$= \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + 2 \sqrt{A^2 + B^2} \cdot e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi) + \sum_{k=4}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t} = f(t),$$

если уравнение  $F_3(p) = 0$  имеет пару комплексных сопряжённых

корня  $p_{2,3} = -\delta \pm j\omega$ . Причём,  $\frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3'(p_2)} = A + jB$ ;  $\varphi = \arctg \frac{B}{A}$ .

#### Классический метод расчёта.

При анализе цепей  $N$ -го порядка ( $K$  – индуктивных элементов и  $(N-K)$  – ёмкостных элементов) с источниками постоянной ЭДС расчёт производится по следующему алгоритму:

1) Определить значения токов через индуктивные элементы  $i_{Lk}(0_-)$  и напряжений на ёмкостных элементах  $u_{Cn}(0_-)$  в электрической цепи до коммутации ( $t < 0$ ), где  $k=1, 2, \dots, K$ ;  $n=1, 2, \dots, (N-K)$ . Статический режим до коммутации рассчитывают при соответствующем состоянии ключа, заменяя индуктивные элементы в цепи перемычками, а ёмкостные разрывами между точками их подключения.

2) Определить значения напряжений на индуктивных элементах  $u_{Lk}(0_+)$  и токов через ёмкостные элементы цепи  $i_{Cn}(0_+)$  непосредственно после коммутации ( $t=0_+$ ). Для этого индуктивные элементы цепи нужно заменить источниками тока со значениями  $J_{Lk} = i_{Lk}(0_-)$ , а ёмкостные элементы – источниками ЭДС со значениями  $E_{Cn} = -u_{Cn}(0_-)$

3) Определить значения токов через индуктивные элементы  $i_{Lk}(\infty)$  и напряжений на ёмкостных элементах  $u_{Cn}(\infty)$  в электрической цепи в установившемся режиме после коммутации ( $t=\infty$ ), выполнив замену элементов аналогичную п.1.

4) Составить характеристическое уравнение и определить его корни. Для этого нужно разорвать любую ветвь электрической цепи в послекоммутационном состоянии и определить комплексное сопротивление относительно точек разрыва. При этом нужно заменить источники ЭДС и тока их эквивалентными сопротивлениями, т.е. заменить источники ЭДС перемычкой, а источники тока разрывом между точками подключения. После чего, заменить в выражении комплексного сопротивления произведения  $j\omega$  на  $p$  и, приравняв полученное выражение нулю, решить уравнение относительно  $p$ .

5) Представить мгновенные значения токов через индуктивные элементы и напряжений на ёмкостных элементах в виде

- $i_{Lk}(t) = i_{Lk}(\infty) + A_1 \cdot e^{p_1 t} + \dots + A_N \cdot e^{p_N t}$ ,  $u_{Cn}(t) = u_{Cn}(\infty) + B_1 \cdot e^{p_1 t} + \dots + B_N \cdot e^{p_N t}$ , если все корни характеристического уравнения вещественные и разные;
- $i_{Lk}(t) = i_{Lk}(\infty) + (A_1 \cdot t + A_2) \cdot e^{\delta t} + \dots + A_N \cdot e^{p_N t}$ ,  $u_{Cn}(t) = u_{Cn}(\infty) + (B_1 \cdot t + B_2) \cdot e^{\delta t} + \dots + B_N \cdot e^{p_N t}$ , если среди корней характеристического уравнения есть пара одинаковых  $p_1 = p_2 = \delta$ ;
- $i_{Lk}(t) = i_{Lk}(\infty) + [A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_2 \cdot \cos(\omega t)] \cdot e^{\delta t} + \dots + A_N \cdot e^{p_N t}$ ,  
 $u_{Cn}(t) = u_{Cn}(\infty) + [A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_2 \cdot \cos(\omega t)] \cdot e^{\delta t} + \dots + B_N \cdot e^{p_N t}$ , если среди корней есть пара комплексно-сопряженных  $p_{1,2} = \delta \pm j \cdot \omega$ .

6) Составить систему из  $N$  уравнений Кирхгофа для состояния цепи в момент времени  $t=0_+$  и определить постоянные интегрирования  $A_1, \dots, A_N, B_1, \dots, B_N$ . с учётом значений, полученных в п.2:  $L_k di_{Lk} / dt \Big|_{t=0_+} = u_{Lk}(0_+)$  и  $C_n du_{Cn} / dt \Big|_{t=0_+} = i_{Cn}(0_+)$ .

7) С помощью законов Ома и Кирхгофа определить, если требуется, остальные токи и напряжения в цепи.

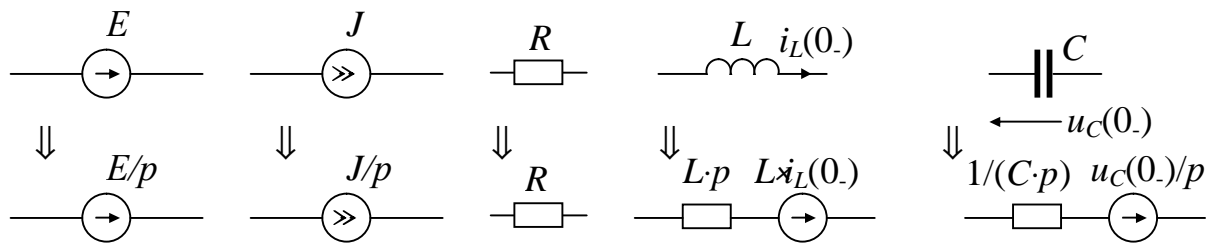
Примеры рассмотрены в задачах 2.1 и 2.2.

### Операторный метод расчета.

При анализе цепей  $N$ -го порядка операторным методом расчёт производится по следующему алгоритму:

1) Определить значения токов через индуктивные элементы  $i_{Lk}(0_-)$  и напряжений на ёмкостных элементах  $u_{Cn}(0_-)$  в электрической цепи до коммутации ( $t < 0$ ), где  $k=1, 2, \dots, K$ ;  $n=1, 2, \dots, (N-K)$ . Статический режим до коммутации рассчитывают при соответствующем состоянии ключа, заменяя индуктивные элементы в цепи перемычками, а ёмкостные разрывами между точками их подключения.

2) Составить операторную схему замещения, выполнив следующие замены элементов цепи в послекоммутационном состоянии:



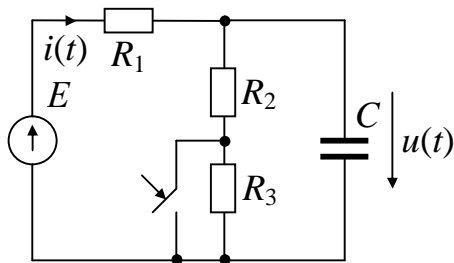
3) Пользуясь любыми методами анализа электрических цепей в статическом состоянии, определить операторные изображения искомых токов и напряжений.

4) С помощью теоремы (формулы) разложения или с помощью таблиц обратного преобразования Лапласа, перейти от операторных изображений к функциям мгновенным значений искомых величин.

Пример рассмотрен в задаче 2.3.

Далее приведены задачи, решённые описанными выше методами расчета.

### ЗАДАЧА 2.1

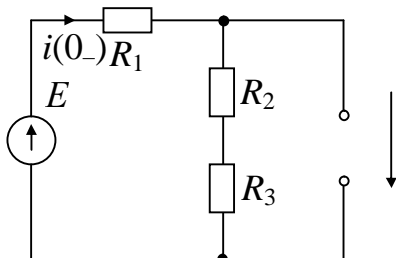


Дано:  $E=100$  В,  $R_1=10$  Ом,  $R_2=40$  Ом,  
 $R_3=50$  Ом,  $C=10^{-3}$  Ф.

Найти:  $i(t)$ ,  $u(t)$  классическим методом расчета.

Решение:

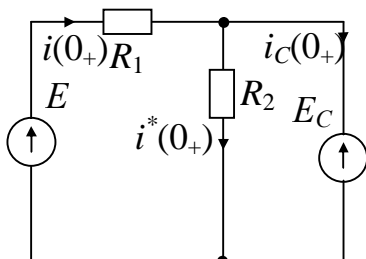
1) Цепь при  $t < 0$



$$i(0_-) = E / (R_1 + R_2 + R_3) = 100 / (10 + 40 + 50) = 1 \text{ [A];}$$

$$u(0_-) = (R_2 + R_3) \cdot i(0_-) = (40 + 50) \cdot 1 = 90 \text{ [В].}$$

2) Цепь при  $t = 0_+$

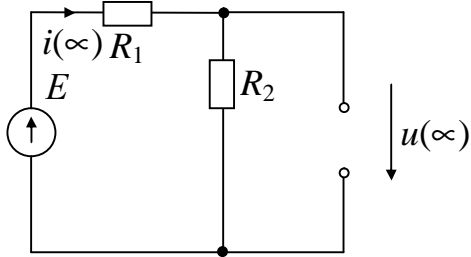


$$i(0_+) = (E - E_C) / R_1 = (100 - 90) / 10 = 1 \text{ [A];}$$

$$i^*(0_+) = E_C / R_2 = 90 / 40 = 1,75 \text{ [A];}$$

$$i_C(0_+) = i(0_+) - i^*(0_+) = 1 - 1,75 = 0,75 \text{ [A].}$$

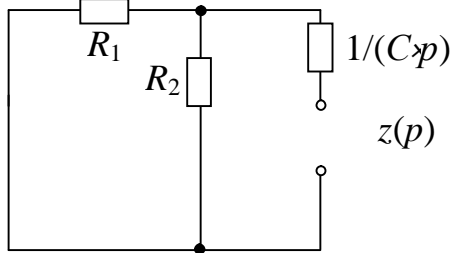
3) Цепь при  $t=\infty$



$$i(\infty) = E / (R_1 + R_2) = 100 / (10 + 40) = 2 \text{ [A];}$$

$$u(\infty) = R_2 \cdot i(\infty) = 40 \cdot 2 = 80 \text{ [V].}$$

4) Составляем и решаем характеристическое уравнение



$$z(p) = \frac{1}{C \cdot p} + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 8 \cdot (p + 125) / p.$$

Приравняв  $z(p)$  к 0, получим корни характеристического уравнения

$$p = -125 \text{ [1/c]}$$

В цепях первого порядка величина  $\tau = 1/|p|$  носит название *постоянной времени* цепи.

5) Записываем мгновенное значение напряжения емкостного элемента в общем виде  $u_C(t) = u_C(\infty) + B \cdot e^{p \cdot t} = 80 + B \cdot e^{-125 \cdot t}$ .

6) Определяем постоянную интегрирования.

Напряжение  $u_C(t)$  в момент коммутации ( $t=0_+$ ) будет  $u_C(0_+) = 80 + B$  или с учетом  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 90$  получаем  $90 = 80 + B$ . Тогда  $B = 10$  и  $u_C(t) = 80 + 10 \cdot e^{-125 \cdot t}$ .

7) Полученное в п.6 соотношение дает возможность определить остальные токи и напряжения:

$$i_C(t) = C \cdot du_C / dt = 10^{-3} \cdot (-125 \cdot 10 \cdot e^{-125 \cdot t}) = -1,25 \cdot e^{-125 \cdot t} \text{ [A];}$$

$$u_{R2}(t) = u_C(t) = 80 + 10 \cdot e^{-125 \cdot t} \text{ [V];}$$

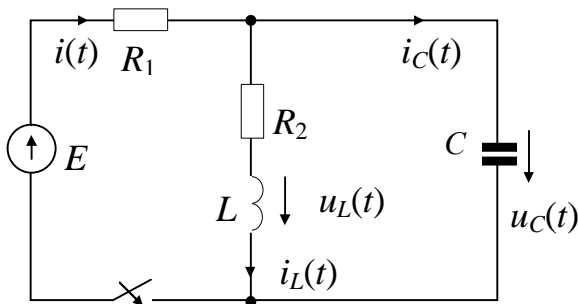
$$i_{R2}(t) = u_{R2}(t) / R_2 = (80 + 10 \cdot e^{-125 \cdot t}) / 40 = 2 + 0,25 \cdot e^{-125 \cdot t} \text{ [A];}$$

$$i(t) = i_C(t) + i_{R2}(t) = -1,25 \cdot e^{-125 \cdot t} + 2 + 0,25 \cdot e^{-125 \cdot t} = 2 - 1 \cdot e^{-125 \cdot t} \text{ [A];}$$

$$u_{R1}(t) = R_1 \cdot i(t) = 10 \cdot (2 - 1 \cdot e^{-125 \cdot t}) = 20 - 10 \cdot e^{-125 \cdot t} \text{ [V].}$$

$$\text{Ответ: } i(t) = 2 - 1 \cdot e^{-125 \cdot t} \text{ [A]; } u(t) = 80 + 10 \cdot e^{-125 \cdot t} \text{ [V].}$$

## ЗАДАЧА 2.2

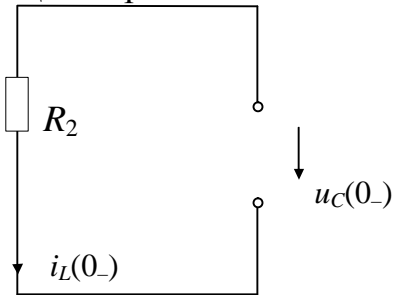


Дано:  $E = 200 \text{ В}$ ;  $R_1 = R_2 = 10^3 \text{ Ом}$ ;  
 $L = 0,1 \text{ Гн}$ ;  $C = 10^{-6} \text{ Ф}$ .

Найти: токи во всех ветвях и напряжения на индуктивном и ёмкостном элементах

Решение:

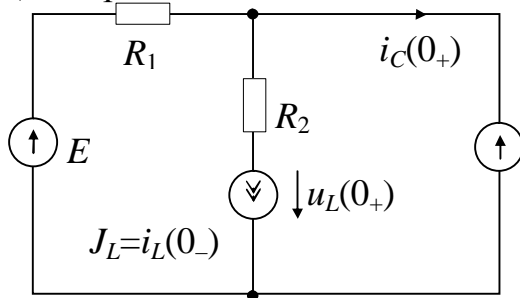
1) Цепь при  $t < 0$



$$i_L(0_-) = 0 \text{ [A];}$$

$$u_C(0_-) = 0 \text{ [B].}$$

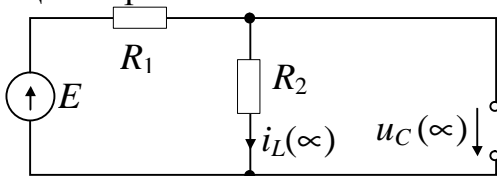
2) Цепь при  $t = 0_+$



$$i_C(0_+) = E/R_1 = 200/10^3 = 0,2 \text{ [A];}$$

$$u_L(0_+) = 0 \text{ [B].}$$

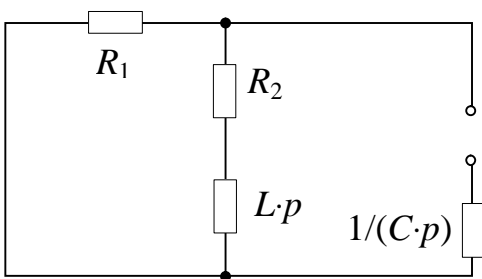
3) Цепь при  $t = \infty$



$$i_L(\infty) = E/(R_1 + R_2) = 200/(10^3 + 10^3) = 0,1 \text{ [A];}$$

$$u_L(\infty) = R_2 \cdot i_L(\infty) = 10^3 \cdot 0,1 = 100 \text{ [B].}$$

4) Составляем и решаем характеристическое уравнение



$$z(p) = \frac{1}{C \cdot p} + \frac{R_1 \cdot (R_2 + L \cdot p)}{R_1 + R_2 + L \cdot p} =$$

$$= \frac{1}{10^{-6} \cdot p} + \frac{10^3 \cdot (10^3 + 0,1 \cdot p)}{10^3 + 10^3 + 0,1 \cdot p} =$$

$$= \frac{10^3 \cdot (p^2 + 11 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^7)}{p \cdot (p + 2 \cdot 10^4)}$$

Приравняв  $z(p)$  к 0, получим корни характеристического уравнения

$$p_1 = -2300 \text{ [1/c]}, p_2 = -8700 \text{ [1/c].}$$

5) Записываем мгновенные значения напряжения на ёмкостном элементе и тока через индуктивный элемент в общем виде

$$u_C(t) = u_C(\infty) + B_1 \cdot e^{p_1 t} + B_2 \cdot e^{p_2 t} = 100 + B_1 \cdot e^{-2300 t} + B_2 \cdot e^{-8300 t} \text{ [B];}$$

$$i_L(t) = i_L(\infty) + A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} = 0,1 + A_1 \cdot e^{-2300 t} + A_2 \cdot e^{-8300 t} \text{ [A].}$$

б) Определяем постоянные интегрирования.

Ток  $i_L(t)$  в момент  $t = 0_+$  будет  $i_L(0_+) = 0,1 + A_1 + A_2$ , а с учетом  $i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0$ , получаем  $A_1 + A_2 = -0,1$ .

Напряжение  $u_L(t) = L \cdot di_L/dt = 0,1 \cdot (-2300 \cdot A_1 \cdot e^{-2300 t} - 8700 \cdot A_2 \cdot e^{-8700 t})$  в момент  $t = 0_+$  будет  $u_L(0_+) = 0,1 \cdot (-2300 \cdot A_1 - 8700 \cdot A_2)$  или, с учетом  $u_L(0_+) = 0$ ,  $2,3 \cdot A_1 + 8,7 \cdot A_2 = 0$ .

Напряжение  $u_C(t)$  в момент  $t=0_+$  будет  $u_C(0_+)=100+B_1+B_2$  или, с учетом  $u_C(0_+)=0$ ,  $B_1+B_2=-100$ .

Ток  $i_C(t)=C \cdot du_C/dt=10^{-6} \cdot (-2300 \cdot B_1 \cdot e^{-2300t} - 8700 \cdot B_2 \cdot e^{-8700t})$  для  $t=0_+$ , будет  $i_C(0_+)=10^{-6} \cdot (-2300 \cdot B_1 - 8700 \cdot B_2)$  или, с учетом  $i_C(0_+)=0,2$ ,  $2,3 \cdot B_1 + 8,7 \cdot B_2 = -200$ .

Располагаем двумя системами уравнений и их решениями:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = -0,1 \\ 2,3 \cdot A_1 + 8,7 \cdot A_2 = 0 \end{cases} \begin{cases} A_1 = -0,1359 \\ A_2 = -0,0359 \end{cases} \begin{cases} B_1 + B_2 = -100 \\ 2,3 \cdot B_1 + 8,7 \cdot B_2 = -200 \end{cases} \begin{cases} B_1 = -104,7 \\ B_2 = 4,7 \end{cases}$$

Тогда  $i_L(t)=0,1-0,1359 \cdot e^{-2300t}+0,0359e^{-8700t}$  [A];

$$u_C(t)=100-104,7 \cdot e^{-2300t}+4,7e^{-8700t}$$
 [B].

7) Полученные в п.6 соотношения дают возможность определить остальные токи и напряжения:

$$i_C(t)=C \cdot du_C/dt = 10^{-6} \cdot (104,7 \cdot 2300 \cdot e^{-2300t} - 4,7 \cdot 8700 \cdot e^{-8700t}) = 0,2406 \cdot e^{-2300t} - 0,0406 \cdot e^{-8700t}$$
 [A];

$$u_L(t)=L \cdot di_L/dt = 0,1 \cdot (0,1359 \cdot 2300 \cdot e^{-2300t} - 0,0359 \cdot 8700 \cdot e^{-8700t}) = 31,26 \cdot e^{-2300t} - 31,26 \cdot e^{-8700t}$$
 [B];

$$i(t)=i_L(t)+i_C(t)=0,1+0,1047 \cdot e^{-2300t}-0,0047 \cdot e^{-8700t}$$
 [A].

Ответ:  $i_L(t)=0,1-0,1359 \cdot e^{-2300t}+0,0359e^{-8700t}$  [A];

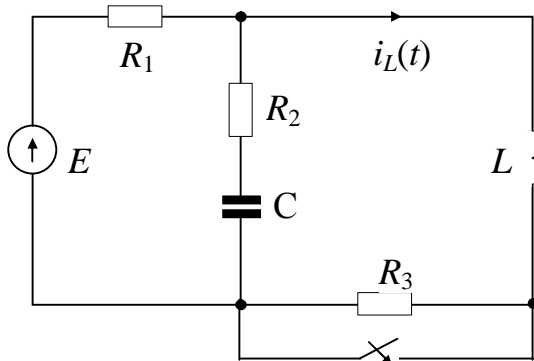
$$i_C(t)=0,2406 \cdot e^{-2300t} - 0,0406 \cdot e^{-8700t}$$
 [A];

$$i(t)=0,1+0,1047 \cdot e^{-2300t}-0,0047 \cdot e^{-8700t}$$
 [A];

$$u_L(t)=31,26 \cdot e^{-2300t} - 31,26 \cdot e^{-8700t}$$
 [B];

$$u_C(t)=100-104,7 \cdot e^{-2300t}+4,7e^{-8700t}$$
 [B].

### ЗАДАЧА 2.3



Дано:  $E=450$  В;  $R_1=400$  Ом;

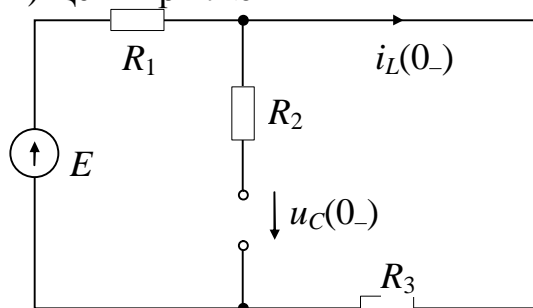
$R_2=20$  Ом;  $R_3=50$  Ом;

$C=10^{-4}$  Ф;  $L=0,2$  Гн.

Найти:  $i_L(t)$  операторным методом расчета.

Решение:

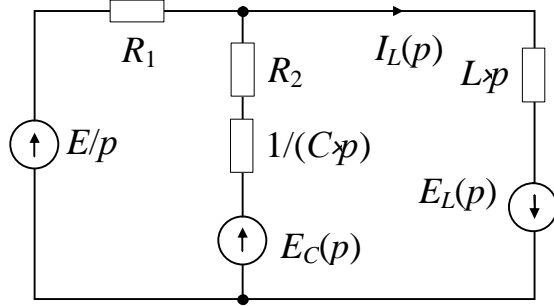
1) Цепь при  $t < 0$



$$i_L(0_-)=E/(R_1+R_3)=450/(400+50)=1$$
 [A];

$$u_C(0_-)=R_3 \cdot i_L(0_-)=50 \cdot 1=50$$
 [B].

2) Составим операторную схему замещения

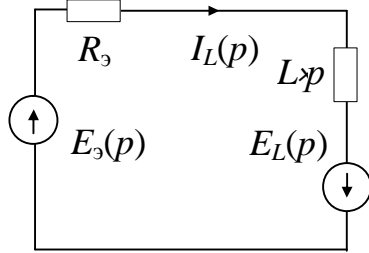


$$E_L(p) = L \cdot i_L(0_-) = 0,2 \cdot 1 = 0,2;$$

$$E_C(p) = u_C(0_-) / p = 50/p.$$

3) Определим  $I_L(p)$  методом эквивалентных преобразований.

Заменяем параллельное соединение  $(E, R_1) \parallel (E_C, R_2, 1/Cp)$  на эквивалентное



$$R_3(p) = \frac{R_1 \cdot [R_2 + 1/(Cp)]}{R_1 + R_2 + 1/(Cp)} = \frac{400 \cdot (20 + 1/10^{-4} p)}{400 + 20 + 1/10^{-4} p} = \frac{400 \cdot (p + 500)}{21 \cdot p + 500}.$$

$$E_s(p) = \left( \frac{E(p)}{R_1 \cdot p} + \frac{E_C(p)}{R_2 + 1/(Cp)} \right) \cdot R_3(p) = \left( \frac{450}{400 \cdot p} + \frac{50/p}{20 + 1/(10^{-4} p)} \right) \cdot \frac{400 \cdot (p + 500)}{21 \cdot p + 500} = \frac{50 \cdot (29 \cdot p + 4500)}{p \cdot (21 \cdot p + 500)}.$$

Согласно закону Ома изображение искомого тока будет определяться как

$$I_L(p) = \frac{E_s(p) + E_L(p)}{R_3 + L \cdot p} = \left( \frac{50 \cdot (29 \cdot p + 4500)}{p \cdot (21 \cdot p + 500)} + 0,2 \right) / \left( \frac{400 \cdot (p + 500)}{21 \cdot p + 500} + 0,2 p \right) = \frac{p^2 + 369p + 5,357 \cdot 10^4}{p \cdot (p^2 + 119p + 4,762 \cdot 10^4)} = \frac{F_1(p)}{pF_3(p)} = \frac{p^2 + b_1p + b_2}{p \cdot (p^2 + a_1p + a_2)}.$$

4) Осуществим обратное преобразование Лапласа по формуле разложения, для этого определим корни полинома знаменателя  $pF_3(p) = 0$ :

$$p_1 = 0; p_{2,3} = -\delta \pm j\omega = -59,5 \pm j210.$$

$$\text{Тогда } F_3'(p) = 2p + a_1 = 2p + 119; F_1(0)/F_3(0) = b_2/a_2 = 5,357/4,762 = 1,125;$$

$$\frac{F_1(p_2)}{p_2 F_3(p_2)} = -0,062 - j0,578 = \underline{H}; |\underline{H}| = 0,581; \varphi = \arg(\underline{H}) = -96,15^\circ.$$

Отсюда

$$i_L(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + 2|\underline{H}| \cdot e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi) = 1,125 + 1,162 \cdot e^{-59,5t} \cdot \cos(210t - 96,15^\circ) [\text{A}]$$

$$\text{Ответ: } i_L(t) = 1,125 + 1,162 \cdot e^{-59,5t} \cdot \cos(210t - 96,15^\circ) [\text{A}].$$



## ЗАДАНИЕ 2.1

Выполнить анализ переходного процесса в цепи первого порядка. Структура электрической цепи изображена на рисунке 2.1 в обобщённом виде.

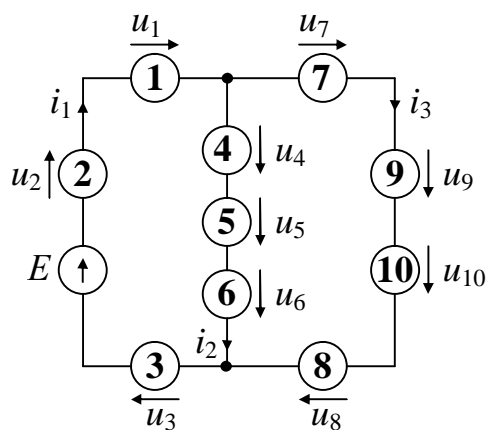


Рис. 2.1

Перед расчётом необходимо составить схему цепи, воспользовавшись информацией таблиц 2.1.1...2.1.4. Ключ в цепи расположен последовательно или параллельно одному из элементов, и до коммутации он находится замкнутым (З) или разомкнутым (Р) состоянии.

Рекомендованным преподавателем методом требуется определить и построить в интервале времени  $0 \dots 4\tau$  [с] заданные кривые  $i_k(t)$ ,  $u_m(t)$ .

**Таблица 2.1.1**

Вариант	Элементы $E[V], R[Ом], L[Гн], C[Ф]$	Искомые величины	Расположение ключа	Ключ при $t < 0$
1	$E=270; R_1=R_2=R_7=200;$ $L_9=0,2$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_1$	З
2	$E=260; R_1=R_5=R_9=R_{10}=300;$ $L_4=0,3$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_9$	З
3	$E=250; R_1=R_4=R_{10}=400;$ $C_9=2 \cdot 10^{-5}$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_1$	З
4	$E=240; R_1=R_3=R_8=500;$ $C_4=2 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_5(t)$	Последовательно $R_8$	Р
5	$E=230; R_1=R_4=R_7=600;$ $L_7=0,4$	$i_3(t), u_1(t)$	Последовательно $R_4$	Р
6	$E=220; R_1=R_5=R_{10}=700;$ $L_4=0,5$	$u_1(t), u_4(t)$	Последовательно $R_{10}$	Р
7	$E=210; R_1=R_4=R_9=800;$ $C_7=4 \cdot 10^{-5}$	$i_3(t), u_1(t)$	Последовательно $R_4$	Р
8	$E=200; R_1=R_5=R_{10}=900;$ $C_4=4 \cdot 10^{-6}$	$i_1(t), i_3(t)$	Последовательно $R_{10}$	Р
9	$E=190; R_1=R_4=R_7=R_9=1000;$ $L_{10}=0,6$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_7$	Р
10	$E=180; R_1=R_4=R_7=R_8=1100;$ $L_9=0,7$	$u_4(t), i_3(t)$	Последовательно $R_4$	Р
11	$E=170; R_1=R_5=R_8=R_{10}=1200;$ $C_9=6 \cdot 10^{-5}$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_1$	З
12	$E=160; R_1=R_4=R_7=R_8=1300;$ $C_{10}=6 \cdot 10^{-6}$	$u_4(t), i_3(t)$	Параллельно $R_1$	З
13	$E=150; R_1=R_4=R_9=R_{10}=1400;$ $L_5=0,8$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_9$	З
14	$E=140; R_1=R_4=R_5=R_7=1500;$ $L_9=0,9$	$i_1(t), u_5(t)$	Параллельно $R_5$	Р
15	$E=130; R_1=R_8=R_{10}=1600;$ $C_4=8 \cdot 10^{-5}$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_{10}$	З

16	$E=120; R_1=R_4=R_5=1700;$ $C_9=8 \cdot 10^{-6}$	$i_3(t), u_1(t)$	Параллельно $R_5$	Р
17	$E=110; R_1=R_4=R_5=R_7=R_9=1800;$ $L_{10}=1,0$	$u_{10}(t), i_2(t)$	Параллельно $R_7$	З
18	$E=100; R_1=R_4=R_5=R_7=R_8=1900;$ $L_9=1,1$	$i_3(t), i_1(t)$	Параллельно $R_5$	Р
19	$E=105; R_1=R_4=R_5=R_7=R_9=2000;$ $C_{10}=10^{-6}$	$u_{10}(t), i_1(t)$	Параллельно $R_4$	З
20	$E=115; R_1=R_4=R_5=R_7=R_8=2100;$ $C_9=10^{-5}$	$i_3(t), u_5(t)$	Параллельно $R_5$	Р
21	$E=125; R_1=R_4=R_5=R_7=2200;$ $L_{10}=1,2$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_7$	З
22	$E=135; R_1=R_5=R_8=R_{10}=2300;$ $L_4=1,3$	$i_2(t), u_1(t)$	Последова- тельно $R_8$	Р
23	$E=145; R_1=R_4=R_5=R_7=2400;$ $C_9=1,2 \cdot 10^{-6}$	$i_1(t), u_9(t)$	Последова- тельно $R_4$	Р
24	$E=155; R_1=R_5=R_8=R_{10}=2500;$ $C_4=1,2 \cdot 10^{-5}$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_8$	З
25	$E=165; R_1=R_5=R_7=2600;$ $C_8=1,3 \cdot 10^{-6}$	$u_1(t), u_8(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
26	$E=175; R_1=R_4=R_8=2700;$ $L_9=1,4$	$i_2(t), u_9(t)$	Последова- тельно $R_4$	Р
27	$E=185; R_1=R_4=R_5=R_7=2800;$ $C_{10}=1,3 \cdot 10^{-5}$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_4$	З
28	$E=195; R_1=R_4=R_5=R_7=2900;$ $L_9=1,5$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_5$	З
29	$E=205; R_1=R_5=R_9=R_{10}=3000;$ $L_4=1,6$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_9$	Р
30	$E=215; R_1=R_4=R_5=R_{10}=3100;$ $C_9=1,4 \cdot 10^{-6}$	$i_3(t), u_1(t)$	Параллельно $R_5$	З

**Таблица 2.1.2**

Вариант	Элементы $E[V]$ , $R[Ом]$ , $L[Гн]$ , $C[Ф]$	Искомые величины	Расположение ключа	Ключ при $t < 0$
1	$E=50; R_1=R_5=R_9=100;$ $L_7=0,01$	$i_1(t), u_7(t)$	Параллельно $R_9$	З
2	$E=55; R_1=R_5=R_7=R_9=1000;$ $C_6=10^{-6}$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_7$	З
3	$E=60; R_1=R_3=R_4=R_9=R_{10}=105;$ $L_6=0,011$	$i_3(t), u_6(t)$	Параллельно $R_4$	Р
4	$E=65; R_1=R_4=R_5=R_9=R_{10}=2000;$ $C_7=1,1 \cdot 10^{-6}$	$i_1(t), u_7(t)$	Параллельно $R_5$	Р
5	$E=70; R_1=R_3=R_5=R_9=R_{10}=110;$ $L_7=0,012$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_{10}$	З
6	$E=75; R_1=R_3=R_7=R_{10}=3000;$ $C_5=1,2 \cdot 10^{-6}$	$i_3(t), u_1(t)$	Параллельно $R_{10}$	Р
7	$E=80; R_1=R_5=R_9=115;$ $L_4=0,013$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_1$	З
8	$E=85; R_1=R_3=R_6=R_7=R_9=4000;$ $C_{10}=1,3 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_3(t)$	Параллельно $R_3$	З
9	$E=90; R_3=R_4=R_7=120;$ $L_{10}=0,014$	$i_1(t), u_4(t)$	Последовательно $R_4$	Р
10	$E=95; R_1=R_5=R_7=R_9=5000;$ $C_6=1,4 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_6(t)$	Параллельно $R_1$	З
11	$E=100; R_1=R_3=R_6=R_7=125;$ $L_5=0,015$	$i_1(t), u_7(t)$	Параллельно $R_3$	З
12	$E=105; R_1=R_5=R_7=R_9=6000;$ $C_6=1,5 \cdot 10^{-6}$	$i_3(t), u_6(t)$	Последовательно $R_7$	Р
13	$E=110; R_3=R_6=R_5=R_7=R_{10}=130;$ $L_9=0,016$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_5$	Р
14	$E=115; R_1=R_4=R_5=R_{10}=7000;$ $C_7=1,6 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_5(t)$	Последовательно $R_4$	Р
15	$E=120; R_1=R_3=R_5=R_{10}=135;$ $L_4=0,017$	$i_3(t), u_4(t)$	Последовательно $R_{10}$	Р

16	$E=125; R_3=R_5=R_6=R_7=R_9=140;$ $L_{10}=0,018$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_6$	3
17	$E=130; R_1=R_6=R_9=145;$ $L_4=0,019$	$i_2(t), u_4(t)$	Параллельно $R_1$	3
18	$E=135; R_3=R_7=R_9=R_{10}=8000;$ $C_5=1,7 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_9(t)$	Последова- тельно $R_7$	Р
19	$E=140; R_3=R_4=R_7=150;$ $L_6=0,02$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_4$	3
20	$E=145; R_1=R_3=R_4=R_5=R_9=9000;$ $C_7=1,8 \cdot 10^{-6}$	$i_1(t), u_7(t)$	Параллельно $R_3$	Р
21	$E=150; R_1=R_3=R_6=R_9=R_{10}=155;$ $L_7=0,021$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Последова- тельно $R_6$	Р
22	$E=155; R_1=R_3=R_7=R_9=10^4;$ $C_4=1,9 \cdot 10^{-6}$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_7$	3
23	$E=160; R_1=R_3=R_5=R_9=R_{10}=160;$ $L_4=0,022$	$i_1(t), u_5(t)$	Параллельно $R_9$	3
24	$E=165; R_3=R_5=R_6=R_{10}=1,1 \cdot 10^4;$ $C_9=2 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_3(t)$	Параллельно $R_6$	3
25	$E=170; R_1=R_6=R_7=165;$ $L_5=0,023$	$i_3(t), u_5(t)$	Последова- тельно $R_7$	Р
26	$E=175; R_3=R_6=R_9=R_{10}=1,2 \cdot 10^4;$ $C_4=2,1 \cdot 10^{-6}$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_{10}$	Р
27	$E=180; R_3=R_5=R_7=R_9=170;$ $L_{10}=0,024$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_7$	Р
28	$E=185; R_1=R_4=R_5=R_9=1,3 \cdot 10^4;$ $C_7=2,2 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_7(t)$	Параллельно $R_4$	3
29	$E=190; R_1=R_5=R_7=R_9=180;$ $L_6=0,025$	$i_3(t), u_6(t)$	Параллельно $R_7$	Р
30	$E=195; R_1=R_3=R_4=R_9=R_{10}=14000;$ $C_5=2,3 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_{10}$	3

**Таблица 2.1.3**

Вариант	Элементы $E[V], R[\text{кОм}], L[\text{мГн}], C[\text{мкФ}]$	Искомые величины	Расположение ключа	Ключ при $t < 0$
1	$E=100; R_2=R_5=R_7=R_9=0,1;$ $L_{10}=10$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_7$	З
2	$E=105; R_2=R_5=R_7=R_8=0,11;$ $L_9=15$	$i_3(t), u_5(t)$	Последовательно $R_5$	Р
3	$E=110; R_2=R_4=R_8=R_{10}=2,3;$ $C_9=1$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_2$	З
4	$E=115; R_2=R_5=R_7=R_8=2,2;$ $C_{10}=2$	$i_3(t), u_5(t)$	Параллельно $R_2$	З
5	$E=120; R_2=R_4=R_9=R_{10}=0,12;$ $L_5=20$	$i_3(t), u_5(t)$	Параллельно $R_{10}$	Р
6	$E=125; R_2=R_4=R_5=R_7=0,13;$ $L_9=25$	$i_1(t), u_4(t)$	Параллельно $R_4$	З
7	$E=130; R_2=R_8=R_{10}=2,1;$ $C_5=3$	$i_3(t), u_5(t)$	Параллельно $R_{10}$	Р
8	$E=135; R_2=R_4=R_5=2;$ $C_9=4$	$i_3(t), u_2(t)$	Параллельно $R_4$	З
9	$E=140; R_2=R_4=R_5=R_7=R_9=0,14;$ $L_{10}=30$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_7$	Р
10	$E=145; R_2=R_4=R_5=R_7=R_8=0,15;$ $L_9=35$	$i_1(t), i_3(t)$	Параллельно $R_4$	З
11	$E=150; R_2=R_4=R_5=R_7=R_9=1,9;$ $C_{10}=5$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_5$	Р
12	$E=155; R_2=R_4=R_5=R_7=R_8=1,8;$ $C_9=6$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_4$	З
13	$E=160; R_2=R_4=R_5=R_7=0,16;$ $L_{10}=40$	$i_3(t), u_5(t)$	Параллельно $R_7$	Р
14	$E=165; R_2=R_4=R_8=R_{10}=0,17;$ $L_5=45$	$i_2(t), u_2(t)$	Последовательно $R_8$	Р
15	$E=170; R_2=R_4=R_5=R_7=1,7;$ $C_9=7$	$i_1(t), u_9(t)$	Последовательно $R_5$	Р

16	$E=175; R_2=R_4=R_8=R_{10}=1,6;$ $C_5=8$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_8$	Р
17	$E=180; R_2=R_4=R_7=1,5;$ $L_8=47$	$u_2(t), u_8(t)$	Последова- тельно $R_4$	Р
18	$E=185; R_2=R_5=R_8=0,18;$ $L_9=50$	$i_2(t), u_9(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
19	$E=190; R_2=R_4=R_5=R_7=1,4;$ $C_{10}=10$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_5$	Р
20	$E=195; R_2=R_5=R_7=0,19;$ $L_9=55$	$i_1(t), u_6(t)$	Параллельно $R_3$	З
21	$E=200; R_1=R_3=R_5=R_9=0,2;$ $L_2=60$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_9$	З
22	$E=205; R_2=R_5=R_{10}=1,3;$ $C_9=11$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_2$	З
23	$E=210; R_2=R_4=R_7=R_8=1,2;$ $C_5=12$	$i_2(t), u_4(t)$	Параллельно $R_8$	Р
24	$E=215; R_2=R_5=R_7=0,21;$ $L_{10}=65$	$i_3(t), u_2(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
25	$E=220; R_2=R_4=R_{10}=0,22;$ $L_5=70$	$u_5(t), u_2(t)$	Последова- тельно $R_{10}$	Р
26	$E=225; R_2=R_5=R_9=1,1;$ $C_7=13$	$i_3(t), u_2(t)$	Параллельно $R_5$	З
27	$E=230; R_2=R_4=R_{10}=1,0;$ $C_5=14$	$i_1(t), i_3(t)$	Последова- тельно $R_{10}$	Р
28	$E=235; R_2=R_5=R_7=R_9=0,23;$ $L_4=75$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_9$	З
29	$E=240; R_2=R_4=R_5=R_7=0,24;$ $L_8=80$	$i_3(t), u_2(t)$	Параллельно $R_4$	Р
30	$E=245; R_2=R_4=R_9=R_{10}=1,2;$ $C_5=15$	$i_3(t), u_5(t)$	Параллельно $R_9$	З

**Таблица 2.1.4**

Вариант	Элементы $E[V], R[Ом], L[Гн], C[Ф]$	Искомые величины	Расположение ключа	Ключ при $t < 0$
1	$E=270; R_1=R_2=R_7=100;$ $L_9=0,1$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_1$	З
2	$E=260; R_1=R_5=R_9=R_{10}=150;$ $L_4=0,15$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_9$	З
3	$E=250; R_1=R_4=R_{10}=800;$ $C_9=1 \cdot 10^{-5}$	$i_1(t), u_9(t)$	Параллельно $R_1$	З
4	$E=240; R_1=R_3=R_8=1000;$ $C_4=1 \cdot 10^{-6}$	$i_2(t), u_5(t)$	Последовательно $R_8$	Р
5	$E=230; R_1=R_4=R_7=300;$ $L_7=0,2$	$i_3(t), u_1(t)$	Последовательно $R_4$	Р
6	$E=220; R_1=R_5=R_{10}=350;$ $L_4=0,25$	$u_1(t), u_4(t)$	Последовательно $R_{10}$	Р
7	$E=210; R_1=R_4=R_9=1600;$ $C_7=2 \cdot 10^{-5}$	$i_3(t), u_1(t)$	Последовательно $R_4$	Р
8	$E=200; R_1=R_5=R_{10}=1800;$ $C_4=2 \cdot 10^{-6}$	$i_1(t), i_3(t)$	Последовательно $R_{10}$	Р
9	$E=190; R_1=R_4=R_7=R_9=500;$ $L_{10}=0,3$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_7$	Р
10	$E=180; R_1=R_4=R_7=R_8=550;$ $L_9=0,35$	$u_4(t), i_3(t)$	Последовательно $R_4$	Р
11	$E=170; R_1=R_5=R_8=R_{10}=600;$ $C_9=12 \cdot 10^{-5}$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_1$	З
12	$E=160; R_1=R_4=R_7=R_8=6500;$ $C_{10}=12 \cdot 10^{-6}$	$u_4(t), i_3(t)$	Параллельно $R_1$	З
13	$E=150; R_1=R_4=R_9=R_{10}=1400;$ $L_5=0,8$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_9$	З
14	$E=140; R_1=R_4=R_5=R_7=750;$ $L_9=0,45$	$i_1(t), u_5(t)$	Параллельно $R_5$	Р
15	$E=130; R_1=R_8=R_{10}=800;$ $C_4=16 \cdot 10^{-5}$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_{10}$	З



16	$E=120; R_1=R_4=R_5=850;$ $C_9=16 \cdot 10^{-6}$	$i_3(t), u_1(t)$	Параллельно $R_5$	Р
17	$E=110; R_1=R_4=R_5=R_7=R_9=3200;$ $L_{10}=2,0$	$u_{10}(t), i_2(t)$	Параллельно $R_7$	З
18	$E=100; R_1=R_4=R_5=R_7=R_8=3800;$ $L_9=2,2$	$i_3(t), i_1(t)$	Параллельно $R_5$	Р
19	$E=105; R_1=R_4=R_5=R_7=R_9=1000;$ $C_{10}=2 \cdot 10^{-6}$	$u_{10}(t), i_1(t)$	Параллельно $R_4$	З
20	$E=115; R_1=R_4=R_5=R_7=R_8=1050;$ $C_9=2 \cdot 10^{-5}$	$i_3(t), u_5(t)$	Параллельно $R_5$	Р
21	$E=125; R_1=R_4=R_5=R_7=1100;$ $L_{10}=0,6$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_7$	З
22	$E=135; R_1=R_5=R_8=R_{10}=1150;$ $L_4=0,65$	$i_2(t), u_1(t)$	Последова- тельно $R_8$	Р
23	$E=145; R_1=R_4=R_5=R_7=1200;$ $C_9=2,4 \cdot 10^{-6}$	$i_1(t), u_9(t)$	Последова- тельно $R_4$	Р
24	$E=155; R_1=R_5=R_8=R_{10}=1250;$ $C_4=2,4 \cdot 10^{-5}$	$i_2(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_8$	З
25	$E=165; R_1=R_5=R_7=1300;$ $C_8=2,6 \cdot 10^{-6}$	$u_1(t), u_8(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
26	$E=175; R_1=R_4=R_8=1350;$ $L_9=0,7$	$i_2(t), u_9(t)$	Последова- тельно $R_4$	Р
27	$E=185; R_1=R_4=R_5=R_7=1400;$ $C_{10}=2,6 \cdot 10^{-5}$	$i_1(t), u_{10}(t)$	Параллельно $R_4$	З
28	$E=195; R_1=R_4=R_5=R_7=1450;$ $L_9=0,75$	$i_2(t), u_9(t)$	Параллельно $R_5$	З
29	$E=205; R_1=R_5=R_9=R_{10}=1500;$ $L_4=0,8$	$i_3(t), u_4(t)$	Параллельно $R_9$	Р
30	$E=215; R_1=R_4=R_5=R_{10}=1550;$ $C_9=0,7 \cdot 10^{-6}$	$i_3(t), u_1(t)$	Параллельно $R_5$	З

## ЗАДАНИЕ 2.2

Выполнить анализ переходного процесса в цепи второго порядка. Структуры электрических цепей изображены на рисунке 2.2 в обобщённом виде.

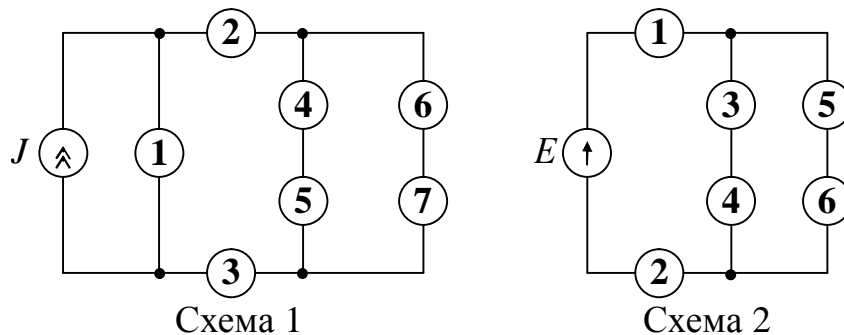


Рис. 2.2

Перед расчётом необходимо составить схему цепи, воспользовавшись информацией таблиц 2.2.1...2.2.4. Ключ в цепи расположен последовательно или параллельно одному из элементов, и до коммутации он находится замкнутым (З) или разомкнутым (Р) состоянии.

Рекомендованным преподавателем методом требуется определить и построить заданные кривые  $i_k(t)$ ,  $u_m(t)$ . Интервал времени, в пределах которого нужно выполнить построение кривых, нужно выбрать таким образом, чтобы отклонение тока и напряжения от установившегося не превышало 2%.

**Таблица 2.2.1**

Вариант	Схема	Элементы $J[A]$ , $E[V]$ , $R[Ом]$ , $L[мГн]$ , $C[мкФ]$	Искомые величины	Расположе- ние ключа	Ключ при $t < 0$
1	1	$J=3; R_1=R_2=R_7=50;$ $L_6=20; C_4=2$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
2	2	$E=90; R_2=45; R_5=15; R_6=30;$ $L_1=25; C_3=2,5$	$i_C(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_5$	З
3	1	$J=9; R_1=R_6=R_7=100;$ $L_2=30; C_5=3$	$i_L(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	З
4	2	$E=84; R_2=R_5=50; R_6=300;$ $L_1=35; C_3=3,5$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_5$	Р
5	1	$J=12,6; R_1=220; R_6=20;$ $R_7=200; L_3=40; C_4=4$	$i_C(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	Р
6	2	$E=143; R_1=10; R_2=15;$ $R_3=250; L_4=50; C_5=5$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	З
7	1	$J=15; R_1=R_2=15; R_3=20;$ $R_4=100; L_5=50; C_7=5,5$	$i_{R_2}(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_3$	З
8	2	$E=150; R_1=100; R_2=15;$ $R_3=35; L_4=45; C_5=4,5$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
9	1	$J=6; R_1=R_2=R_3=50; R_4=100;$ $L_5=40; C_6=4,5$	$i_C(t)$ , $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	Р
10	2	$E=210; R_1=60; R_5=45;$ $L_6=60; C_3=3,5$	$u_C(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последова- тельно $R_5$ и $L_6$	Р
11	1	$J=3,5; R_1=50; R_2=25; R_6=65;$ $L_7=65; C_5=7$	$i_{R_2}(t)$ , $u_L(t)$	Последова- тельно $R_6$ и $L_7$	Р
12	2	$E=145; R_1=70; R_3=75;$ $L_4=60; C_6=5$	$u_{R_3}(t)$ , $u_C(t)$	Последова- тельно $C_6$	Р
13	1	$J=4; R_1=R_2=40; R_6=80;$ $L_1=75; C_5=8$	$i_{R_6}(t)$ , $u_C(t)$	Последова- тельно $R_1$	Р
14	4	$E=75; R_2=60; R_5=90;$ $L_1=85; C_3=6$	$i_L(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
15	1	$J=1,4; R_1=50; R_3=60; R_4=90;$ $L_5=120; C_6=10$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_3$	З

16	1	$J=6; R_1=R_3=100; R_6=400;$ $L_7=20; C_5=2$	$i_C(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_3$	Р
17	2	$E=70; R_1=250; R_5=100;$ $R_6=150; L_2=25; C_4=2,5$	$i_{R_5}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_6$	З
18	1	$J=6; R_1=30; R_6=R_7=15;$ $L_3=35; C_4=3,5$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_7$	З
19	2	$E=130; R_1=100; R_5=70;$ $R_6=30; L_2=40; C_4=4$	$i_L(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_5$	Р
20	1	$J=5; R_1=R_6=40; R_7=20;$ $L_2=30; C_5=3$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_7$	Р
21	2	$E=150; R_1=R_2=100; R_4=400;$ $L_3=50; C_6=5$	$i_{R_2}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З
22	1	$J=12; R_1=15; R_2=R_3=10;$ $R_4=35; L_5=45; C_6=4,5$	$i_L(t),$ $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	З
23	2	$E=126; R_1=200; R_2=100;$ $R_4=400; L_5=60; C_6=5,5$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
24	1	$J=5,6; R_1=R_2=100; R_3=150;$ $R_4=450; L_5=65; C_7=6$	$i_{R_3}(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
25	2	$E=74; R_1=70; R_6=300;$ $L_5=50; C_4=7$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_6$ и $L_5$	Р
26	1	$J=3; R_1=100; R_3=150;$ $R_7=350; L_6=80; C_4=7,5$	$i_{R_7}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_7$ и $L_6$	Р
27	2	$E=144; R_2=120; R_4=600;$ $L_3=85; C_5=9$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $C_5$	Р
28	1	$J=4,5; R_1=100; R_2=50;$ $R_6=350; L_7=160; C_4=12$	$i_{R_2}(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_1$	Р
29	2	$E=53; R_1=400; R_5=130;$ $L_2=100; C_4=14$	$i_{R_1}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
30	1	$J=4,2; R_1=R_2=60; R_4=300;$ $L_5=140; C_7=16$	$i_{R_4}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З

**Таблица 2.2.2**

Вариант	Схема	Элементы $J[A]$ , $E[V]$ , $R[Ом]$ , $L[мГн]$ , $C[мкФ]$	Искомые величины	Расположение ключа	Ключ при $t < 0$
1	1	$J=1,5; R_1=R_2=R_7=50;$ $L_6=20; C_4=2$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
2	2	$E=45; R_2=45; R_5=15; R_6=30;$ $L_1=25; C_3=2,5$	$i_C(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_5$	З
3	1	$J=4,5; R_1=R_6=R_7=100;$ $L_2=30; C_5=3$	$i_L(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	З
4	2	$E=42; R_2=R_5=50; R_6=300;$ $L_1=35; C_3=3,5$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_5$	Р
5	1	$J=6,3; R_1=220; R_6=20;$ $R_7=200; L_3=40; C_4=4$	$i_C(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	Р
6	2	$E=71,5; R_1=10; R_2=15;$ $R_3=250; L_4=50; C_5=5$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	З
7	1	$J=7,5; R_1=R_2=15; R_3=20;$ $R_4=100; L_5=50; C_7=5,5$	$i_{R_2}(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_3$	З
8	2	$E=75; R_1=100; R_2=15;$ $R_3=35; L_4=45; C_5=4,5$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
9	1	$J=3; R_1=R_2=R_3=50; R_4=100;$ $L_5=40; C_6=4,5$	$i_C(t)$ , $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	Р
10	2	$E=105; R_1=60; R_5=45;$ $L_6=60; C_3=3,5$	$u_C(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последовательно $R_5$ и $L_6$	Р
11	1	$J=1,75; R_1=50; R_2=25;$ $R_6=65; L_7=65; C_5=7$	$i_{R_2}(t)$ , $u_L(t)$	Последовательно $R_6$ и $L_7$	Р
12	2	$E=72,5; R_1=70; R_3=75;$ $L_4=60; C_6=5$	$u_{R_3}(t)$ , $u_C(t)$	Последовательно $C_6$	Р
13	1	$J=2; R_1=R_2=40; R_6=80;$ $L_1=75; C_5=8$	$i_{R_6}(t)$ , $u_C(t)$	Последовательно $R_1$	Р
14	4	$E=36,5; R_2=60; R_5=90;$ $L_1=85; C_3=6$	$i_L(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последовательно $R_5$	Р
15	1	$J=0,7; R_1=50; R_3=60; R_4=90;$ $L_5=120; C_6=10$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_3$	З

16	1	$J=3; R_1=R_3=100; R_6=400;$ $L_7=20; C_5=2$	$i_C(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_3$	Р
17	2	$E=35; R_1=250; R_5=100;$ $R_6=150; L_2=25; C_4=2,5$	$i_{R_5}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_6$	З
18	1	$J=3; R_1=30; R_6=R_7=15;$ $L_3=35; C_4=3,5$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_7$	З
19	2	$E=65; R_1=100; R_5=70;$ $R_6=30; L_2=40; C_4=4$	$i_L(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_5$	Р
20	1	$J=2,5; R_1=R_6=40; R_7=20;$ $L_2=30; C_5=3$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_7$	Р
21	2	$E=75; R_1=R_2=100; R_4=400;$ $L_3=50; C_6=5$	$i_{R_2}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З
22	1	$J=6; R_1=15; R_2=R_3=10;$ $R_4=35; L_5=45; C_6=4,5$	$i_L(t),$ $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	З
23	2	$E=63; R_1=200; R_2=100;$ $R_4=400; L_5=60; C_6=5,5$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
24	1	$J=2,8; R_1=R_2=100; R_3=150;$ $R_4=450; L_5=65; C_7=6$	$i_{R_3}(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
25	2	$E=37; R_1=70; R_6=300;$ $L_5=50; C_4=7$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_6$ и $L_5$	Р
26	1	$J=1,5; R_1=100; R_3=150;$ $R_7=350; L_6=80; C_4=7,5$	$i_{R_7}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_7$ и $L_6$	Р
27	2	$E=72; R_2=120; R_4=600;$ $L_3=85; C_5=9$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $C_5$	Р
28	1	$J=2,25; R_1=100; R_2=50;$ $R_6=350; L_7=160; C_4=12$	$i_{R_2}(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_1$	Р
29	2	$E=26,5; R_1=400; R_5=130;$ $L_2=100; C_4=14$	$i_{R_1}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
30	1	$J=2,1; R_1=R_2=60; R_4=300;$ $L_5=140; C_7=16$	$i_{R_4}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З

**Таблица 2.2.3**

Вариант	Схема	Элементы $J[A]$ , $E[V]$ , $R[Ом]$ , $L[мГн]$ , $C[мкФ]$	Искомые величины	Расположение ключа	Ключ при $t < 0$
1	1	$J=3; R_1=R_2=R_7=25;$ $L_6=10; C_4=1$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
2	2	$E=90; R_2=45; R_5=15; R_6=30;$ $L_1=50; C_3=5$	$i_C(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_5$	З
3	1	$J=9; R_1=R_6=R_7=50;$ $L_2=15; C_5=1,5$	$i_L(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	З
4	2	$E=84; R_2=R_5=50; R_6=150;$ $L_1=35; C_3=3,5$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_5$	Р
5	1	$J=12,6; R_1=110; R_6=10;$ $R_7=100; L_3=20; C_4=2$	$i_C(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	Р
6	2	$E=143; R_1=20; R_2=30;$ $R_3=500; L_4=100; C_5=10$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	З
7	1	$J=15; R_1=R_2=30; R_3=40;$ $R_4=200; L_5=100; C_7=11$	$i_{R_2}(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_3$	З
8	2	$E=150; R_1=200; R_2=30;$ $R_3=70; L_4=90; C_5=9$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
9	1	$J=6; R_1=R_2=R_3=100; R_4=200;$ $L_5=80; C_6=9$	$i_C(t)$ , $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	Р
10	2	$E=210; R_1=120; R_5=90;$ $L_6=120; C_3=7$	$u_C(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последовательно $R_5$ и $L_6$	Р
11	1	$J=3,5; R_1=100; R_2=50;$ $R_6=130; L_7=130; C_5=14$	$i_{R_2}(t)$ , $u_L(t)$	Последовательно $R_6$ и $L_7$	Р
12	2	$E=145; R_1=140; R_3=150;$ $L_4=1200; C_6=10$	$u_{R_3}(t)$ , $u_C(t)$	Последовательно $C_6$	Р
13	1	$J=4; R_1=R_2=80; R_6=160;$ $L_1=150; C_5=16$	$i_{R_6}(t)$ , $u_C(t)$	Последовательно $R_1$	Р
14	4	$E=75; R_2=120; R_5=180;$ $L_1=170; C_3=12$	$i_L(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последовательно $R_5$	Р
15	1	$J=1,4; R_1=100; R_3=1200;$ $R_4=180; L_5=240; C_6=20$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_3$	З

16	1	$J=6; R_1=R_3=200; R_6=800;$ $L_7=40; C_5=4$	$i_C(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_3$	Р
17	2	$E=70; R_1=500; R_5=200;$ $R_6=300; L_2=50; C_4=5$	$i_{R_5}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_6$	З
18	1	$J=6; R_1=60; R_6=R_7=30;$ $L_3=70; C_4=7$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_7$	З
19	2	$E=130; R_1=200; R_5=140;$ $R_6=60; L_2=80; C_4=8$	$i_L(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_5$	Р
20	1	$J=5; R_1=R_6=80; R_7=40;$ $L_2=60; C_5=6$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_7$	Р
21	2	$E=150; R_1=R_2=200; R_4=800;$ $L_3=100; C_6=10$	$i_{R_2}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З
22	1	$J=12; R_1=30; R_2=R_3=20;$ $R_4=70; L_5=90; C_6=9$	$i_L(t),$ $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	З
23	2	$E=126; R_1=400; R_2=200;$ $R_4=800; L_5=1200; C_6=11$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
24	1	$J=5,6; R_1=R_2=200; R_3=300;$ $R_4=900; L_5=130; C_7=3$	$i_{R_3}(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
25	2	$E=74; R_1=140; R_6=600;$ $L_5=100; C_4=14$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_6$ и $L_5$	Р
26	1	$J=3; R_1=200; R_3=300;$ $R_7=700; L_6=160; C_4=15$	$i_{R_7}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_7$ и $L_6$	Р
27	2	$E=144; R_2=240; R_4=1200;$ $L_3=170; C_5=18$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $C_5$	Р
28	1	$J=4,5; R_1=200; R_2=100;$ $R_6=700; L_7=3200; C_4=24$	$i_{R_2}(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_1$	Р
29	2	$E=53; R_1=800; R_5=260;$ $L_2=200; C_4=28$	$i_{R_1}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
30	1	$J=4,2; R_1=R_2=120; R_4=600;$ $L_5=280; C_7=32$	$i_{R_4}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З



**Таблица 2.2.4**

Вариант	Схема	Элементы $J[A]$ , $E[V]$ , $R[Ом]$ , $L[мГн]$ , $C[мкФ]$	Искомые величины	Расположе- ние ключа	Ключ при $t < 0$
1	1	$J=1,5$ ; $R_1=R_2=R_7=100$ ; $L_6=40$ ; $C_4=4$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
2	2	$E=45$ ; $R_2=90$ ; $R_5=30$ ; $R_6=60$ ; $L_1=50$ ; $C_3=5$	$i_C(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_5$	З
3	1	$J=4,5$ ; $R_1=R_6=R_7=200$ ; $L_2=60$ ; $C_5=6$	$i_L(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	З
4	2	$E=42$ ; $R_2=R_5=100$ ; $R_6=600$ ; $L_1=70$ ; $C_3=7$	$i_L(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_5$	Р
5	1	$J=6,3$ ; $R_1=440$ ; $R_6=40$ ; $R_7=400$ ; $L_3=80$ ; $C_4=8$	$i_C(t)$ , $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_6$	Р
6	2	$E=71,5$ ; $R_1=20$ ; $R_2=30$ ; $R_3=500$ ; $L_4=100$ ; $C_5=10$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	З
7	1	$J=7,5$ ; $R_1=R_2=30$ ; $R_3=40$ ; $R_4=200$ ; $L_5=100$ ; $C_7=11$	$i_{R_2}(t)$ , $u_C(t)$	Параллельно $R_3$	З
8	2	$E=75$ ; $R_1=200$ ; $R_2=30$ ; $R_3=70$ ; $L_4=90$ ; $C_5=9$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
9	1	$J=3$ ; $R_1=R_2=R_3=100$ ; $R_4=200$ ; $L_5=80$ ; $C_6=9$	$i_C(t)$ , $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	Р
10	2	$E=105$ ; $R_1=120$ ; $R_5=90$ ; $L_6=120$ ; $C_3=7$	$u_C(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последова- тельно $R_5$ и $L_6$	Р
11	1	$J=1,75$ ; $R_1=100$ ; $R_2=50$ ; $R_6=130$ ; $L_7=130$ ; $C_5=14$	$i_{R_2}(t)$ , $u_L(t)$	Последова- тельно $R_6$ и $L_7$	Р
12	2	$E=72,5$ ; $R_1=140$ ; $R_3=150$ ; $L_4=120$ ; $C_6=10$	$u_{R_3}(t)$ , $u_C(t)$	Последова- тельно $C_6$	Р
13	1	$J=2$ ; $R_1=R_2=80$ ; $R_6=160$ ; $L_1=150$ ; $C_5=16$	$i_{R_6}(t)$ , $u_C(t)$	Последова- тельно $R_1$	Р
14	4	$E=36,5$ ; $R_2=120$ ; $R_5=180$ ; $L_1=170$ ; $C_3=12$	$i_L(t)$ , $u_{R_5}(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
15	1	$J=0,7$ ; $R_1=100$ ; $R_3=120$ ; $R_4=180$ ; $L_5=240$ ; $C_6=20$	$i_{R_1}(t)$ , $u_L(t)$	Параллельно $R_3$	З

16	1	$J=3; R_1=R_3=200; R_6=800;$ $L_7=40; C_5=4$	$i_C(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_3$	Р
17	2	$E=35; R_1=500; R_5=200;$ $R_6=300; L_2=50; C_4=5$	$i_{R_5}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_6$	З
18	1	$J=3; R_1=60; R_6=R_7=30;$ $L_3=70; C_4=7$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_7$	З
19	2	$E=65; R_1=200; R_5=140;$ $R_6=60; L_2=80; C_4=8$	$i_L(t),$ $u_{R_6}(t)$	Параллельно $R_5$	Р
20	1	$J=2,5; R_1=R_6=80; R_7=40;$ $L_2=60; C_5=6$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_7$	Р
21	2	$E=75; R_1=R_2=200; R_4=800;$ $L_3=100; C_6=10$	$i_{R_2}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З
22	1	$J=6; R_1=30; R_2=R_3=20;$ $R_4=70; L_5=90; C_6=9$	$i_L(t),$ $u_{R_3}(t)$	Параллельно $R_2$	З
23	2	$E=63; R_1=400; R_2=200;$ $R_4=800; L_5=120; C_6=11$	$i_L(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	Р
24	1	$J=2,8; R_1=R_2=200; R_3=300;$ $R_4=900; L_5=130; C_7=12$	$i_{R_3}(t),$ $u_L(t)$	Параллельно $R_2$	Р
25	2	$E=37; R_1=140; R_6=600;$ $L_5=100; C_4=14$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_6$ и $L_5$	Р
26	1	$J=1,5; R_1=200; R_3=300;$ $R_7=700; L_6=160; C_4=15$	$i_{R_7}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_7$ и $L_6$	Р
27	2	$E=72; R_2=240; R_4=1200;$ $L_3=170; C_5=18$	$i_C(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $C_5$	Р
28	1	$J=2,25; R_1=200; R_2=100;$ $R_6=700; L_7=320; C_4=24$	$i_{R_2}(t),$ $u_L(t)$	Последова- тельно $R_1$	Р
29	2	$E=26,5; R_1=200; R_5=260;$ $L_2=200; C_4=28$	$i_{R_1}(t),$ $u_C(t)$	Последова- тельно $R_5$	Р
30	1	$J=2,1; R_1=R_2=120; R_4=600;$ $L_5=280; C_7=32$	$i_{R_4}(t),$ $u_C(t)$	Параллельно $R_2$	З

### 3. Расчет электрических цепей однофазного синусоидального тока

#### Методические рекомендации по выполнению задания

#### 1. Мгновенное значение величины, синусоидально изменяющейся с течением времени

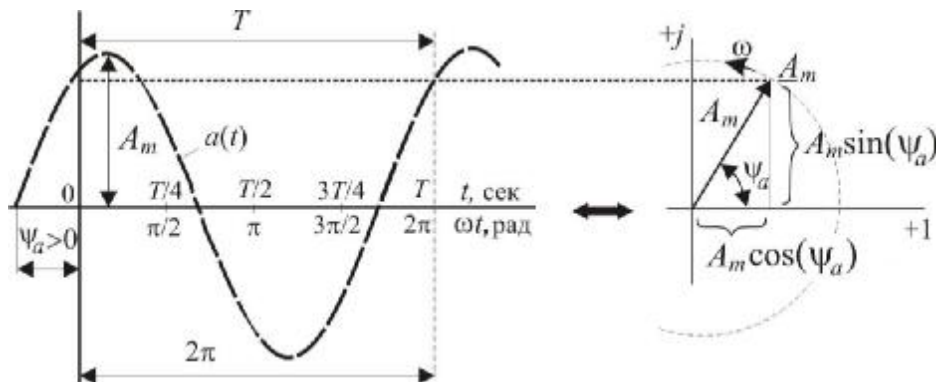
$$a(t) = A_m \sin(\omega t + \psi_a),$$

где  $A_m$  – максимальное значение или амплитуда;  $(\omega t + \psi_a)$  – фаза (фазовый угол);  $\psi_a$  – начальная фаза (начальный фазовый угол);  $\omega$  – угловая частота [рад/с].

Период  $T$  [с], угловая частота  $\omega$  и частота  $f$  [Гц] связаны соотношением

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}; \quad f = \frac{1}{T}.$$

По приведенному уравнению можно построить синусоиду и соответствующую векторную диаграмму, которая получается с учетом того, что мгновенные значения  $a$  – это проекция вращающегося вектора  $\underline{A}_m$  на ось мнимых чисел.



Аналитически этот вращающийся вектор записывается как

$$A_m e^{j\psi_a} e^{j\omega t}$$

↑ Амплитуда
↑ Оператор поворота на угол  $\psi_a$ 
↑ Оператор вращения с угловой частотой  $\omega$

Обозначим  $A_m e^{j\psi_a} = \underline{A}_m$ , где  $\underline{A}_m$  – комплексное амплитудное значение.

Таким образом,  $a(t) = A_m \sin(\omega t + \psi_a) = \text{Im}[\underline{A}_m e^{j\omega t}]$ .

↑ операция выделения мнимой части комплексного числа.

Метод представления синусоидальных функций времени изображениями в виде векторов на комплексной плоскости называется символическим методом или методом комплексных амплитуд.

При необходимости можно оперировать комплексным действующим значением  $\underline{A} = \underline{A}_m / \sqrt{2}$  с учетом того, что действующее значение  $A = A_m / \sqrt{2}$ .

**2. Комплексные числа.** Комплексное число, соответствующее точке, в которой лежит конец вектора  $\underline{A}_m$ , может быть написано в следующих формах -алгебраической  $\underline{A}_m = p + jq = A_m (\cos \psi_a + j \sin \psi_a)$ ;

-показательной  $\underline{A}_m = A_m e^{j\psi_a}$  (в соответствии с формулой Эйлера  $\cos \psi_a \pm j \sin \psi_a = e^{\pm j\psi_a}$ ).

Здесь  $p = A_m \cos \psi_a = \text{Re}[\underline{A}_m]$  – вещественная часть комплексного числа  $\underline{A}_m$ ;

$q = A_m \sin \psi_a = \text{Im}[\underline{A}_m]$  – мнимая часть комплексного числа  $\underline{A}_m$ ;

$A_m = |\underline{A}_m| = \sqrt{p^2 + q^2}$  – модуль комплексного числа  $\underline{A}_m$  (всегда положительный);

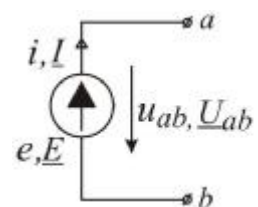
$$\psi_a = \begin{cases} \arctg\left(\frac{q}{p}\right) \Big|_{p>0} \\ \arctg\frac{q}{p} + 180^\circ \Big|_{p<0} \end{cases} \quad \text{– угол или аргумент комплексного числа.}$$

Комплексное число  $\underline{A}_m^* = p - jq = A_m e^{-j\psi_a}$  называется сопряженным числу  $\underline{A}_m = p + jq = A_m e^{j\psi_a}$ .

$j = \sqrt{-1} = e^{j\frac{\pi}{2}}$  – мнимая единица или оператор поворота на угол  $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$  ;

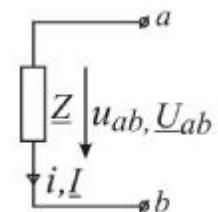
Умножение комплексного числа  $\underline{A}_m$  на число  $e^{j\alpha}$  сводится к повороту вектора  $\underline{A}_m$  в комплексной плоскости на угол  $\alpha$ :  $\underline{A}_m e^{j\alpha} = A_m e^{j\psi_a} e^{j\alpha} = A_m e^{j(\psi_a + \alpha)}$ . При  $\alpha > 0$  вектор  $\underline{A}_m$  поворачивается против часовой стрелки, при  $\alpha < 0$  – по часовой стрелке.

**3. Источник напряжения** с ЭДС  $e(t) = E_m \sin(\omega t + \varepsilon)$  можно полностью охарактеризовать, задав комплексную амплитуду ЭДС  $\underline{E}_m = E_m e^{j\varepsilon}$  или комплексное действующее значение ЭДС  $\underline{E} = E e^{j\varepsilon}$  ( $E = E_m / \sqrt{2}$ ).



**4. Пассивный элемент электрической цепи** определяется комплексным сопротивлением  $\underline{Z} = z e^{j\varphi}$  – комплексным числом, равным отношению комплексного напряжения на зажимах данного элемента к комплексному току этого элемента

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R + jX = Z e^{j\varphi},$$



Где  $\underline{U}$  и  $\underline{I}$  – комплексные действующие значения напряжения и тока;

$R$  – вещественная часть комплексного сопротивления  $\underline{Z}$  или активное сопротивление цепи;

$X$  – мнимая часть  $\underline{Z}$  или реактивное сопротивление цепи, составленное из индуктивного  $X_L = \omega L$  и емкостного  $X_C = 1/\omega C$  сопротивлений;

$Z$  – модуль комплексного сопротивления цепи или полное сопротивление цепи;

$\varphi$  – аргумент  $\underline{Z}$ , равный углу сдвига фаз между током и напряжением.

Отношение комплексного тока в данной цепи к комплексному напряжению на её зажимах называется **комплексной проводимостью** электрической цепи

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = G - jB = Ye^{-j\varphi} = \frac{1}{\underline{Z}}.$$

Таким образом, от комплексного сопротивления  $\underline{Z}$  можно всегда перейти к комплексной проводимости  $\underline{Y}$ , пользуясь соотношениями

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2} = \frac{G}{Y^2}; \quad X = \frac{B}{G^2 + B^2} = \frac{B}{Y^2};$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2}; \quad B = \frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{X}{Z^2}.$$

**6. Закон Ома** для участка цепи, не содержащего ЭДС, имеет вид

$$\underline{U} = \underline{U}_{ab} = \underline{I} \cdot \underline{Z}.$$

**7. Законы Кирхгофа.** Для записи уравнений на основании законов Кирхгофа надо выбрать положительные направления для всех токов и обозначить их на схеме.

Первый закон Кирхгофа в комплексной форме в применении к узлу электрической цепи имеет вид

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0,$$

При записи этого уравнения токи, направленные к узлу, следует записать со знаком плюс, а направление от узла – со знаком минус (или наоборот).

Второй закон Кирхгофа применяется к замкнутому контуру цепи и имеет вид

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k \underline{Z}_k = \sum_{k=1}^n \underline{E}_k$$

где  $\sum_{k=1}^n \underline{E}_k$  – алгебраическая сумма комплексных ЭДС источников напряжения. Со знаком плюс записываются те из них, положительные направления которых совпадают с выбранным направлением обхода контура; ЭДС, имеющие направления, противоположные обходу контура, записываются со знаком минус;

$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k \underline{Z}_k$  – падения напряжений на комплексных сопротивлениях  $\underline{Z}_k$  отдельных участков. Со знаком минус берутся те, для которых направление тока противоположно направлению обхода контура.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа следует выбирать независимые контуры, не содержащие источников тока.

**8. Последовательное и параллельное соединение сопротивлений.** При последовательном соединении участков цепи комплексное эквивалентное сопротивление равно сумме комплексных сопротивлений отдельных участков

$$\underline{Z} = \sum_{k=1}^n \underline{Z}_k$$

При параллельном соединении ветви цепи комплексная эквивалентная проводимость равна сумме комплексных проводимостей ветвей

$$\underline{Y} = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_k$$

В частном случае двух параллельно соединенных сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$  эквивалентное комплексное сопротивление

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

Комплексные токи, протекающие в каждой из двух параллельных ветвей, могут быть рассчитаны через комплексный ток  $\underline{I}$  в неразветвленной части цепи и комплексные сопротивления ветвей по формулам

$$\underline{I}_1 = \underline{I} \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_2 = \underline{I} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

### 9. Комплексная мощность

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ = Se^{j\varphi},$$

где  $S = UI$  – полная мощность;  $P = \operatorname{Re}[\underline{S}] = UI \cos \varphi$  – активная мощность;  $Q = \operatorname{Im}[\underline{S}] = UI \sin \varphi$  – реактивная мощность;  $\underline{I}^*$  – сопряженный комплекс тока;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением.

### 10. Баланс мощностей

$$\sum_{k=1}^n \underline{E}_k \underline{I}_k^* = \sum_{k=1}^n [I_k^2 r_k + jI_k^2 (x_{Lk} - x_{Ck})],$$

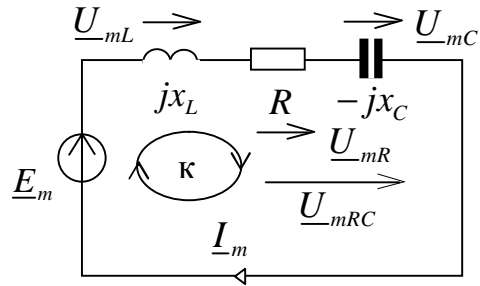
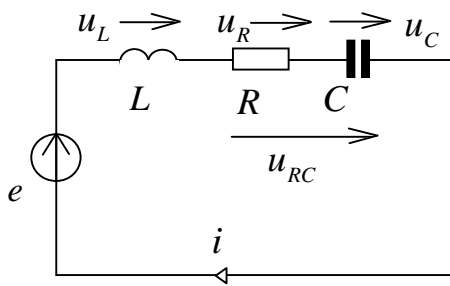
здесь  $\sum_{k=1}^n \underline{E}_k \underline{I}_k^* = \underline{S}$  – алгебраическая сумма мощностей всех источников ЭДС; положительны те из слагаемых, для которых направление действия ЭДС  $\underline{E}_k$  и соответствующего тока  $\underline{I}_k$  через ЭДС совпадают, в противном случае слагаемое отрицательно;

$\sum I_k^2 r_k = P$  – алгебраическая сумма мощностей на активных сопротивлениях; здесь должны быть учтены как внешние сопротивления, так и сопротивления самих источников энергии;

$\sum_{k=1}^n I_k^2 x_{Lk} - \sum_{k=1}^n I_k^2 x_{Ck} = Q$  – алгебраическая сумма мощностей на реактивных сопротивлениях.

**11. При расчете цепей переменного тока посредством комплексных чисел остаются справедливыми все методы расчета, применяемые для расчета цепей постоянного тока.** При этом во всех уравнениях, приведенных в разделе 1, все ЭДС, напряжения, токи, сопротивления и проводимости должны быть записаны в комплексной форме.

### ЗАДАЧА 3.1



Дано:  $u_{RC}(t) = 22,64 \sin(100t - 82^\circ)$  [В];  $R=4$  Ом;  $L = 70$  мГн;  $C = 2500$  мкФ.

Найти: неизвестные токи, напряжения, проверить соблюдение баланса мощностей.

Решение:

Определяем реактивные сопротивления элементов цепи и представляем их, а также заданное мгновенное значение  $u_{RC}(t)$ , комплексными числами

$$x_L = \omega L = 100 \cdot 0,07 = 7 \text{ [Ом]} \quad \rightarrow \quad \underline{Z}_L = j\omega L = jx_L = j7 \text{ [Ом];}$$

$$x_C = 1/\omega C = 10^6 / (100 \cdot 2500) = 4 \text{ [Ом]} \quad \rightarrow \quad \underline{Z}_C = 1/j\omega C = -jx_C = -j4 \text{ [Ом];}$$

$$u_{RC}(t) = 22,64 \sin(100t - 82^\circ) \text{ [В]} \quad \rightarrow \quad \underline{U}_{mRC} = 22,64 e^{-j82^\circ} \text{ [В].}$$

Решение задачи с помощью закона Ома

Зная напряжение  $\underline{U}_{mRC}$ , найдем ток  $\underline{I}_m$  через сопротивление этого участка  $\underline{Z}_{RC}$ , используя закон Ома

$$\underline{Z}_{RC} = R + \underline{Z}_C = R - jx_C = 4 - 4j = 4\sqrt{2} \cdot e^{-j45^\circ} = 5,65 e^{-j45^\circ} \text{ [Ом];}$$

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_{mRC}}{\underline{Z}_{RC}} = \frac{22,64 e^{-j82^\circ}}{5,65 e^{-j45^\circ}} = 4 e^{-j37^\circ} \text{ [А].}$$

Все элементы цепи соединены последовательно, поэтому через них течет одинаковый ток  $\underline{I}_m$ . Тогда напряжения на них выразим как

$$\underline{U}_{mC} = \underline{Z}_C \underline{I}_m = -jx_C \underline{I}_m = -j4 \cdot 4 e^{-j37^\circ} = 4 e^{-j90^\circ} \cdot 4 e^{-j37^\circ} = 16 e^{-j127^\circ} \text{ [В];}$$

$$\underline{U}_{mR} = R \underline{I}_m = R \underline{I}_m = 4 \cdot 4 e^{-j37^\circ} = 16 e^{-j37^\circ} \text{ [В];}$$

$$\underline{U}_{mL} = \underline{Z}_L \underline{I}_m = jx_L \underline{I}_m = j7 \cdot 4 e^{-j37^\circ} = 7 e^{j90^\circ} \cdot 4 e^{-j37^\circ} = 28 e^{j53^\circ} \text{ [В].}$$

ЭДС  $\underline{E}_m$  определим через ток  $\underline{I}_m$  и общее сопротивление  $\underline{Z}_{\text{общ}}$

$$\underline{Z}_{\text{общ}} = R + \underline{Z}_C + \underline{Z}_L = R - jx_C + jx_L = 4 - 4j + 7j = 4 + 3j = 5 \cdot e^{j36,86^\circ} \text{ [Ом];}$$

$$\underline{E}_m = \underline{I}_m \underline{Z}_{\text{общ}} = 4 e^{-j37^\circ} \cdot 5 e^{j36,86^\circ} = 20 e^{-j0,13^\circ} \approx 20 \text{ [В].}$$

К аналогичному результату можно прийти, используя при решении II закон Кирхгофа. Для контура «К»

$$\begin{aligned} \underline{E}_m &= \underline{U}_{mL} + \underline{U}_{mRC} = 28 e^{j53^\circ} + 22,64 e^{-j82^\circ} = 16,85 + j22,36 + 3,15 - j22,42 = \\ &= 20 - j0,06 \approx 20 \text{ [В].} \end{aligned}$$

Рассчитаем действующие значения токов и напряжений

$$I = I_m / \sqrt{2} = 4 / \sqrt{2} = 2\sqrt{2} \text{ [A]}; U_L = U_{mL} / \sqrt{2} = 28 / \sqrt{2} = 14\sqrt{2} \text{ [B]};$$

$$U_R = U_{mR} / \sqrt{2} = 16 / \sqrt{2} = 8\sqrt{2} \text{ [B]}; U_C = U_{mC} / \sqrt{2} = 8\sqrt{2} \text{ [B]};$$

$$E = E_m / \sqrt{2} = 20 / \sqrt{2} = 10\sqrt{2} \text{ [B]}.$$

Активную или среднюю мощность, потребляемую цепью, можно рассчитать с учетом действующего значения тока

$$P = I^2 R = I_m^2 \frac{R}{2} = 16 \cdot \frac{4}{2} = 32 \text{ [Вт]}.$$

Реактивная мощность, запасаемая цепью

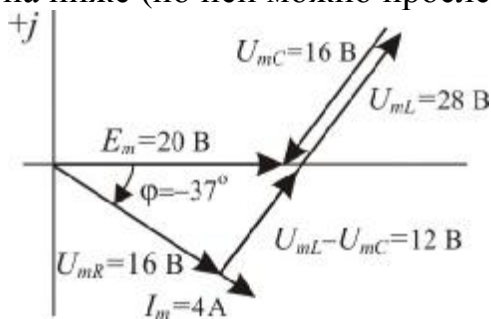
$$Q = I^2 x_L - I^2 x_C = I_m^2 \frac{x_L}{2} - I_m^2 \frac{x_C}{2} = 16 \cdot \frac{7}{2} - 16 \cdot \frac{4}{2} = 24 \text{ [Вар]}.$$

Баланс электрических мощностей определим из формулы для комплексной мощности

$$\underline{S} = \underline{E} \cdot \underline{I}^* = 10\sqrt{2} \cdot 2\sqrt{2}e^{+j37^\circ} = 32 + j24 = P + jQ \text{ [ВА]},$$

где  $\underline{I}^* = \underline{I}_m^* / \sqrt{2}$  - комплексно сопряженное действующее значение тока.

Векторная диаграмма, которая соответствует расчетным значениям, приведена ниже (по ней можно проследить выполнение II закона Кирхгофа).

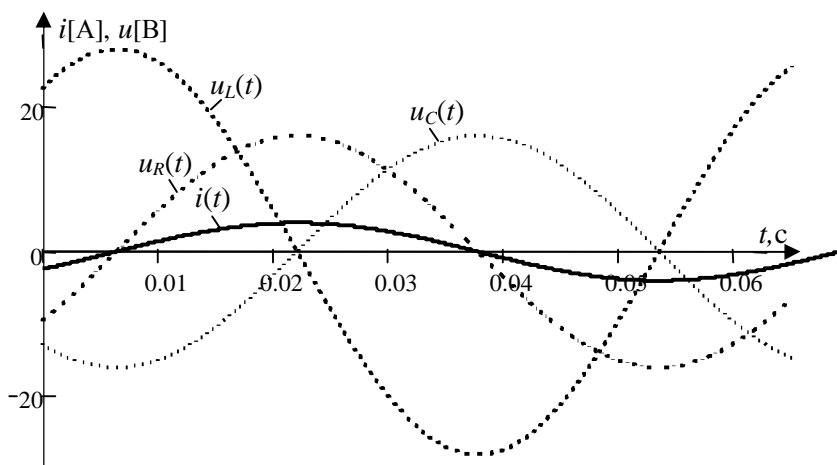


Запишем комплексы амплитудных значений тока и напряжений в виде мгновенных значений

$$i(t) = 4 \sin(100t - 37^\circ) \text{ [A]}; u_C(t) = 16 \sin(100t - 127^\circ) \text{ [B]};$$

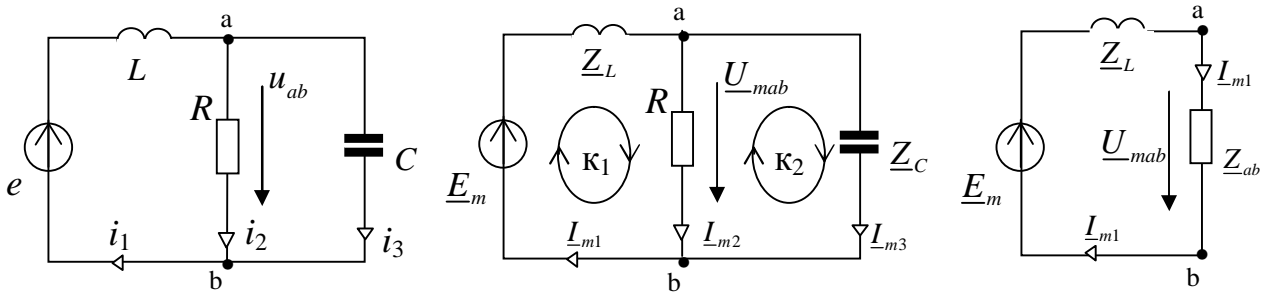
$$u_R(t) = 16 \sin(100t - 37^\circ) \text{ [B]}; u_L(t) = 28 \sin(100t + 53^\circ) \text{ [B]}; e(t) = 20 \text{ [B]}.$$

Изобразим эти переменные на временной плоскости





### ЗАДАЧА 3.2



Дано:  $u_{ab}(t) = 10 \sin(100t - 90^\circ)$  [В];  $R = 1$  [Ом];  $L = 0,01$  [Гн];  $C = 0,01$  [Ф].

Найти: неизвестные токи, напряжения, проверить соблюдение баланса мощностей.

Решение:

Представляем сопротивления элементов и мгновенные значения  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $i(t)$  комплексными числами и рисуем схему замещения, заменяя элементы их комплексными сопротивлениями

$$X_L = \omega L = 100 \cdot 0,01 = 1 \text{ [Ом]} \quad \rightarrow \underline{Z}_L = j1;$$

$$X_C = 1/\omega C = 1/(100 \cdot 0,01) = 1 \text{ [Ом]} \quad \rightarrow \underline{Z}_C = -j1;$$

$$u_{ab}(t) = 10 \sin(100t - 90^\circ) \text{ [В]} \quad \rightarrow \underline{U}_{mab} = 10e^{-j90^\circ};$$

$$i(t) \rightarrow \underline{I}_m; \quad e(t) \rightarrow \underline{E}_m.$$

Решение с помощью закона Ома

Поскольку нам известно напряжение  $\underline{U}_{mab}$ , найдем ток  $\underline{I}_{m1}$  на этом участке через сопротивление  $\underline{Z}_{ab}$

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{R \cdot \underline{Z}_C}{R + \underline{Z}_C} = \frac{-j}{1-j} = \frac{e^{-j90^\circ}}{\sqrt{2} \cdot e^{-j45^\circ}} = 0,707e^{-j45^\circ}.$$

$$\underline{I}_{m1} = \frac{\underline{U}_{mab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{10e^{-j90^\circ}}{0,707e^{-j45^\circ}} = 14,14e^{-j45^\circ}$$

Учитывая, что  $\underline{U}_{mab} = \underline{U}_{mR} = \underline{U}_{mC}$ , можно определить токи через  $R$ ,  $C$

$$\underline{I}_{m2} = \underline{U}_{mab} / R = 10e^{-j90^\circ} / 1 = 10e^{-j90^\circ};$$

$$\underline{I}_{m3} = \underline{U}_{mab} / -jX_C = 10e^{-j90^\circ} / -j1 = 10; \quad -j1 = e^{-j90^\circ}.$$

Зная ток  $\underline{I}_{m1}$  через ЭДС, можно определить ее величину

$$\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{ab} = j + \frac{-j}{1-j} = \frac{j+1-j}{1-j} = \frac{1}{\sqrt{2}e^{-j45^\circ}} = 0,707e^{j45^\circ};$$

$$\underline{E}_m = \underline{I}_{m1} \underline{Z}_\Sigma = 14,14e^{-j45^\circ} \cdot 0,707e^{j45^\circ} = 10.$$

Напряжение  $\underline{U}_{mL}$  также находится через ток на индуктивности  $\underline{I}_{m1}$

$$\underline{U}_{mL} = \underline{I}_{m1} \cdot jX_L = 14,14e^{-j45^\circ} \cdot j1 = 14,14e^{j45^\circ}; \quad j1 = e^{j90^\circ}.$$

Записываем мгновенные значения величин, не забывая о ранее опущенном операторе  $e^{j100t}$

$$i_1(t) = \text{Im}[\underline{I}_{m1} e^{j100t}] = \text{Im}[14,14e^{-j45^\circ} e^{j100t}] = 14,14 \sin(100t - 45^\circ) \text{ [A]};$$

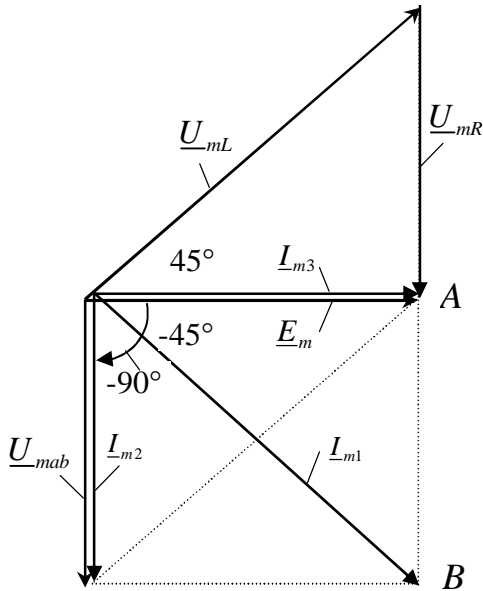
$$i_2(t) = \text{Im}[\underline{I}_{m2} e^{j100t}] = \text{Im}[10e^{-j90^\circ} e^{j100t}] = 10\sin(100t - 90^\circ) \text{ [A];}$$

$$i_3(t) = \text{Im}[\underline{I}_{m3} e^{j100t}] = \text{Im}[10e^{j0} e^{j100t}] = 10\sin(100t) \text{ [A];}$$

$$u_R(t) = u_C(t) = u_{ab}(t) = \text{Im}[\underline{U}_{mab} e^{j100t}] = \text{Im}[10e^{-j90^\circ} e^{j100t}] = 10\sin(100t - 90^\circ) \text{ [V].}$$

$$u_L(t) = \text{Im}[\underline{U}_{mL} e^{j100t}] = \text{Im}[14,14e^{j45^\circ} e^{j100t}] = 14,14\sin(100t + 45^\circ) \text{ [V].}$$

$$e(t) = \text{Im}[\underline{E}_m e^{j100t}] = \text{Im}[10e^{j100t}] = 10 \text{ [V].}$$



Векторную диаграмму предпочтительно строить в такой последовательности:

- за базовый вектор принимают вектор  $\underline{U}_{mab}$ ;
- вектор  $\underline{I}_{m2}$  через  $R$  образует с вектором  $\underline{U}_{mab}$  нулевой угол;
- вектор  $\underline{I}_{m3}$  через  $C$  образует с вектором  $\underline{U}_{mab}$  угол  $-90^\circ$ ;
- вектор  $\underline{I}_{m1}$  определяется геометрической суммой векторов  $\underline{I}_{m1} = \underline{I}_{m2} + \underline{I}_{m3}$ ;
- вектор  $\underline{U}_{mL}$  на  $L$  опережает вектор  $\underline{I}_{m1}$  на  $90^\circ$ .
- если вектор  $\underline{U}_{mR} = \underline{U}_{mab}$  перенести в конец вектора  $\underline{U}_{mL}$ , то сумма этих векторов должна дать вектор  $\underline{E}_m$

Из данного построения следует выполнение законов Кирхгофа для узла  $b$  и для контура  $k_1$ , что говорит о правильности решения. Масштаб:  $AB = 10\text{[V]}$  или  $10\text{[A]}$ .

### Решение задачи с помощью законов Кирхгофа

Как и в предыдущем методе, перерисовываем схему, представляя элементы их комплексными сопротивлениями. Количество уравнений должно равняться количеству неизвестных. В данной задаче неизвестными являются токи  $\underline{I}_{m1}$ ,  $\underline{I}_{m2}$ ,  $\underline{I}_{m3}$ , а также ЭДС  $\underline{E}_m$ .

Зная напряжение  $\underline{U}_{mR} = \underline{U}_{mab}$ , нетрудно определить ток  $\underline{I}_{m2} = \underline{U}_{mab}/R = 10e^{-j90^\circ}/1 = 10e^{-j90^\circ}$ , тем самым, сократив количество неизвестных.

Составим три уравнения по законам Кирхгофа

$$\text{узел } b: \quad \underline{I}_{m1} - \underline{I}_{m2} - \underline{I}_{m3} = 0;$$

$$\text{контур } k_1: \quad \underline{Z}_L \underline{I}_{m1} + R \underline{I}_{m2} = \underline{E}_m;$$

$$\text{контур } k_2: \quad -R \underline{I}_{m2} + \underline{Z}_C \underline{I}_{m3} = 0.$$

Все неизвестные переносим влево, а известные – вправо

$$\underline{I}_{m1} - \underline{I}_{m3} + 0 \cdot \underline{E}_m = \underline{I}_{m2};$$

$$\underline{Z}_L \underline{I}_{m1} - \underline{E}_m = -R \underline{I}_{m2};$$

$$0 \cdot \underline{I}_{m1} + \underline{Z}_C \underline{I}_{m3} + 0 \cdot \underline{E}_m = R \underline{I}_{m2}.$$

Подставив значения величин в систему уравнений, записываем ее в матричной форме

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ j1 & 0 & -1 \\ 0 & -j1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_{m1} \\ \underline{I}_{m3} \\ \underline{E}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10e^{-j90^\circ} \\ -10e^{-j90^\circ} \\ 10e^{-j90^\circ} \end{bmatrix}$$

Решая систему, находим  $\underline{I}_{m1} = 14,14e^{-j45^\circ}$ ;  $\underline{I}_{m3} = 10$ ;  $\underline{E}_m = 10$ .

Проверим решение с помощью баланса мощностей. Для этого найдем мощность источника ЭДС, представив в алгебраической форме записи комплексного числа

$$\underline{S} = \underline{E}_m \underline{I}_{m1}^* / 2 = (10 \cdot 14,14e^{j45^\circ}) / 2 = 70,7e^{j45^\circ} = 50 + j50$$

Активную и реактивную мощности найдем через токи на соответствующих элементах

$$P = \left( \frac{I_{m2}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot R = 50 \cdot 1 = 50$$

$$Q = \left( \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot X_L - \left( \frac{I_{m3}}{\sqrt{2}} \right)^2 X_C = 100 - 50 = 50$$

Таким образом, мы получили тождество  $\underline{S} = P + jQ$ , что свидетельствует о выполнении баланса мощностей.

### ЗАДАНИЕ 3.1

Последовательная цепь переменного тока (схема 1 и 2 на рис. 3.1) составлена источником ЭДС, резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами, параметры которых указаны в таблицах 3.1.1 ... 3.1.4.

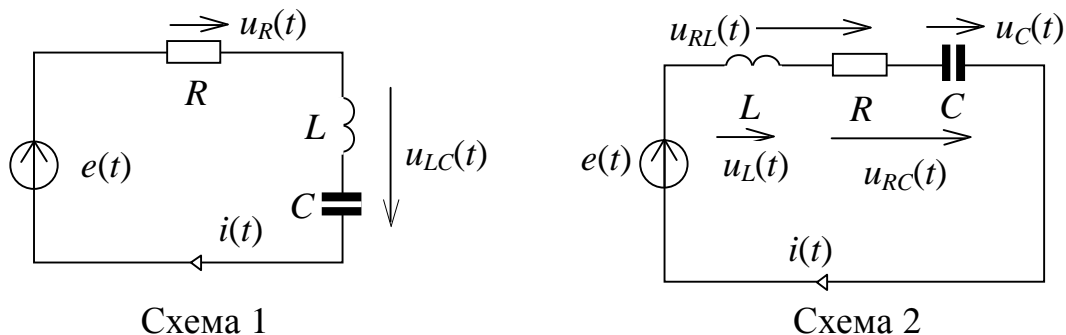


Рис. 3.1.

1. Рассчитать комплексные амплитуды ЭДС источника, тока и напряжений на элементах; одна из перечисленных величин задана в функции времени.
2. Определить мгновенные значения тока и напряжений.
3. Определить действующие значения тока и напряжений.
4. Определить активную, реактивную и полную мощности. Убедиться в том, что выполняется баланс мощностей.
5. Построить в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений для амплитудных значений величин.
6. Представить ток и напряжения графически в подходящем масштабе.

Таблица 3.1.1

Вариант	Схема	$R$ [Ом]	$L$ [мГн]	$C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	2	9	80	2000	$u_L = 50,59\sin(100t+71,56^\circ)$
2	2	6	40	714,2	$u_C = 46,03\sin(200t-99,46^\circ)$
3	1	4	22,5	2500	$u_{LC} = 35,78\sin(400t+26,56^\circ)$
4	1	3	10	666,6	$u_R = 8,319\sin(500t-33,69^\circ)$
5	1	5	1	333,3	$e = 70\sin(1000t)$
6	1	3	20	1428,5	$i = 8,575\sin(100t+59,03^\circ)$
7	2	1	10	5000	$u_L = 56,57\sin(200t+45^\circ)$
8	2	6	12,5	357,1	$u_C = 11,07\sin(400t-71,56^\circ)$
9	1	5	8	285,7	$u_{LC} = 25,72\sin(500t-59,03^\circ)$
10	1	9	5	1000	$u_R = 5,68\sin(1000t-23,96^\circ)$
11	2	6	20	1111,1	$u_{RL} = 20,58\sin(100t+67,83^\circ)$
12	2	6	40	1666,6	$u_{RC} = 68,71\sin(200t-66,37^\circ)$
13	1	8	15	312,5	$e = 50\sin(400t)$
14	1	2	12	285,7	$i = 22,36\sin(500t+26,56^\circ)$
15	2	5	7	1000	$u_L = 17,92\sin(1000t+39,8^\circ)$
16	2	8	60	1250	$u_C = 87,31\sin(100t-75,96^\circ)$
17	1	6	15	1250	$u_{LC} = 13,15\sin(200t-80,53^\circ)$
18	1	9	17,5	500	$u_R = 39,05\sin(400t-12,53^\circ)$
19	2	8	8	250	$u_{RL} = 50\sin(500t+53,13^\circ)$
20	2	5	7	250	$u_{RC} = 65,89\sin(1000t-69,62^\circ)$
21	1	1	50	10000	$e = 40\sin(100t)$
22	1	8	45	625	$i = 6,201\sin(200t+7,125^\circ)$
23	2	4	7,5	625	$u_L = 65,48\sin(400t+104^\circ)$
24	2	6	16	500	$u_C = 38,83\sin(500t-123,7^\circ)$
25	1	6	5	125	$u_{LC} = 4,472\sin(1000t-63,43^\circ)$
26	1	3	10	1428,5	$u_R = 13,42\sin(100t+63,43^\circ)$
27	2	3	10	625	$u_{RL} = 32,25\sin(200t+97,12^\circ)$
28	2	5	7,5	416,6	$u_{RC} = 26,79\sin(400t-19,23^\circ)$
29	1	4	10	250	$e = 10\sin(500t)$
30	1	3	2	166,6	$i = 14\sin(1000t+53,13^\circ)$

Таблица 3.1.2

Вариант	Схема	$R$ [Ом]	$L$ [мГн]	$C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	1	2	16	333,3	$e = 40\sin(500t)$
2	1	3	15	1250	$i = 14\sin(400t - 53,13^\circ)$
3	1	5	40	5000	$u_R = 17,43\sin(200t - 54,46^\circ)$
4	2	2	60	1428,6	$u_L = 107,3\sin(100t + 116,5^\circ)$
5	2	8	5	166,6	$u_C = 14,88\sin(1000t - 82,87^\circ)$
6	2	8	14	500	$u_{RL} = 74,65\sin(500t + 20,64^\circ)$
7	2	9	2,5	625	$u_{RC} = 31,14\sin(400t - 5,527^\circ)$
8	1	5	15	5000	$u_{LC} = 7,428\sin(200t + 68,2^\circ)$
9	1	1	30	1428,6	$e = 30\sin(100t)$
10	1	2	7	200	$i = 24,75\sin(1000t - 45^\circ)$
11	2	2	2	500	$u_L = 24,96\sin(500t + 146,3^\circ)$
12	2	5	17,5	2500	$u_C = 10,24\sin(400t - 140,2^\circ)$
13	1	4	35	1000	$u_R = 80,5\sin(200t - 26,56^\circ)$
14	2	5	10	2000	$u_{RL} = 31,85\sin(100t + 49,97^\circ)$
15	2	2	9	333,3	$u_{RC} = 51,31\sin(1000t - 127,9^\circ)$
16	1	8	6	250	$u_{LC} = 10,6\sin(500t - 58^\circ)$
17	1	6	20	500	$e = 90\sin(400t)$
18	1	6	35	1000	$i = 14,23\sin(200t - 18,43^\circ)$
19	1	7	10	5000	$u_R = 39,6\sin(100t + 8,13^\circ)$
20	2	6	8	111,1	$u_L = 65,76\sin(1000t + 99,46^\circ)$
21	2	3	8	250	$u_C = 80\sin(500t - 36,87^\circ)$
22	2	7	12,5	625	$u_{RL} = 36,49\sin(400t + 27,41^\circ)$
23	12	4	40	1000	$u_{RC} = 76,84\sin(200t - 88,21^\circ)$
24	1	7	40	1666,6	$u_{LC} = 2,747\sin(100t - 74,05^\circ)$
25	1	5	1	250	$e = 80\sin(1000t)$
26	1	9	16	400	$i = 8,433\sin(500t - 18,43^\circ)$
27	1	3	40	1111,1	$u_R = 36\sin(100t + 59,04^\circ)$
28	2	8	20	714,3	$u_L = 18,73\sin(200t + 110,5^\circ)$
29	2	5	80	10000	$u_C = 2,325\sin(100t - 144,5^\circ)$
30	2	1	7	333,3	$u_{RL} = 154,3\sin(1000t + 5,906^\circ)$

Таблица 3.1.3

Вариант	Схема	$R$ [Ом]	$L$ [мГн]	$C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	1	5	15	1250	$u_{LC} = 56,22\sin(400t+51,34^\circ)$
2	2	7	20	833,3	$u_{RC} = 12,66\sin(200t-24,65^\circ)$
3	2	1	40	3333,3	$u_{RL} = 58,31\sin(100t+30,96^\circ)$
4	2	3	1	500	$u_C = 37,95\sin(1000t-71,56^\circ)$
5	2	3	14	666,6	$u_L = 126\sin(500t+36,87^\circ)$
6	1	7	12,5	357,1	$u_R = 38,46\sin(400t+15,94^\circ)$
7	1	1	20	555,5	$i = 5,883\sin(200t+78,7^\circ)$
8	1	7	10	1250	$e = 40\sin(100t)$
9	1	7	5	111,1	$u_{LC} = 9,923\sin(1000t-60,25^\circ)$
10	2	1	10	500	$u_{RC} = 87,46\sin(500t-120,9^\circ)$
11	2	9	7,5	277,7	$u_{RL} = 70,16\sin(400t+52,12^\circ)$
12	2	3	40	2500	$u_C = 26,83\sin(200t-153,4^\circ)$
13	2	8	50	1111,1	$u_L = 27,95\sin(100t+116,5^\circ)$
14	1	7	5	111,1	$u_R = 34,73\sin(1000t+29,74^\circ)$
15	1	1	4	500	$i = 26,83\sin(500t+63,43^\circ)$
16	1	8	22,5	500	$e = 40\sin(400t)$
17	1	4	40	1000	$u_{LC} = 6\sin(200t+53,13^\circ)$
18	2	5	40	3333,3	$u_{RC} = 57,18\sin(100t-42,27^\circ)$
19	2	8	5	166,6	$u_{RL} = 23,4\sin(1000t+39,13^\circ)$
20	2	4	12	2000	$u_C = 9,37\sin(500t-141,3^\circ)$
21	2	1	10	312,5	$u_L = 29,1\sin(400t+165,9^\circ)$
22	1	8	25	625	$u_R = 65,54\sin(200t+20,56^\circ)$
23	1	4	90	1250	$i = 14,55\sin(100t-14,04^\circ)$
24	1	4	7	250	$e = 90\sin(1000t)$
25	1	8	2	1000	$u_{LC} = 3,721\sin(500t-82,87^\circ)$
26	2	7	7,5	277,7	$u_{RC} = 24,73\sin(400t-11,52^\circ)$
27	2	8	30	1000	$u_{RL} = 86,82\sin(200t+29,74^\circ)$
28	2	6	20	1428,5	$u_C = 17,92\sin(100t-50,19^\circ)$
29	2	8	1	333,3	$u_L = 8,489\sin(1000t+104^\circ)$
30	1	6	14	500	$u_R = 71,52\sin(500t-26,56^\circ)$

Таблица 3.1.4

Вариант	Схема	$R$ [Ом]	$L$ [мГн]	$C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	1	6	5	277,8	$u_R = 19,52\sin(400t+49,4^\circ)$
2	2	4	30	5000	$u_L = 65,59\sin(200t+38,66^\circ)$
3	2	4	30	5000	$u_C = 33,95\sin(100t-104^\circ)$
4	2	1	2	166,6	$u_{RL} = 48,81\sin(1000t+139,4^\circ)$
5	2	7	6	222,2	$u_{RC} = 24,73\sin(500t-11,52^\circ)$
6	1	5	17,5	625	$u_{LC} = 5,145\sin(400t+59,04^\circ)$
7	1	4	45	1666,6	$e = 80\sin(200t)$
8	1	1	80	2500	$i = 14,55\sin(100t-75,96^\circ)$
9	1	5	9	500	$u_R = 40,68\sin(1000t-54,46^\circ)$
10	2	5	8	666,6	$u_L = 31,38\sin(500t+78,69^\circ)$
11	2	3	22,5	312,5	$u_C = 25,3\sin(400t-108,4^\circ)$
12	2	8	10	555,5	$u_{RC} = 67,96\sin(200t-7,18^\circ)$
13	2	5	90	2000	$u_{RL} = 64,32\sin(100t+22,28^\circ)$
14	1	5	9	250	$u_{LC} = 42,43\sin(1000t+45^\circ)$
15	1	2	8	333,3	$e = 90\sin(500t)$
16	1	9	12,5	625	$i = 8,834\sin(400t-6,34^\circ)$
17	1	8	25	5000	$u_R = 17,89\sin(200t-26,56^\circ)$
18	2	4	30	2000	$u_L = 13,42\sin(100t+116,5^\circ)$
19	2	5	6	500	$u_C = 12,49\sin(1000t-128,6^\circ)$
20	2	6	2	333,3	$u_{RL} = 62,3\sin(500t+49,27^\circ)$
21	2	4	20	833,3	$u_{RC} = 7,809\sin(400t-88,21^\circ)$
22	1	5	40	714,3	$u_{LC} = 5,883\sin(200t+78,7^\circ)$
23	1	9	80	1666,6	$e = 50\sin(100t)$
24	1	7	4	111,1	$i = 4,65\sin(1000t+35,54^\circ)$
25	1	1	4	666,6	$u_R = 28,28\sin(500t+45^\circ)$
26	2	3	22,5	1250	$u_L = 82,72\sin(400t+23,2^\circ)$
27	2	6	25	714,2	$u_C = 88,54\sin(200t-71,56^\circ)$
28	2	2	70	5000	$u_{RL} = 13,52\sin(100t+5,856^\circ)$
29	2	1	3	142,8	$u_{RC} = 51,45\sin(1000t-5,906^\circ)$
30	1	7	8	250	$u_{LC} = 4,961\sin(500t-60,25^\circ)$



### ЗАДАНИЕ 3.2

Аналізу подлежат електрическа цеп, варианты схем которой формально изображены на трех рисунках.

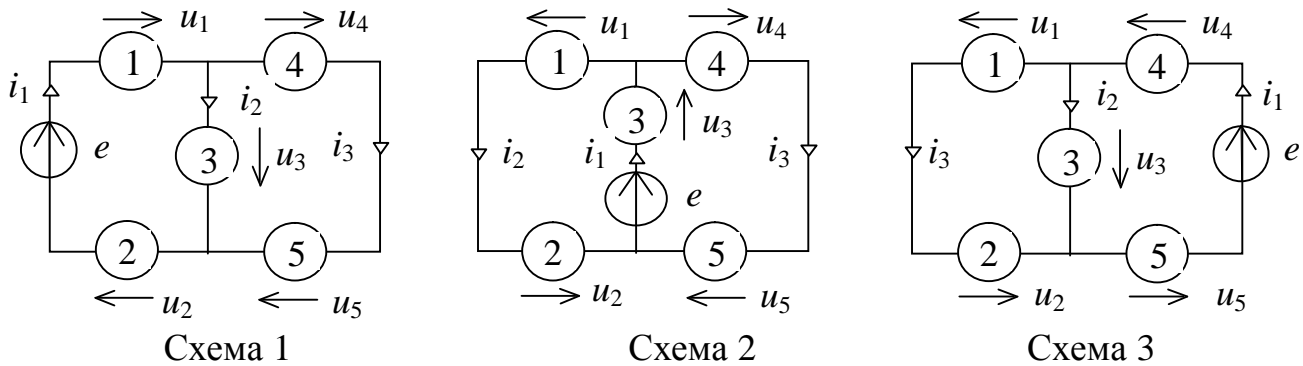
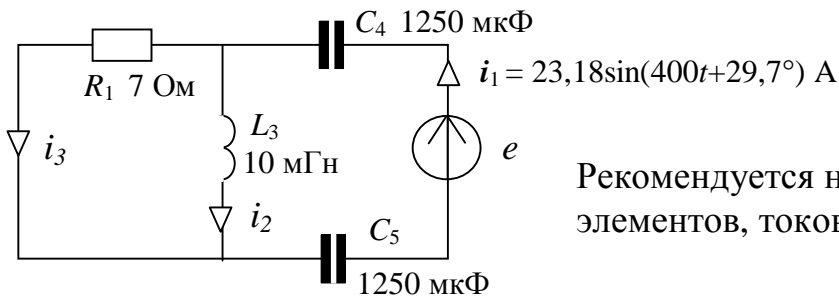


Рис. 3.2

Перед расчетом необходимо составить схему предложенного преподавателем варианта (параметры элементов указаны в таблицах 3.2.1 ... 3.2.4). В качестве примера показана схема тридцатого варианта из таблицы 3.2.1. Второго элемента в таблице нет и на схеме он заменён перемычкой.



Рекомендуется не изменять нумерацию элементов, токов и напряжений.

1. Рассчитать мгновенные значения ЭДС источника, токов в ветвях и напряжений на элементах.
2. Определить активную, реактивную и полную мощности.
3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для амплитудных значений величин.

**Таблица 3.2.1**

Вариант	Схема	Элементы ветвей $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	1	$C_1=10000, R_3=2, L_4=40, R_5=2$	$e = 10\sin(100t)$
2	2	$C_1=2500, R_3=3, L_4=25, R_5=3$	$i_1 = 2,647\sin(200t+36^\circ)$
3	3	$C_1=312,5, R_3=4, L_4=10, R_5=4$	$i_2 = 1,65\sin(400t-45^\circ)$
4	1	$L_1=10, R_3=6, C_4=1000, R_5=6$	$i_3 = 1,445\sin(500t-46,2^\circ)$
5	2	$L_1=2, R_3=8, C_4=250, R_5=8$	$u_1 = 4,472\sin(1000t+63,4^\circ)$
6	3	$L_1=40, R_3=4, C_4=5000, R_5=4$	$u_4 = 6,667\sin(100t-90^\circ)$
7	1	$R_1=2, L_3=25, C_4=1000, R_5=2$	$u_5 = 7,172\sin(200t+71^\circ)$
8	2	$R_1=5, L_3=5, C_4=625, R_5=5$	$e = 22\sin(400t)$
9	3	$R_1=3, L_3=10, C_4=500, R_5=3$	$i_1 = 4,1\sin(500t+27,2^\circ)$
10	1	$R_1=6, C_2=250, L_3=8, R_4=6, C_5=250$	$i_2 = 1,938\sin(1000t-63,4^\circ)$
11	2	$R_1=3, C_2=2500, L_3=50, R_4=3, C_5=2500$	$i_3 = 4,174\sin(100t-63,4^\circ)$
12	3	$R_1=6, C_2=1000, L_3=10, R_4=6, C_5=1000$	$u_3 = 9,864\sin(200t+99,5^\circ)$
13	1	$C_1=625, R_3=3, L_4=20, C_5=625$	$u_5 = 24\sin(400t-90^\circ)$
14	2	$C_1=1000, R_2=5, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$u_2 = 10,43\sin(500t+71^\circ)$
15	3	$C_1=1000, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$e = 32\sin(500t)$
16	1	$R_1=8, R_2=8, C_3=1250, R_4=8, L_5=60$	$i_1 = 0,741\sin(100t+14,5^\circ)$
17	2	$R_1=6, R_2=6, C_3=1250, R_4=6, L_5=15$	$i_2 = 1,468\sin(200t+49,8^\circ)$
18	3	$R_1=9, R_2=9, C_3=1250, R_4=9, L_5=12,5$	$i_3 = 0,2502\sin(400t-101,7^\circ)$
19	1	$C_1=400, R_2=6, L_3=20, R_4=6$	$u_3 = 11,56\sin(500t+43,7^\circ)$
20	2	$C_1=1000, R_2=5, L_3=60, R_4=5$	$u_1 = 42,96\sin(100t-141,7^\circ)$
21	3	$C_1=1000, R_2=1, L_3=30, R_4=1$	$u_2 = 5,286\sin(200t+77,3^\circ)$
22	1	$L_1=10, R_2=7, C_3=312,5, R_4=7$	$e = 30\sin(400t)$
23	2	$L_1=4, R_2=4, C_3=1000, R_4=4$	$i_1 = 12,25\sin(500t+35,8^\circ)$
24	3	$L_1=100, R_2=6, C_3=2500, R_4=6$	$i_2 = 5,153\sin(100t+50^\circ)$
25	1	$L_1=30, R_2=5, C_3=500, L_5=30$	$i_3 = 4,169\sin(200t-76,5^\circ)$
26	2	$L_1=12,5, R_2=3, C_3=625, L_5=12,5$	$u_1 = 62,1\sin(400t+168,7^\circ)$
27	3	$L_1=20, R_2=8, C_3=1000, L_5=20$	$u_3 = 11,68\sin(500t-171,8^\circ)$
28	1	$R_1=6, L_3=50, C_4=2500, C_5=2500$	$u_1 = 17,24\sin(100t-65,7^\circ)$
29	2	$R_1=4, L_3=40, C_4=500, C_5=500$	$e = 44\sin(200t)$
30	3	$R_1=7, L_3=10, C_4=1250, C_5=1250$	$i_1 = 23,18\sin(400t+29,7^\circ)$

**Таблица 3.2.2**

Вариант	Схема	Элементы ветвей $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	1	$R_1=6, C_2=250, L_3=8, R_4=6, C_5=250$	$i_3 = 2,15\sin(1000t+60,2^\circ)$
2	2	$R_1=3, C_2=2500, L_3=50, R_4=3, C_5=2500$	$u_3 = 41,74\sin(100t+26,6^\circ)$
3	3	$R_1=6, C_2=1000, L_3=10, R_4=6, C_5=1000$	$u_2 = 6,315\sin(200t+49^\circ)$
4	1	$C_1=625, R_3=3, L_4=20, C_5=625$	$u_3 = 24\sin(400t+90^\circ)$
5	2	$C_1=1000, R_2=5, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$e = 32\sin(500t)$
6	3	$C_1=1000, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$i_1 = 43,08\sin(500t-21,8^\circ)$
7	1	$R_1=8, R_2=8, C_3=1250, R_4=8, L_5=60$	$i_2 = 0,898\sin(100t+65,5^\circ)$
8	2	$R_1=6, R_2=6, C_3=1250, R_4=6, L_5=15$	$i_3 = 2,626\sin(200t+23,2^\circ)$
9	3	$R_1=9, R_2=9, C_3=1250, R_4=9, L_5=12,5$	$u_5 = 1,251\sin(400t-11,7^\circ)$
10	1	$C_1=400, R_2=6, L_3=20, R_4=6$	$u_1 = 11,24\sin(500t-77,3^\circ)$
11	2	$C_1=1000, R_2=5, L_3=60, R_4=5$	$u_2 = 7,595\sin(100t-6,69^\circ)$
12	3	$C_1=1000, R_2=1, L_3=30, R_4=1$	$e = 28\sin(200t)$
13	1	$L_1=10, R_2=7, C_3=312,5, R_4=7$	$i_1 = 2,733\sin(400t-2,77^\circ)$
14	2	$L_1=4, R_2=4, C_3=1000, R_4=4$	$i_2 = 5,942\sin(500t+21,8^\circ)$
15	3	$L_1=100, R_2=6, C_3=2500, R_4=6$	$i_3 = 1,767\sin(100t-99^\circ)$
16	1	$L_1=30, R_2=5, C_3=500, L_5=30$	$u_5 = 25,01\sin(200t+13,4^\circ)$
17	2	$L_1=12,5, R_2=3, C_3=625, L_5=12,5$	$u_3 = 103,7\sin(400t-11,3^\circ)$
18	3	$L_1=20, R_2=8, C_3=1000, L_5=20$	$u_2 = 7,295\sin(500t+137^\circ)$
19	1	$R_1=6, L_3=50, C_4=2500, C_5=2500$	$u_1 = 42\sin(100t)$
20	2	$R_1=4, L_3=40, C_4=500, C_5=500$	$i_1 = 5,372\sin(200t-62^\circ)$
21	3	$R_1=7, L_3=10, C_4=1250, C_5=1250$	$i_2 = 20,125\sin(400t)$
22	1	$C_1=10000, R_3=2, L_4=40, R_5=2$	$i_1 = 6,324\sin(100t+18,4^\circ)$
23	2	$C_1=2500, R_3=3, L_4=25, R_5=3$	$i_2 = 3,65\sin(200t+49,8^\circ)$
24	3	$C_1=312,5, R_3=4, L_4=10, R_5=4$	$i_1 = 0,8245\sin(400t+45^\circ)$
25	1	$L_1=10, R_3=6, C_4=1000, R_5=6$	$u_1 = 14,63\sin(500t+34,3^\circ)$
26	2	$L_1=2, R_3=8, C_4=250, R_5=8$	$u_4 = 2\sin(1000t)$
27	3	$L_1=40, R_3=4, C_4=5000, R_5=4$	$u_3 = 9,428\sin(100t+45^\circ)$
28	1	$R_1=2, L_3=25, C_4=1000, R_5=2$	$u_5 = 22\sin(200t)$
29	2	$R_1=5, L_3=5, C_4=625, R_5=5$	$i_1 = 7,18\sin(400t-21,8^\circ)$
30	3	$R_1=3, L_3=10, C_4=500, R_5=3$	$i_2 = 2,109\sin(500t-31,8^\circ)$

**Таблица 3.2.3**

Вариант	Схема	Элементы ветвей $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	1	$C_1=400, R_2=6, L_3=20, R_4=6$	$u_4 = 11,57\sin(500t+43,7^\circ)$
2	2	$C_1=1000, R_2=5, L_3=60, R_4=5$	$e = 26\sin(100t)$
3	3	$C_1=1000, R_2=1, L_3=30, R_4=1$	$i_1 = 1,245\sin(200t+32,3^\circ)$
4	1	$L_1=10, R_2=7, C_3=312,5, R_4=7$	$i_2 = 1,8\sin(400t+46^\circ)$
5	2	$L_1=4, R_2=4, C_3=1000, R_4=4$	$i_3 = 6,644\sin(500t+48,4^\circ)$
6	3	$L_1=100, R_2=6, C_3=2500, R_4=6$	$u_1 = 17,67\sin(100t-9^\circ)$
7	1	$L_1=30, R_2=5, C_3=500, L_5=30$	$u_3 = 25\sin(200t+13,4^\circ)$
8	2	$L_1=12,5, R_2=4, C_3=625, L_5=12,5$	$u_2 = 37,26\sin(400t+78,7^\circ)$
9	3	$L_1=20, R_2=8, C_3=1000, L_5=20$	$e = 40\sin(500t)$
10	1	$R_1=6, L_3=50, C_4=2500, C_5=2500$	$i_1 = 2,873\sin(100t-65,7^\circ)$
11	2	$R_1=4, L_3=40, C_4=500, C_5=500$	$i_2 = 5,2652\sin(200t-73,3^\circ)$
12	3	$R_1=7, L_3=10, C_4=1250, C_5=1250$	$i_3 = 11,5\sin(400t+90^\circ)$
13	1	$C_1=10000, R_3=2, L_4=40, R_5=2$	$i_2 = 5\sin(100t+36,87^\circ)$
14	2	$C_1=2500, R_3=3, L_4=25, R_5=3$	$i_3 = 1,247\sin(200t-99^\circ)$
15	3	$C_1=312,5, R_3=4, L_4=10, R_5=4$	$u_4 = 7,376\sin(400t+71,6^\circ)$
16	1	$L_1=10, R_3=6, C_4=1000, R_5=6$	$u_4 = 2,89\sin(500t-136^\circ)$
17	2	$L_1=2, R_3=8, C_4=250, R_5=8$	$u_3 = 16,48\sin(1000t-14,04^\circ)$
18	3	$L_1=40, R_3=4, C_4=5000, R_5=4$	$e = 20\sin(100t)$
19	1	$R_1=2, L_3=25, C_4=1000, R_5=2$	$i_1 = 1,434\sin(200t-19^\circ)$
20	2	$R_1=5, L_3=5, C_4=625, R_5=5$	$i_2 = 4,268\sin(400t-38,6^\circ)$
21	3	$R_1=3, L_3=10, C_4=500, R_5=3$	$i_3 = 3,515\sin(500t+58,2^\circ)$
22	1	$R_1=6, C_2=250, L_3=8, R_4=6, C_5=250$	$u_3 = 15,5\sin(1000t+26,6^\circ)$
23	2	$R_1=3, C_2=2500, L_3=50, R_4=3, C_5=2500$	$u_2 = 16,7\sin(100t-153^\circ)$
24	3	$R_1=6, C_2=1000, L_3=10, R_4=6, C_5=1000$	$u_1 = 7,5785\sin(200t+139^\circ)$
25	1	$C_1=625, R_3=3, L_4=20, C_5=625$	$e = 32\sin(400t)$
26	2	$C_1=1000, R_2=5, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$i_1 = 5,216\sin(500t-19^\circ)$
27	3	$C_1=1000, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$i_2 = 16\sin(500t-90^\circ)$
28	1	$R_1=8, R_2=8, C_3=1250, R_4=8, L_5=60$	$i_3 = 0,719\sin(100t-61,4^\circ)$
29	2	$R_1=6, R_2=6, C_3=1250, R_4=6, L_5=15$	$u_5 = 7,878\sin(200t+113^\circ)$
30	3	$R_1=9, R_2=9, C_3=1250, R_4=9, L_5=12,5$	$u_3 = 4,508\sin(400t-102^\circ)$

**Таблица 3.2.4**

Вариант	Схема	Элементы ветвей $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]	Заданная величина $i$ [А]; $e, u$ [В]
1	1	$R_2=2, L_3=25, C_4=1000, R_5=2$	$i_2 = 3,862\sin(200t-87,2^\circ)$
2	2	$R_2=5, L_3=5, C_4=625, R_5=5$	$i_3 = 3,333\sin(400t)$
3	3	$R_2=3, L_3=10, C_4=500, R_5=3$	$u_3 = 10,54\sin(500t+58,2^\circ)$
4	1	$R_1=6, C_2=250, L_3=8, R_4=6, C_5=250$	$u_2 = 7,748\sin(1000t-86,1^\circ)$
5	2	$R_1=3, C_2=2500, L_3=50, R_4=3, C_5=2500$	$u_1 = 12,52\sin(100t-63,4^\circ)$
6	3	$R_1=6, C_2=1000, L_3=10, R_4=6, C_5=1000$	$e = 30\sin(200t)$
7	1	$C_1=626, R_3=3, L_4=20, C_5=625$	$i_1 = 10\sin(400t+53,1^\circ)$
8	2	$C_1=1000, R_2=5, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$i_2 = 2,086\sin(500t+71^\circ)$
9	3	$C_1=1000, R_3=5, L_4=8, C_5=1000$	$i_3 = 40\sin(500t)$
10	1	$R_1=8, R_2=8, C_3=1250, R_4=8, L_5=60$	$u_5 = 4,31\sin(100t+28,6^\circ)$
11	2	$R_1=6, R_2=6, C_3=1250, R_4=6, L_5=15$	$u_3 = 5,87\sin(200t-40,8^\circ)$
12	3	$R_1=9, R_2=9, C_3=1250, R_4=9, L_5=12,5$	$u_1 = 2,252\sin(400t-101,7^\circ)$
13	1	$C_1=400, R_2=6, L_3=20, R_4=6$	$e = 24\sin(500t)$
14	2	$C_1=1000, R_2=5, L_3=60, R_4=5$	$i_1 = 4,296\sin(100t-51,7^\circ)$
15	3	$C_1=1000, R_2=1, L_3=30, R_4=1$	$i_2 = 4,492\sin(200t-91,4^\circ)$
16	1	$L_1=10, R_2=7, C_3=312,5, R_4=7$	$i_3 = 2,057\sin(400t-43,9^\circ)$
17	2	$L_1=4, R_2=4, C_3=1000, R_4=4$	$u_1 = 11,88\sin(500t+111,8^\circ)$
18	3	$L_1=100, R_2=6, C_3=2500, R_4=6$	$u_3 = 20,61\sin(100t-40^\circ)$
19	1	$L_1=30, R_2=5, C_3=500, L_5=30$	$u_2 = 8,335\sin(200t-76,6^\circ)$
20	2	$L_1=12,5, R_2=4, C_3=625, L_5=12,5$	$e = 38\sin(400t)$
21	3	$L_1=20, R_2=8, C_3=1000, L_5=20$	$i_1 = 5,158\sin(500t-88,1^\circ)$
22	1	$R_1=6, L_3=50, C_4=2500, C_5=2500$	$i_2 = 7,659\sin(100t-65,7^\circ)$
23	2	$R_1=4, L_3=40, C_4=500, C_5=500$	$i_2 = 1,053\sin(200t+16,7^\circ)$
24	3	$R_1=7, L_3=10, C_4=1250, C_5=1250$	$u_3 = 80,5\sin(400t+90^\circ)$
25	1	$C_1=10000, R_3=2, L_4=40, R_5=2$	$i_3 = 2.236\sin(100t-26,5^\circ)$
26	2	$C_1=2500, R_3=3, L_4=25, R_5=3$	$u_4 = 6,235\sin(200t-9^\circ)$
27	3	$C_1=312,5, R_3=4, L_4=10, R_5=4$	$u_1 = 6,596\sin(400t-45^\circ)$
28	1	$L_1=10, R_3=6, C_4=1000, R_5=6$	$u_4 = 9,14\sin(500t-64,6^\circ)$
29	2	$L_1=2, R_3=8, C_4=250, R_5=8$	$e = 18\sin(1000t)$
30	3	$L_1=40, R_3=4, C_4=5000, R_5=4$	$i_1 = 3,333\sin(100t)$

#### 4. Расчет электрических цепей несинусоидального периодического тока

##### *Методические рекомендации по выполнению задания*

В электрических цепях несинусоидальный ток может присутствовать в двух случаях: при действии источников несинусоидального напряжения или тока, а также вследствие нелинейности элементов электрической цепи.

##### **1. Способы представления несинусоидальных функций**

При расчете цепей несинусоидального переменного тока используется разложение периодических функций в одну из форм гармонического ряда Фурье. Если функция с периодом  $T$  представлена суммой *мгновенных значений гармонических колебаний* различных частот  $\omega_k = k\omega_1 = k2\pi/T$ , где  $k=1, 2, \dots$  порядковый номер гармоники,  $\omega_1$  - частота несинусоидального сигнала или частота основной (первой) гармоники, то ряд Фурье записывают в следующем виде

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [B_k \sin(k\omega_1 t) + C_k \cos(k\omega_1 t)] = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [A_{km} \sin(k\omega_1 t + \phi_k)],$$

где  $A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\omega t) dt$  – постоянная составляющая функции  $f(\omega t)$ , равная ее

среднему за период  $T$  значению;  $B_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\omega t) \sin(k\omega_1 t) dt = A_{km} \cos \phi_k$  и

$C_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\omega t) \cos(k\omega_1 t) dt = A_{km} \sin \phi_k$  – коэффициенты ряда Фурье, соответствующие амплитудам гармоник квадратурных составляющих;

$A_{km} = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}$  – амплитуда  $k$ -ой гармоники;

$\phi_k = \arctg(C_k / B_k)$  – начальная фаза  $k$ -ой гармоники.

Зависимости  $A_{km}$  и  $\phi_k$  от порядкового номера  $k$ -ой гармоники (или от ее частоты  $\omega_k = k\omega_1$ ) принято называть *амплитудным* и *фазовыми спектрами колебания* соответственно. Для периодических несинусоидальных колебаний амплитудный и фазовые спектры имеют дискретный характер, а расстояние по оси частот между смежными спектральными линиями равно  $\omega_1$ . Теоретически ряд Фурье содержит бесконечное число членов, однако в большинстве практических случаев этот ряд достаточно быстро сходится, и при расчетах можно ограничиться сравнительно небольшим числом гармоник.

Комплексным *коэффициентом передачи* электрической цепи называют отношение выходной величины (на нагрузке) к входной в комплексной форме записи. Если это отношение напряжений или токов, то частотные характеристики называют комплексными коэффициентами передачи по напряжению  $\underline{K}_u(j\omega) = \underline{U}_{вых}/\underline{U}_{вх}$ , и току  $\underline{K}_i(j\omega) = \underline{I}_{вых}/\underline{I}_{вх}$ . Последние соотношения представляют в виде двух функций частоты: их модуль называют *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ), их аргумент – *фазо-частотной характеристикой* (ФЧХ).

$$\underline{K}(j\omega) = |\underline{K}(j\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)}, \text{ где } |\underline{K}(j\omega)| - \text{АЧХ}$$

$$\theta(\omega) = \arg \underline{K}(j\omega) - \text{ФЧХ.}$$

## 2. Энергетические характеристики несинусоидального тока

При расчете энергетических характеристик в цепях несинусоидального периодического тока используют следующие величины:

- действующие значения напряжения  $U$  и тока  $I$ ;
- среднюю мощность  $P$ ;
- реактивную  $Q$  и полную  $S$  мощности.

Действующие значения напряжения и тока определяют как геометрическую сумму действующих значений отдельных гармоник

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum U_k^2};$$
$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2};$$

где  $U_k = U_{mk} / \sqrt{2}$  – действующее значение  $k$ -ой гармоники напряжения;

$I_k = I_{mk} / \sqrt{2}$  – действующее значение  $k$ -ой гармоники тока;

$U_0, I_0$  – постоянные составляющие напряжения и тока, соответственно.

Среднюю мощность несинусоидального тока определяют как сумму мощностей отдельных гармоник

$$P = P_0 + \sum P_k,$$

где  $P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$  – средняя мощность  $k$ -ой гармоники тока;  $P_0 = U_0 I_0$  – мощность постоянного тока.

По аналогии с синусоидальным током вводится понятие *реактивной мощности*  $Q = \sum Q_k$ , где  $Q_k = U_k I_k \sin \varphi_k$  – реактивная мощность  $k$ -ой гармоники;

Полную мощность несинусоидального тока определяют аналогично полной мощности синусоидального тока по формуле  $S = UI$ . В отличие от синусоидального тока полная мощность  $S$  оказывается больше геометрической суммы средней и реактивной мощностей

## 3. Расчет цепей несинусоидального переменного тока

- Сначала периодическое негармоническое воздействие представляют в виде суммы гармонических сигналов, используя ряд Фурье, и ограничивают его некоторым числом гармоник;
- затем выполняют расчет цепи для каждой отдельной гармоники напряжения или тока, учитывая при этом, что структура цепи сохраняется, а сопротивление и проводимости реактивных элементов изменяются с изменением частоты гармоники. Далее результирующую реакцию цепи находят при помощи метода наложения – путем сложения реакций для отдельных гармоник воздействия.
- Гармоники выходного сигнала также можно определить, анализируя АЧХ и ФЧХ электрической цепи на соответствующей частоте.

В таблице 4. приведены некоторые типовые функции и их разложения в ряд Фурье. Графики этих функций приведены на рис. 4.1. При этом приняты следующие обозначения:  $x = \omega_1 t$ ;  $\omega_1 = 2\pi/T$ ,  $F_M$  – амплитудное значение несинусоидального сигнала.

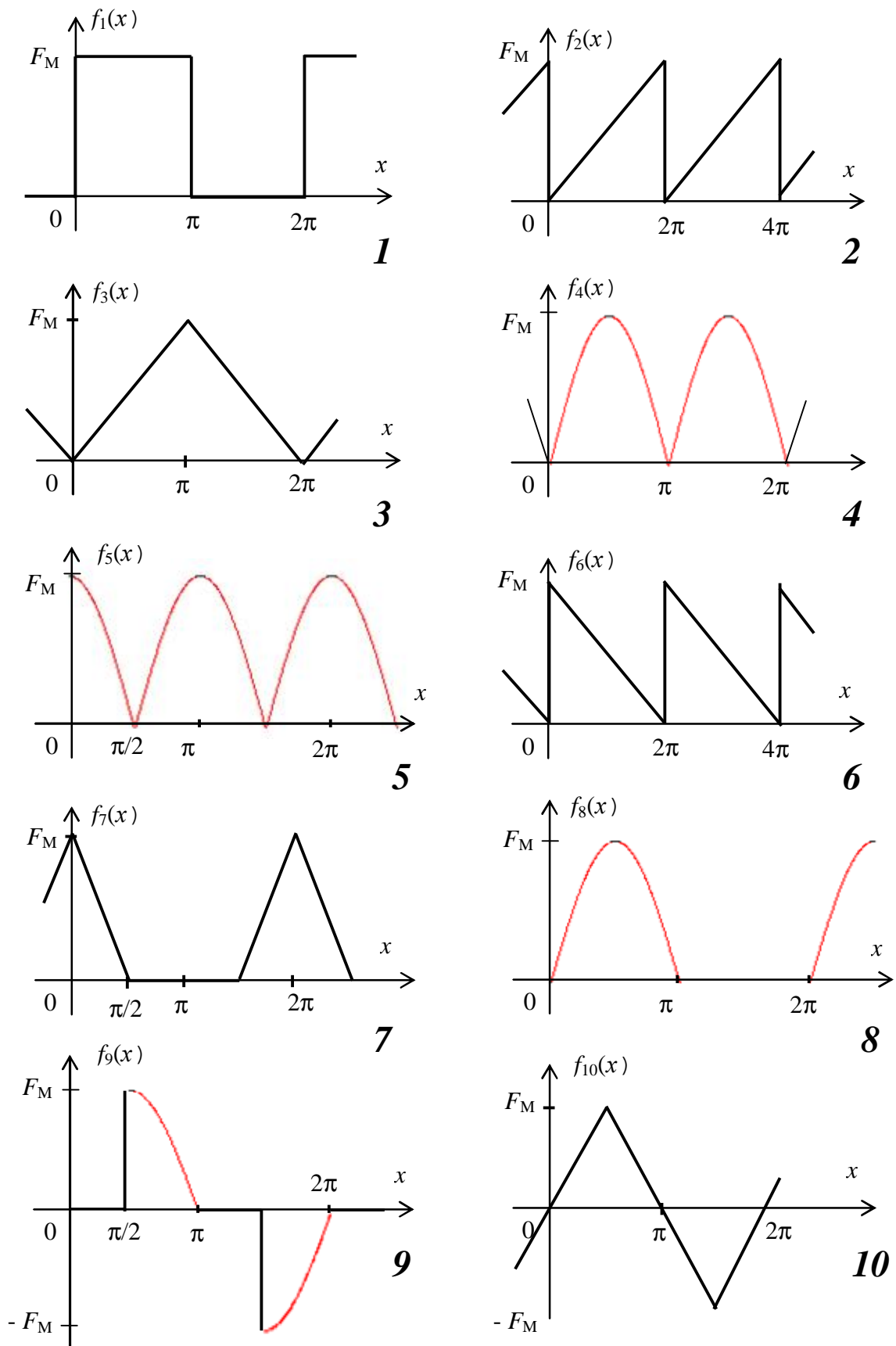


Рис. 4.1. Графики типовых несинусоидальных функций



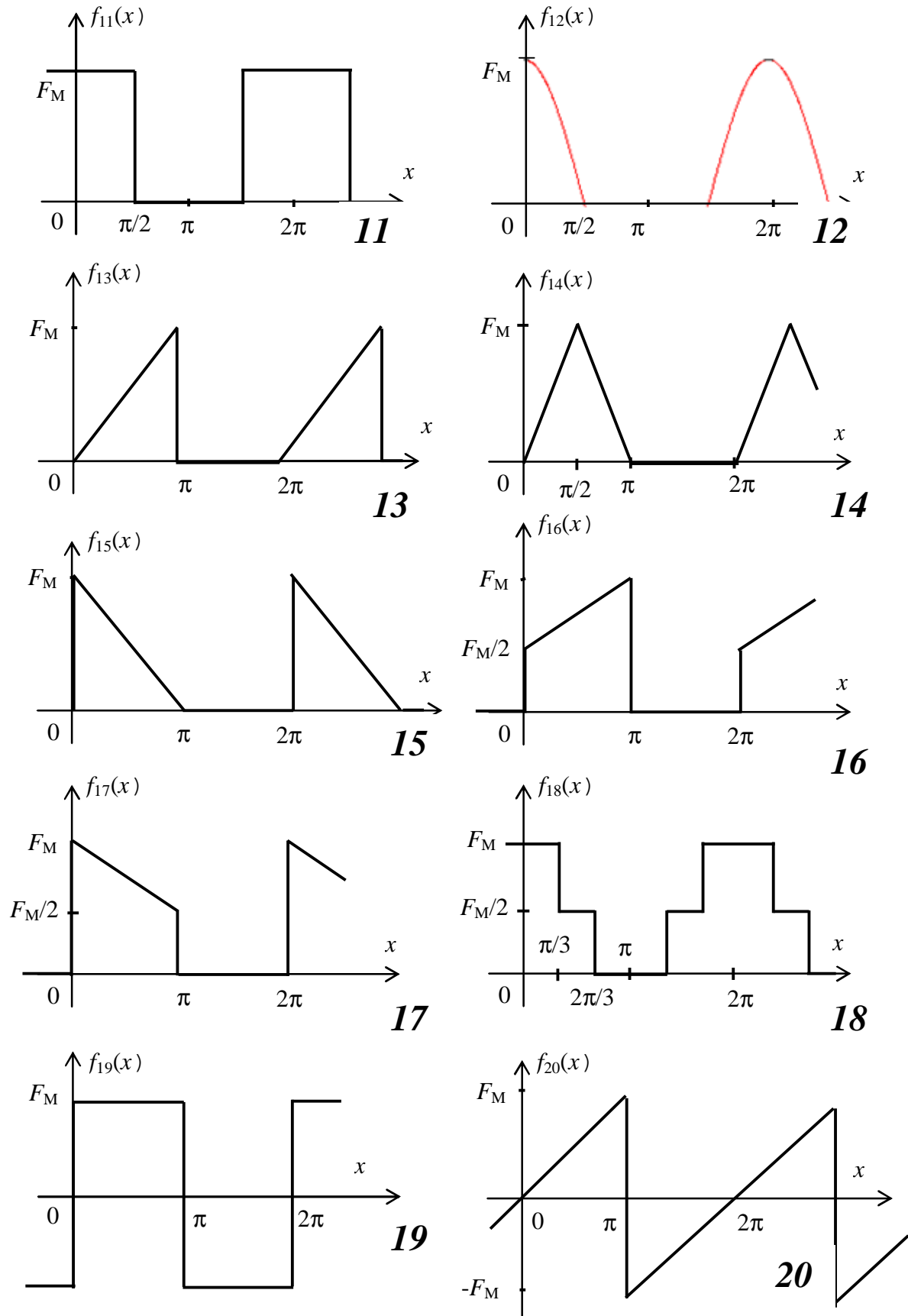
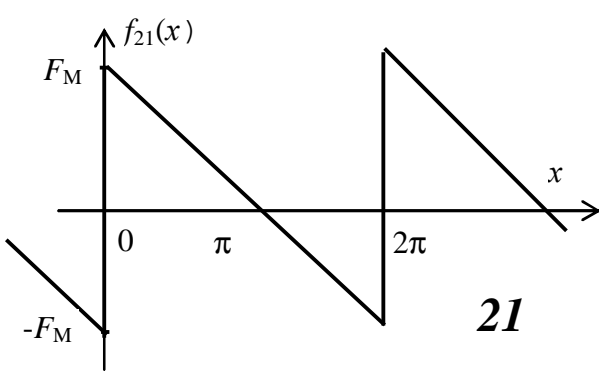
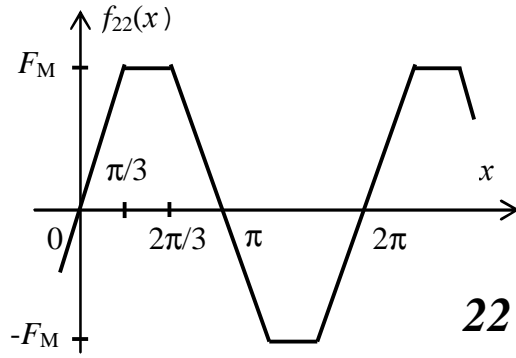


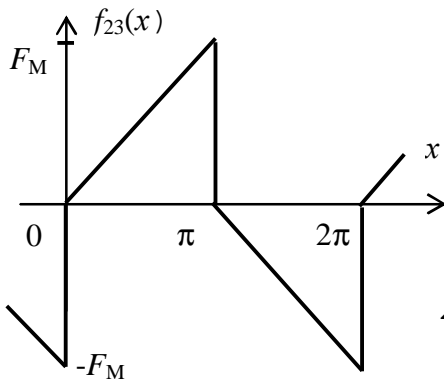
Рис. 4.1. Графики типовых несинусоидальных функций (продолжение)



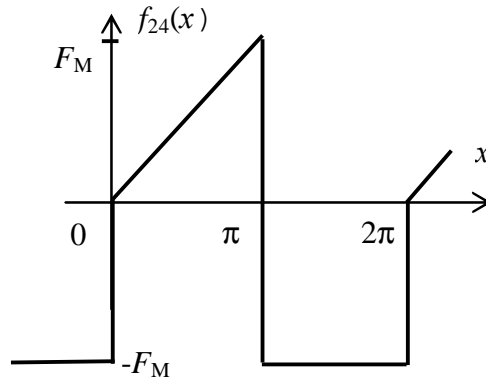
**21**



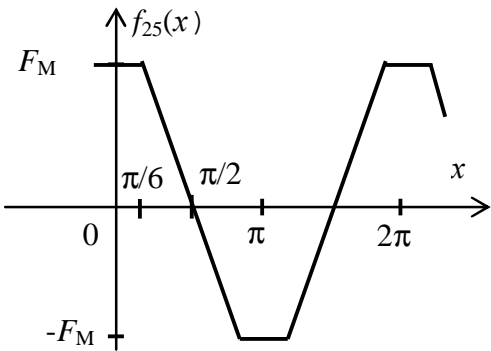
**22**



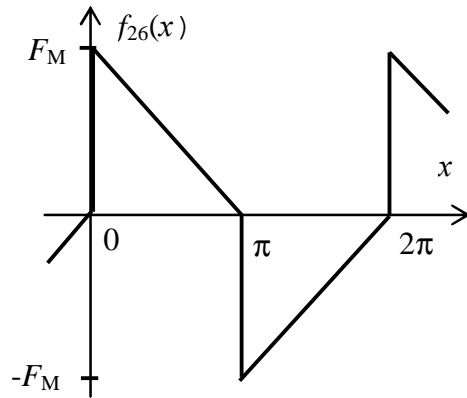
**23**



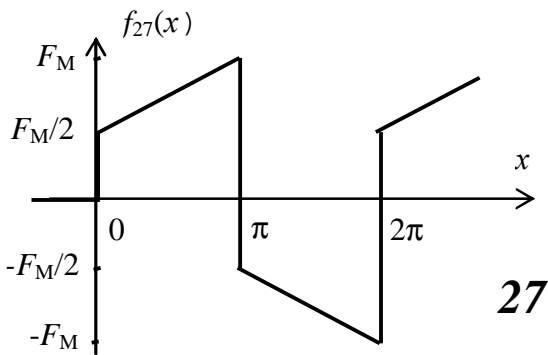
**24**



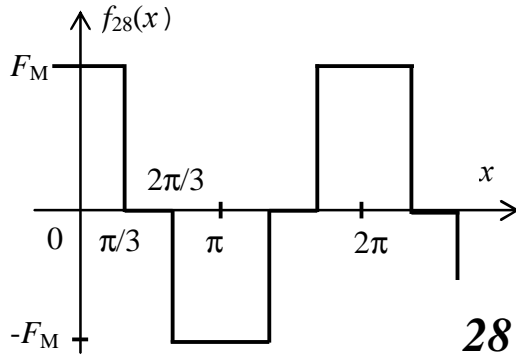
**25**



**26**



**27**



**28**

Рис. 4.1. Графики типовых несинусоидальных функций (окончание)

Таблица 4. Ряды Фурье для несинусоидальных функций (см. рис. 4.1 \*)

№ графика функции	Разложение функции $f(x)$ в ряд Фурье
1	2
1	$f_1(x) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{2F_M}{\pi} \left( \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right)$
2	$f_2(x) \approx \frac{F_M}{2} - \frac{F_M}{p} \left( \sin x + \frac{1}{2} \sin 2x + \frac{1}{3} \sin 3x + \dots \right)$
3	$f_3(x) \approx \frac{F_M}{2} - \frac{4F_M}{p^2} \left( \cos x + \frac{1}{9} \cos 3x + \frac{1}{25} \cos 5x + \dots \right)$
4	$f_4(x) \approx \frac{2F_M}{p} - \frac{4F_M}{p} \left( \frac{1}{3} \cos 2x + \frac{1}{15} \cos 4x + \frac{1}{35} \cos 6x + \dots \right)$
5	$f_5(x) \approx \frac{2F_M}{p} + \frac{4F_M}{p} \left( \frac{1}{3} \cos 2x - \frac{1}{15} \cos 4x + \frac{1}{35} \cos 6x - \dots \right)$
6	$f_6(x) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{F_M}{p} \left( \sin x + \frac{1}{2} \sin 2x + \frac{1}{3} \sin 3x + \dots \right)$
7	$f_7(x) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{4F_M}{p^2} \left( \cos x + \frac{1}{2} \cos 2x + \frac{1}{9} \cos 3x + \frac{1}{25} \cos 5x + \dots \right)$
8	$f_8(x) \approx \frac{F_M}{p} + 2F_M \left( \frac{1}{4} \sin x - \frac{1}{3p} \cos 2x - \frac{1}{15p} \cos 4x - \dots \right)$
9	$f_9(x) \approx \frac{F_M}{p} \left[ \sqrt{\frac{p^2}{4} + 1} \cdot \sin(x - 32,5^\circ) + \sin(3x + 90^\circ) + \frac{1}{3} \sin(5x - 90^\circ) + \right.$ $\left. + \frac{1}{3} \sin(7x + 90^\circ) + \frac{1}{5} \sin(9x - 90^\circ) + \frac{1}{5} \sin(11x + 90^\circ) + \right.$ $\left. + \frac{1}{7} \sin(13x - 90^\circ) + \mathbf{K} \right]$

\* В таблице приведено разложение в ряд Фурье типовых функций, графики которых приведены на рисунке. При этом приняты следующие обозначения:  $x = \omega_1 t$ ;  $\omega_1 = 2\pi/T$ ,  $F_M$  – амплитудное значение несинусоидального сигнала.

1	2
10	$f_{10}(x) \approx \frac{8F_M}{p^2} \left( \sin x - \frac{1}{9} \sin 3x + \frac{1}{25} \sin 5x - \dots \right)$
11	$f_{11}(x) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{2F_M}{p} \left( \cos x - \frac{1}{3} \cos 3x + \frac{1}{5} \cos 5x - \dots \right)$
12	$f_{12}(x) \approx \frac{F_M}{p} + 2F_M \left( \frac{1}{4} \cos x + \frac{1}{3p} \cos 2x - \frac{1}{15p} \cos 4x + \dots \right)$
13	$f_{13}(x) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x - 32,5^\circ)}{0,843} - \frac{\sin(2x)}{2} + \frac{\sin(3x)}{3} - \frac{\sin(4x)}{4} + \frac{\sin(5x)}{5} - \right]$
14	$f_{14}(x) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{4F_M}{p^2} \left( \sin x - \frac{1}{2} \cos 2x - \frac{1}{9} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x \dots \right)$
15	$f_{15}(x) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x + 32,5^\circ)}{0,843} + \frac{\sin(2x)}{2} + \frac{\sin(3x)}{3} + \frac{\sin(4x)}{4} + \frac{\sin(5x)}{5} - \right]$
16	$f_{16}(x) \approx \frac{3F_M}{8} + \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x - 12^\circ)}{0,653} - \frac{\sin(2x)}{4} + \frac{\sin(3x)}{2} - \frac{\sin(4x)}{8} + \frac{\sin(5x)}{3,33} - \right]$
17	$f_{17}(x) \approx \frac{3F_M}{8} + \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x + 12^\circ)}{0,653} + \frac{\sin(2x)}{4} + \frac{\sin(3x)}{2} + \frac{\sin(4x)}{8} + \frac{\sin(5x)}{3,33} - \right]$
18	$f_{18}(x) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{\sqrt{3}F_M}{p} \left( \cos x - \frac{1}{5} \cos 5x + \frac{1}{7} \cos 7x - \dots \right)$
19	$f_{19}(x) \approx \frac{4F_M}{p} \left( \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right)$
20	$f_{20}(x) \approx \frac{2F_M}{p} \left( \sin x - \frac{1}{2} \sin 2x + \frac{1}{3} \sin 3x + \dots \right)$
21	$f_{21}(x) \approx \frac{2F_M}{p} \left( \sin x + \frac{1}{2} \sin 2x + \frac{1}{3} \sin 3x + \dots \right)$
22	$f_{22}(x) \approx \frac{6\sqrt{3} \cdot F_M}{p^2} \left( \sin x - \frac{1}{25} \sin 5x + \frac{1}{49} \sin 7x - \frac{1}{121} \sin 11x + \dots \right)$
23	$f_{23}(x) \approx \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x - 32,5^\circ)}{0,422} + \frac{\sin(3x)}{1,5} + \frac{\sin(5x)}{2,5} + \frac{\sin(7x)}{3,5} + \dots \right]$

1	2
24	$f_{24}(x) \approx \frac{-F_M}{4} + \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x-12^\circ)}{0,326} - \frac{\sin(2x)}{2} + \frac{\sin(3x)}{1} - \frac{\sin(4x)}{4} + \frac{\sin(5x)}{1,67} - \dots \right]$
25	$f_{25}(x) \approx \frac{6\sqrt{3} \cdot F_M}{p^2} \left( \cos x - \frac{1}{25} \cos 5x - \frac{1}{49} \cos 7x + \frac{1}{121} \cos 11x + \dots \right)$
26	$f_{26}(x) \approx \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x+32,5^\circ)}{0,422} + \frac{\sin(3x)}{1,5} + \frac{\sin(5x)}{2,5} + \frac{\sin(7x)}{3,5} + \dots \right]$
27	$f_{27}(x) \approx \frac{F_M}{p} \left[ \frac{\sin(x-12^\circ)}{0,326} + \frac{\sin(3x)}{1} + \frac{\sin(5x)}{1,67} - \frac{\sin(7x)}{2,33} + \dots \right]$
28	$f_{28}(x) \approx \frac{2\sqrt{3}F_M}{p} \left( \cos x - \frac{1}{5} \cos 5x + \frac{1}{7} \cos 7x - \dots \right)$

Следует помнить, что для расчетов данные функции нужно привести к виду:

$$f(x) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_1) + \mathbf{K} + A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) + \mathbf{K}$$

Приведение осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} -\sin(\omega t + \psi) &= \sin(\omega t + \psi \pm \pi); \\ \cos(\omega t + \psi) &= \sin(\omega t + \psi + \pi/2); \\ -\cos(\omega t + \psi) &= \sin(\omega t + \psi - \pi/2). \end{aligned}$$

## ЗАДАЧА 4

Дано: К электрической цепи, схема которой приводится ниже, приложено несинусоидальное периодическое напряжение, форма которого также показана. Параметры цепи имеют следующие значения:  $R_2 = R_H = 10$  [Ом];  $L_1 = L_3 = 0,1$  [Гн];  $C_2 = 100$  [мкФ];  $E_M = F_M = 100$  [В];  $\omega_1 = 100$  [рад/с].

Требуется выполнить следующие операции:

- 1) представить напряжение источника  $f(x)=e(\omega t)$  рядом Фурье, ограничив число членов ряда постоянной составляющей и тремя первыми гармониками.
- 2) построить графики спектров амплитуд и начальных фаз источника.
- 3) определить выходной сигнал – напряжение на нагрузке  $u_H(t)$ , используя метод расчета по комплексным значениям.
- 4) построить графики спектральных составляющих для напряжения на нагрузке.
- 5) определить действующее значение напряжения на нагрузке и мощность, рассеиваемую в ней.
- 6) провести расчет гармоник напряжения  $u_H(t)$  на нагрузке, используя коэффициент передачи по напряжению. Параметры входного, выходного сигналов и передачи цепи свести в таблицу. Построить АЧХ и ФЧХ, а также графики входного сигнала и сигнала на нагрузке.

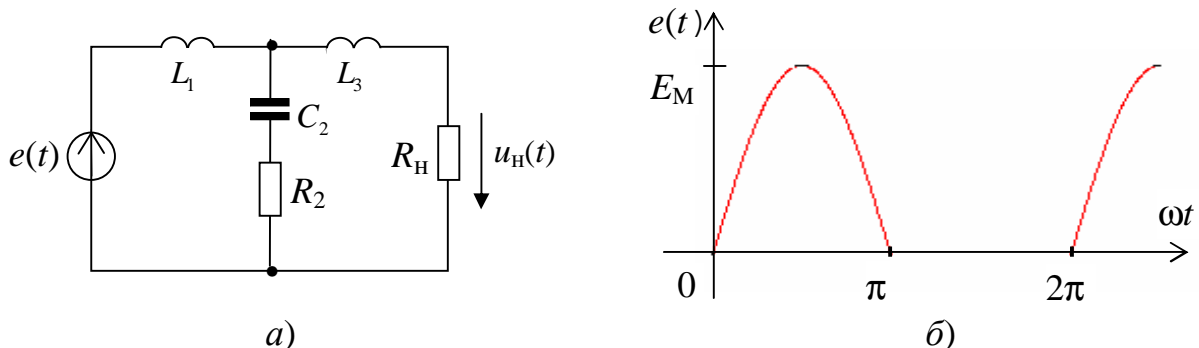


Рис. 4.2. Схема цепи (а) и форма входного напряжения (б) к примеру

### Решение

1. Воспользуемся данными табл. 4 и представим напряжение источника (функция  $f_8(x)$ ) в виде ряда Фурье, ограниченного постоянной составляющей и тремя первыми гармониками

$$\begin{aligned}
 e(t) &= E_0 + e_1(t) + e_2(t) + e_4(t) = \frac{F_M}{p} + 2F_M \left( \frac{1}{4} \sin \omega_1 t - \frac{1}{3p} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{15p} \cos 4\omega_1 t \right) = \\
 &= E_0 + E_{m1} \sin \omega_1 t - E_{m2} \cos 2\omega_1 t - E_{m4} \cos 4\omega_1 t = \\
 &= 31,8 + 50 \sin 100t - 21,2 \cos 200t - 4,2 \cos 400t = \\
 &= 31,8 + 50 \sin 100t + 21,2 \sin(200t - 90^\circ) + 4,2 \sin(400t - 90^\circ) \text{ [В]}
 \end{aligned}$$

2. Построенные графики спектров амплитуд и начальных фаз напряжения источника изображены на рис. 4.3 а, б.

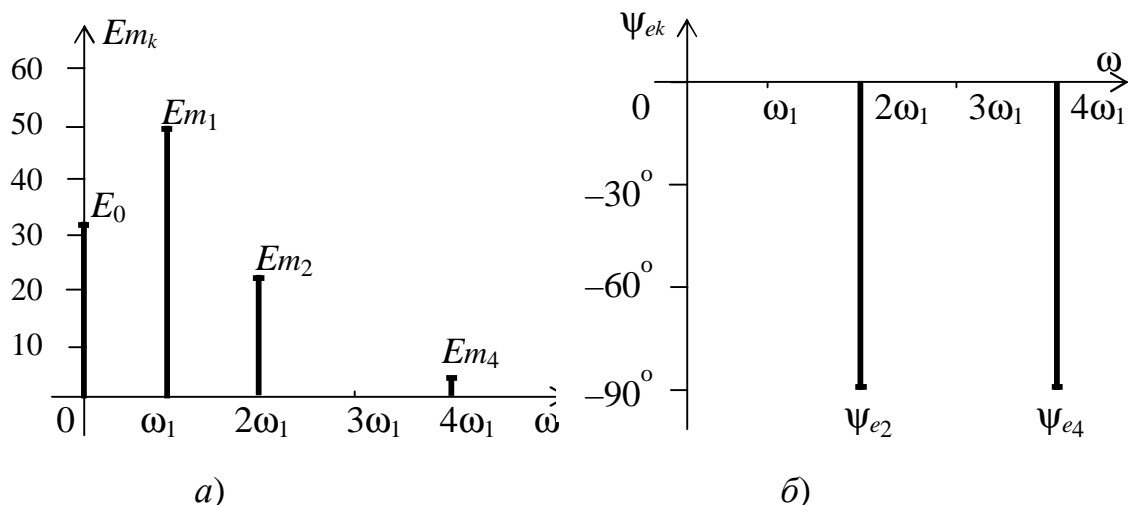


Рис. 4.3. Спектры амплитуд (а) и фаз (б) входного сигнала к примеру

3. Теперь выполним расчет напряжения на нагрузке, используя для этого метод комплексных амплитуд.

Расчет постоянной составляющей напряжения на нагрузке проводится с учетом того, что на постоянном токе все индуктивности  $L$  заменяются перемычками, а емкости  $C$  – разрывами цепи, как показано на рисунке 4.4, а. Используя законы Кирхгофа и Ома, получим

$$U_{H0} = E_0 = 31,8 \text{ [В]}.$$

$$I_{H0} = U_{H0} / R_H = 31,8 / 10 = 3,18 \text{ [А]}.$$

При расчете остальных гармоник напряжения  $u_H(t)$  воспользуемся схемой замещения, приведенной на рис 4.4 б. На этой схеме все элементы цепи заменены их комплексными сопротивлениями, которые имеют двойные индексы. Первый индекс соответствует порядковому номеру ветви, а второй – номеру гармоники ( $k=1,2,\dots$ ).

Комплексные значения токов найдем с учетом того, что общий ток  $I_{1k}$  делится в ветвях схемы на два тока, которые обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей

$$\underline{I}_{1k} = \underline{E}_k / \underline{Z}_{\Sigma k},$$

$$\underline{I}_{2k} = \underline{I}_{1k} (\underline{Z}_{3k} + R_H) / (\underline{Z}_{2k} + \underline{Z}_{3k} + R_H),$$

$$\underline{I}_{Hk} = \underline{I}_{1k} \underline{Z}_{2k} / (\underline{Z}_{2k} + \underline{Z}_{3k} + R_H),$$

где  $\underline{Z}_{\Sigma k} = \underline{Z}_{1k} + \underline{Z}_{2k} (\underline{Z}_{3k} + R_H) / (\underline{Z}_{2k} + \underline{Z}_{3k} + R_H)$  – эквивалентное комплексное сопротивление всей цепи для  $k$ -ой гармоники напряжения источника, найденное через сопротивления отдельных ветвей  $\underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_{3k} = jX_{1k} = j\omega_k L_1 = jk\omega_1 L_1$ ;  $\underline{Z}_{2k} = R_2 - jX_{2k} = R_2 - j/(\omega_k C_2) = R_2 - j/(k\omega_1 C_2)$ .

Комплексное значение напряжения на нагрузке определим по закону Ома

$$\underline{U}_{Hk} = \underline{I}_{Hk} R_H.$$

С учетом выраженных ранее токов, окончательно получаем

$$\underline{U}_{Hk} = \underline{I}_{Hk} R_H = \underline{E}_k \underline{Z}_{2k} R_H / [\underline{Z}_{1k} (\underline{Z}_{2k} + \underline{Z}_{3k} + R_H) + \underline{Z}_{2k} (\underline{Z}_{3k} + R_H)].$$

Тогда комплексная величина *коэффициента передачи по напряжению* в функции частоты  $\omega = k\omega_1$  равна

$$\underline{K}_u(j\omega) = \underline{U}_{\text{Hк}} / \underline{E}_k = \underline{Z}_{2k} R_{\text{H}} / [\underline{Z}_{1k} (\underline{Z}_{2k} + \underline{Z}_{3k} + R_{\text{H}}) + \underline{Z}_{2k} (\underline{Z}_{3k} + R_{\text{H}})].$$

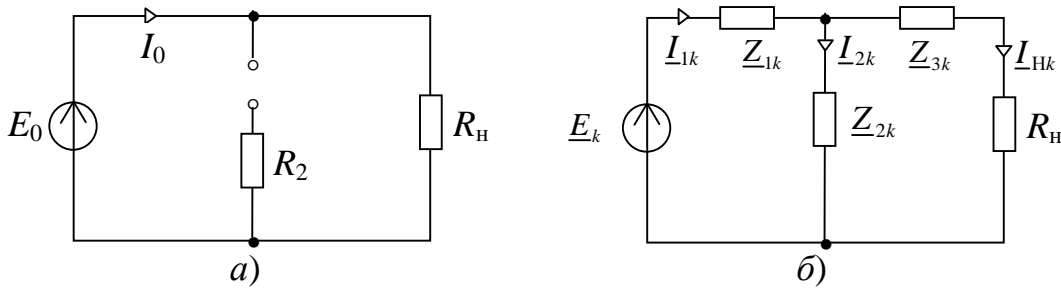


Рис. 4.4. Схемы для расчета постоянной (а) и переменных (б) составляющих напряжения на нагрузке

Первую гармонику напряжения на нагрузке определим, используя в схеме замещения рис. 4.4 б сопротивления цепи и напряжение источника для первой гармоники

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{31} = jX_{11} = j\omega_1 L_1 = j10 [\text{Ом}]; \quad \underline{Z}_{21} = R_2 - jX_{21} = (10 - j100) [\text{Ом}];$$

$$\underline{Z}_{\text{Э1}} = \underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21} (\underline{Z}_{31} + R_{\text{H}}) / (\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{31} + R_{\text{H}}) = 23e^{j58^\circ} [\text{Ом}]; \quad \underline{E}_{m1} = 50 [\text{В}].$$

Комплексная амплитуда тока первой гармоники источника имеет значение

$$\underline{I}_{m11} = \underline{E}_{m1} / \underline{Z}_{\text{Э1}} = 50 / 23e^{j58^\circ} = 2,175e^{-j58^\circ} [\text{А}]$$

Этот ток делится обратно пропорционально сопротивлениям параллельно включенных ветвей  $\underline{Z}_{2k}$  и  $(\underline{Z}_{3k} + R_{\text{H}})$ , поэтому ток в нагрузке

$$\underline{I}_{m\text{H1}} = \underline{I}_{m11} \underline{Z}_{21} / (\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{31} + R_{\text{H}}) = 2,175e^{-j58^\circ} (10 - j100) / (20 - j90) = 2,37e^{-j65^\circ} [\text{А}]$$

Комплексное значение напряжения на нагрузке определим по закону Ома

$$\underline{U}_{m\text{H1}} = \underline{I}_{m\text{H1}} R_{\text{H}} = 23,7e^{-j65^\circ} [\text{В}]$$

Полученное значение позволяет записать мгновенное значение первой гармоники напряжения на нагрузке

$$u_{\text{H1}}(t) = 23,7 \sin(100t - 65^\circ) [\text{В}]$$

Для второй гармоники напряжения получаем

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{32} = 2j\omega_1 L_1 = j20 [\text{Ом}]; \quad \underline{Z}_{22} = R_2 - j/(2\omega_1 C_2) = (10 - j50) [\text{Ом}];$$

$$\underline{Z}_{\text{Э2}} = \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22} (\underline{Z}_{32} + R_{\text{H}}) / (\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{32} + R_{\text{H}}) = 47,4e^{j60^\circ} [\text{Ом}]; \quad \underline{E}_{m2} = 21,2e^{-j90^\circ} [\text{В}].$$

Значение комплексной амплитуды тока второй гармоники в цепи источника напряжения найдем по закону Ома

$$\underline{I}_{m12} = \underline{E}_{m2} / \underline{Z}_{\text{Э2}} = 21,2e^{-j90^\circ} / 47,4e^{j60^\circ} = 0,45e^{-j150^\circ} [\text{А}]$$

Комплексную амплитуду тока второй гармоники в нагрузке  $R_{\text{H}}$  найдем аналогично току первой гармоники путем деления тока источника обратно пропорционально сопротивлениям параллельно включенных ветвей

$$\underline{I}_{m\text{H2}} = \underline{I}_{m12} \underline{Z}_{22} / (\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{32} + R_{\text{H}}) = 0,45e^{-j150^\circ} (10 - j50) / (20 - j30) = 0,635e^{-j172^\circ} [\text{А}]$$

Комплексное значение напряжения второй гармоники на нагрузке найдем с помощью закона Ома



$$\underline{U}_{mH2} = \underline{I}_{mH2} R_H = 6,35e^{-j172^\circ} \text{ [В]}$$

Полученное значение позволяет записать мгновенное значение второй гармоники напряжения на нагрузке

$$u_{H2}(t) = 6,35 \sin(200t - 172^\circ) \text{ [В]}$$

Определение напряжения *четвертой гармоники* выполним аналогично расчету напряжения второй гармоники. Сопротивления цепи и напряжение источника для четвертой гармоники имеют значения

$$\underline{Z}_{14} = \underline{Z}_{34} = 4j\omega_1 L_1 = j20 \text{ [Ом]}; \underline{Z}_{24} = R_2 - j/(4\omega_1 C_2) = (10 - j25) \text{ [Ом]};$$

$$\underline{Z}_{\Sigma 4} = \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{24} (\underline{Z}_{34} + R_H) / (\underline{Z}_{24} + \underline{Z}_{34} + R_H) = 43e^{j25^\circ} \text{ [Ом]}, \underline{E}_{m4} = 4,2e^{-j90^\circ} \text{ В.}$$

Комплексную амплитуду тока четвертой гармоники определим по закону Ома

$$\underline{I}_{m14} = \underline{E}_{m4} / \underline{Z}_{\Sigma 4} = 4,2e^{-j90^\circ} / 43e^{j25^\circ} = 0,098e^{-j115^\circ} \text{ [А]}$$

Используя ток четвертой гармоники в ветви с источником напряжения, рассчитаем ток в нагрузке

$$\underline{I}_{mH4} = \underline{I}_{m14} \underline{Z}_{24} / (\underline{Z}_{24} + \underline{Z}_{34} + R_H) = 0,105e^{-j220^\circ} \text{ [А]}$$

Комплексное значение четвертой гармоники напряжения на нагрузке определим по закону Ома

$$\underline{U}_{mH4} = \underline{I}_{mH4} R_H = 1,05e^{-j220^\circ} \text{ [В]}$$

Мгновенное значение второй гармоники напряжения на нагрузке определим по формуле

$$u_{H4}(t) = 1,05 \sin(400t - 220^\circ) \text{ [В]}$$

Результирующее напряжение на нагрузке найдем путем суммирования отдельных составляющих, рассчитанных выше

$$u_H(t) = U_{H0} + u_{H1}(t) + u_{H2}(t) + u_{H4}(t) =$$

$$= 31,8 + 23,7 \sin(100t - 65^\circ) + 6,35 \sin(200t - 172^\circ) + 1,05 \sin(400t - 220^\circ) \text{ [В]}$$

**4.** Построим графики спектральных составляющих напряжения на нагрузке, используя полученное выше мгновенное значение напряжения.

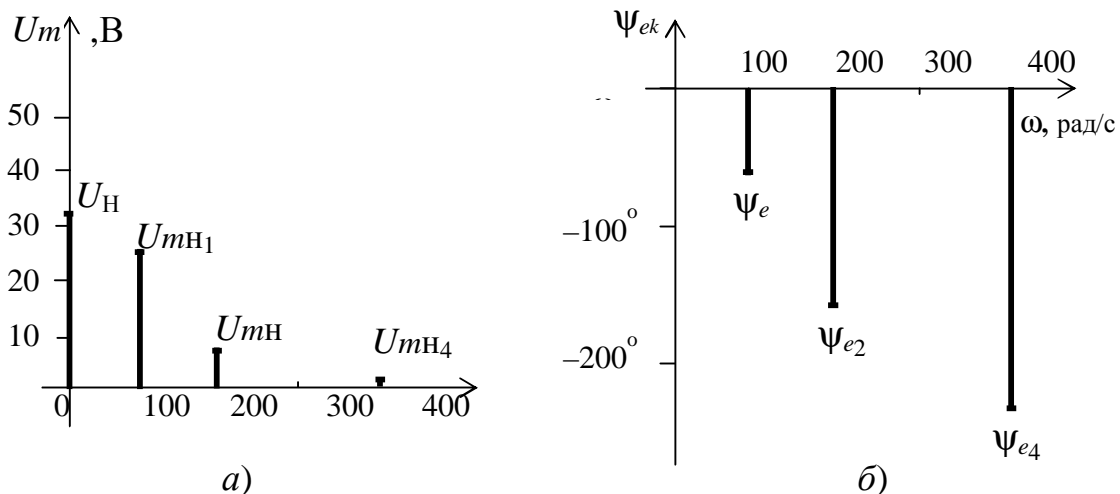


Рис. 4.5. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектры напряжения на нагрузке

Эти графики показывают, что электрическая цепь, включенная между источником и нагрузкой, оказывает определенное сглаживающее действие: амплитуды спектральных составляющих уменьшаются по мере увеличения частоты. Кроме этого, заметно существенное запаздывание сигнала по отношению к напряжению источника.

**5.** Определим действующее значение напряжения на нагрузке и среднюю мощность, рассеиваемую в ней. Действующее напряжение на нагрузке можно рассчитать по формуле:

$$U_H = \sqrt{U_{H0}^2 + U_{H1}^2 + U_{H2}^2 + U_{H4}^2} = \sqrt{31,80^2 + 16,77^2 + 4,49^2 + 0,75^2} = 36,24 \text{ [В]},$$

где  $U_{H0} = 31,80$  [В] – постоянная составляющая напряжения на нагрузке;

$U_{H1} = U_{mH1} / \sqrt{2} = 16,77$  [В] – действующее значение напряжения первой гармоники;

$U_{H2} = U_{mH2} / \sqrt{2} = 4,49$  [В] – действующее значение напряжения второй гармоники;

$U_{H4} = U_{mH4} / \sqrt{2} = 0,75$  [В] – действующее значение напряжения четвертой гармоники.

Средняя мощность несинусоидального тока определяется по формуле:

$$P_H = P_{H0} + P_{H1} + P_{H2} + P_{H4} = 101 + 28,12 + 2,02 + 0,06 = 131,2 \text{ [Вт]},$$

где  $P_{H0} = I_{H0}^2 R_H = 3,18^2 \cdot 10 = 101$  [Вт] – мощность постоянной составляющей тока;

$P_{H1} = I_{H1}^2 R_H = 28,12$  [Вт] – средняя мощность первой гармоники тока;

$P_{H2} = I_{H2}^2 R_H = 2,02$  [Вт] – средняя мощность второй гармоники тока;

$P_{H4} = I_{H4}^2 R_H = 0,06$  [Вт] – средняя мощность четвертой гармоники тока.

Из полученных выражений следует, что средняя мощность почти полностью определяется постоянной составляющей и первой гармоникой тока. Вклад высших гармоник весьма незначителен и составляет всего 1,6% от полной мощности, рассеиваемой в нагрузке.

**6.** Отдельные гармоники напряжения на нагрузке  $u_H(t)$  могут быть также определены, используя коэффициент передачи по напряжению  $\underline{K}_u(j\omega)$ , найденный нами ранее. При подстановке в него значений сопротивлений отдельных ветвей получим

$$\underline{K}_u(j\omega) = \frac{(R_2 - j/(k\omega_1 C_2))R_H}{jk\omega_1 L_1 ((R_2 - j/(k\omega_1 C_2)) + jk\omega_1 L_3 + R_H) + (R_2 - j/(k\omega_1 C_2))(jk\omega_1 L_3 + R_H)}.$$

По данному выражению, задавшись изменением  $k$ , построим АЧХ и ФЧХ. Для этого воспользуемся любым математическим пакетом (*MathCAD*, *Mathematica* и т.п.)

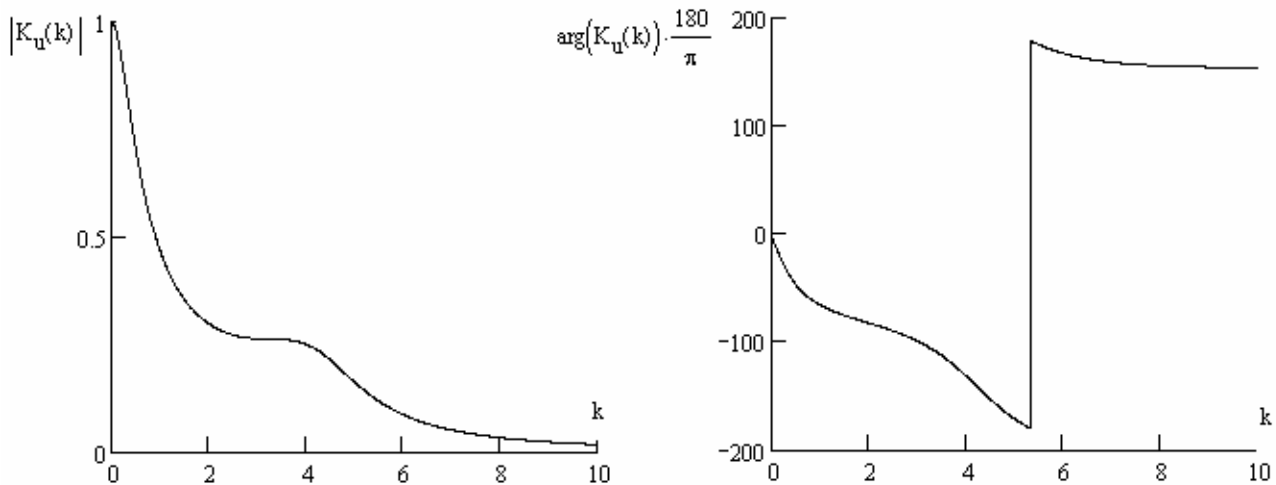


Рис. 4.6. АЧХ и ФЧХ электрической цепи

Определяем значения модуля и аргумента передачи  $\underline{K}_u(j\omega_k)$  на частотах составляющих:  $k = 1, 2, 4$ ;  $\omega_k = \omega_1, 2 \cdot \omega_1, 4 \cdot \omega_1$ , где  $\omega_1 = 100$  [1/с]. А далее, используя информацию о гармонических составляющих входного сигнала

$$e(t) = 31,8 + 50\sin 100t + 21,2\sin(200t - 90^\circ) + 4,2\sin(400t - 90^\circ) \text{ [В]}$$

рассчитываем параметры составляющих напряжения на нагрузке цепи  $U_{mHk} = |K_u(k)| \cdot E_{mk}$ ,  $\psi_{Hk} = \psi_{ek} + \arg(K_u(k))$  и помещаем результат в приведенную ниже таблицу.

Таблица к задаче 4

κ	На входе цепи			Передача цепи		На выходе цепи	
	$\omega_k$ [1/с]	$E_{mk}$ [В]	$\psi_{ek}$ [°]	$ K_u(k) $	$\arg(K_u(k))$ [°]	$U_{mHk}$ [В]	$\psi_{Hk}$ [°]
1	100	50	0	0,474	-65	23,7	-65
2	200	21,2	-90	0,299	-82	6,35	-172
4	400	4,2	-90	0,25	-130	1,05	-220

Окончательно для напряжения на нагрузке  $u_H(t)$  получаем

$$u_H(t) = 31,8 + 23,7\sin(100t - 65^\circ) + 6,35\sin(200t - 172^\circ) + 1,05\sin(400t - 220^\circ) \text{ [В]}$$

Представим графически ЭДС источника  $e(t)$  и напряжения нагрузки  $u_H(t)$

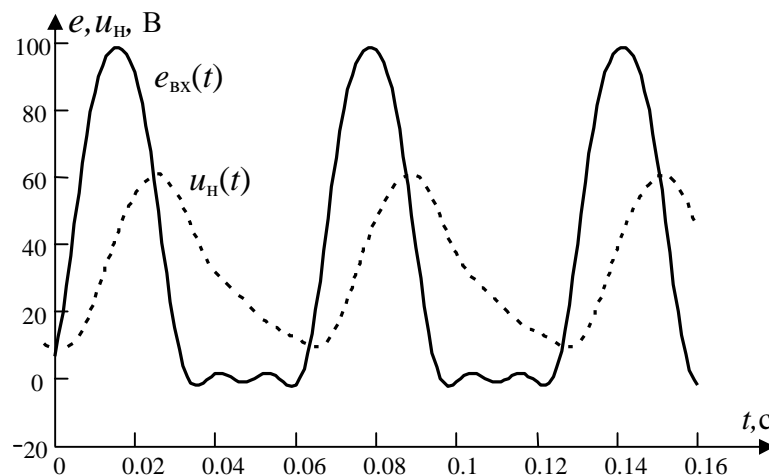


Рис. 4.7. Графики входного напряжения и напряжения на нагрузке

## ЗАДАНИЕ 4

Для заданной электрической цепи, структура которой представлена на схемах 1 или 2 (рис. 4.8) и с параметрами из таблиц 4.1...4.4 выполнить:

- 1) представить заданную функцию источника ЭДС или тока рядом Фурье (см. таблицу 4 и рис. 4.1), ограничив число членов ряда постоянной составляющей и тремя первыми гармониками.
- 2) построить графики спектров амплитуд и начальных фаз заданного источника.
- 3) определить функцию  $f_H(\omega t)$  - напряжение  $u_H(t)$  или ток  $i_H(t)$  на нагрузке, используя метод расчета по комплексным значениям;
- 4) построить графики спектральных составляющих для напряжения (тока) на нагрузке.
- 5) определить действующее значение напряжения (тока) на нагрузке и мощность, рассеиваемую на нагрузке.
- 6) провести расчет гармоник функции  $f_H(\omega t)$  на нагрузке, используя найденный коэффициент передачи. Результаты свести в таблицу, аналогичную таблице из задачи 4. Построить АЧХ и ФЧХ, а также графики входного сигнала и сигнала на нагрузке.

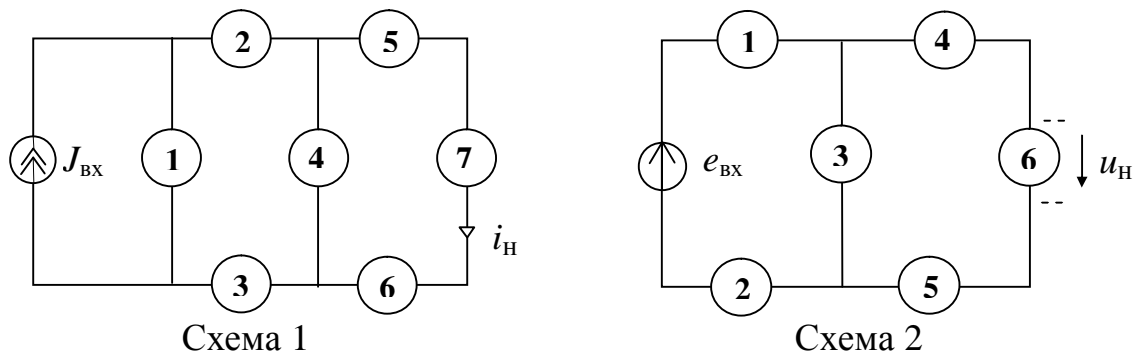
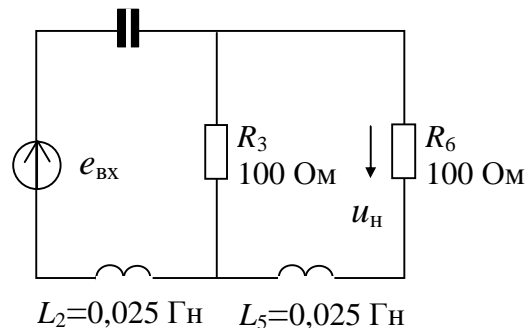


Рис. 4.8

Перед расчетом в соответствии с вариантом задания необходимо составить электрическую схему цепи, заменив элементы структуры элементами  $R$ ,  $L$  и  $C$ . В качестве примера составим схему варианта 29 таблицы 4.1

$$C_1 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Размещаем в первой ветви элемент  $C$ , в ветвях 2 и 5 элементы  $L$ , в ветвях 3 и 6 элементы  $R$ . Индексы элементов соответствуют номерам ветвей. Отсутствующий четвертый элемент структуры заменяем перемычкой.



Указываем значения сопротивлений, емкостей и индуктивностей элементов. В результате мы получаем электрическую цепь, представленную выше.

Начало таблицы 4.1

Вариант	Схема	Параметры источника				$f_H(\omega t)$
		Тип	Форма	$F_M [A, B]$	$\omega_1 [1/c]$	
1	2	ЭДС	12	$E_M=50B$	1000	$u_H(\omega t)$
2	1	тока	15	$J_M=1A$	600	$i_H(\omega t)$
3	2	ЭДС	6	$E_M=55B$	1000	$u_H(\omega t)$
4	1	тока	3	$J_M=1,1A$	1000	$i_H(\omega t)$
5	2	ЭДС	1	$E_M=60B$	1000	$u_H(\omega t)$
6	1	тока	23	$J_M=1,2A$	1200	$i_H(\omega t)$
7	2	ЭДС	4	$E_M=65B$	200	$u_H(\omega t)$
8	1	тока	5	$J_M=1,3A$	200	$i_H(\omega t)$
9	2	ЭДС	19	$E_M=70B$	2000	$u_H(\omega t)$
10	1	тока	27	$J_M=1,4A$	2000	$i_H(\omega t)$
11	2	ЭДС	10	$E_M=75B$	1000	$u_H(\omega t)$
12	1	тока	14	$J_M=1,5A$	200	$i_H(\omega t)$
13	2	ЭДС	17	$E_M=80B$	200	$u_H(\omega t)$
14	1	тока	26	$J_M=1,6A$	1000	$i_H(\omega t)$
15	2	ЭДС	11	$E_M=85B$	100	$u_H(\omega t)$
16	1	тока	28	$J_M=1,7A$	1000	$i_H(\omega t)$
17	2	ЭДС	22	$E_M=90B$	1000	$u_H(\omega t)$
18	1	тока	25	$J_M=1,8A$	1000	$i_H(\omega t)$
19	2	ЭДС	2	$E_M=95B$	1000	$u_H(\omega t)$
20	1	тока	20	$J_M=1,9A$	1000	$i_H(\omega t)$
21	2	ЭДС	16	$E_M=100B$	1000	$u_H(\omega t)$
22	1	тока	24	$J_M=2A$	200	$i_H(\omega t)$
23	2	ЭДС	18	$E_M=105B$	200	$u_H(\omega t)$
24	1	тока	21	$J_M=2,1A$	2000	$i_H(\omega t)$
25	2	ЭДС	7	$E_M=110B$	2000	$u_H(\omega t)$
26	1	тока	8	$J_M=2,2A$	200	$i_H(\omega t)$
27	2	ЭДС	9	$E_M=115B$	500	$u_H(\omega t)$
28	1	тока	13	$J_M=2,3A$	1000	$i_H(\omega t)$
29	2	ЭДС	1	$E_M=120B$	200	$u_H(\omega t)$
30	2	ЭДС	19	$E_M=125B$	100	$u_H(\omega t)$

Окончание таблицы 4.1.

Вариант	Схема	Параметры элементов $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]						
		Номера ветвей						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	$R=20$	-	$L=10$	$R=20$	$R=20$	$L=10$	-
2	1	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
3	2	$C=100$	-	$R=15$	$C=100$	-	$R=15$	-
4	1	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$
5	2	$R=18$	$L=20$	$R=18$	$L=20$	-	$R=18$	-
6	1	$R=25$	$R=25$	-	$L=2$	$R=25$	-	$L=2$
7	2	$R=30$	$C=250$	$R=30$	$C=250$	-	$R=30$	-
8	1	$R=35$	-	$C=250$	$R=35$	$C=250$	-	$R=35$
9	2	$L=4$	$R=200$	$C=5$	$L=4$	$R=200$	$R=200$	-
10	1	$R=200$	$L=2,5$	-	$C=20$	$L=2,5$	-	$R=28$
11	2	$C=50$	-	$L=50$	$C=50$	-	$R=50$	-
12	1	$R=32$	$C=500$	-	$L=150$	$C=500$	-	$R=32$
13	2	$L=25$	$C=50$	$R=80$	$L=25$	-	$R=80$	-
14	1	$R=70$	$L=20$	-	$R=70$	$L=20$	$C=6,7$	$R=70$
15	2	$L=200$	$R=100$	$C=100$	$L=200$	$R=100$	$R=100$	-
16	1	$R=10$	$L=7,5$	$L=7,5$	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
17	2	$R=8$	$R=12$	$L=10$	$R=22$	$R=18$	$L=10$	-
18	1	$R=100$	$C=20$	-	$R=100$	$C=40$	$C=40$	$R=100$
19	2	$C=100$	-	$R=13$	$C=200$	$C=200$	$R=13$	-
20	1	$R=24$	$R=12$	$R=12$	$L=2$	$R=24$	-	$L=2$
21	2	$R=19$	$L=20$	$R=19$	$L=10$	$L=10$	$R=19$	-
22	1	$R=37$	$C=500$	$C=500$	$R=37$	-	$C=250$	$R=37$
23	2	$R=33$	$C=250$	$R=33$	$C=500$	$C=500$	$R=33$	-
24	1	$R=30$	$L=2,5$	-	$C=40$	$L=1,25$	$L=1,35$	$R=30$
25	2	$L=2$	$L=2$	$C=15$	-	$L=4$	$R=50$	-
26	1	$R=34$	$C=10^3$	$C=10^3$	$L=150$	$C=500$	-	$R=34$
27	2	$C=333$	$C=333$	$L=75$	$C=167$	-	$R=30$	-
28	1	$R=75$	$L=10$	$L=10$	$R=75$	$L=20$	$C=6,7$	$R=75$
29	2	$C=50$	$L=25$	$R=100$	-	$L=25$	$R=100$	-
30	2	$R=12$	$L=200$	$C=100$	$R=12$	$L=200$	$R=96$	-

Начало таблицы 4.2.

Вариант	Схема	Параметры источника				$f_H(\omega t)$
		Тип	Форма	$F_M [A, B]$	$\omega_1 [1/c]$	
1	1	тока	2	$J_M=2,3A$	1000	$i_H(\omega t)$
2	2	ЭДС	14	$E_M=110B$	2000	$u_H(\omega t)$
3	1	тока	16	$J_M=2A$	200	$i_H(\omega t)$
4	2	ЭДС	13	$E_M=95B$	1000	$u_H(\omega t)$
5	1	тока	18	$J_M=1,7A$	1000	$i_H(\omega t)$
6	2	ЭДС	11	$E_M=80B$	200	$u_H(\omega t)$
7	1	тока	16	$J_M=1,4A$	2000	$i_H(\omega t)$
8	2	ЭДС	8	$E_M=65B$	200	$u_H(\omega t)$
9	1	тока	10	$J_M=1,1A$	1000	$i_H(\omega t)$
10	2	ЭДС	5	$E_M=50B$	1000	$u_H(\omega t)$
11	2	ЭДС	19	$E_M=120B$	200	$u_H(\omega t)$
12	1	тока	4	$J_M=2,2A$	200	$i_H(\omega t)$
13	2	ЭДС	28	$E_M=105B$	200	$u_H(\omega t)$
14	1	тока	23	$J_M=1,9A$	1000	$i_H(\omega t)$
15	2	ЭДС	25	$E_M=90B$	1000	$u_H(\omega t)$
16	1	тока	15	$J_M=1,6A$	1000	$i_H(\omega t)$
17	2	ЭДС	3	$E_M=75B$	1000	$u_H(\omega t)$
18	1	тока	12	$J_M=1,3A$	200	$i_H(\omega t)$
19	2	ЭДС	11	$E_M=60B$	1000	$u_H(\omega t)$
20	1	тока	26	$J_M=1A$	600	$i_H(\omega t)$
21	2	ЭДС	1	$E_M=125B$	100	$u_H(\omega t)$
22	2	ЭДС	6	$E_M=115B$	500	$u_H(\omega t)$
23	1	тока	15	$J_M=2,1A$	2000	$i_H(\omega t)$
24	2	ЭДС	27	$E_M=100B$	1000	$u_H(\omega t)$
25	1	тока	22	$J_M=1,8A$	1000	$i_H(\omega t)$
26	2	ЭДС	1	$E_M=85B$	100	$u_H(\omega t)$
27	1	тока	7	$J_M=1,5A$	200	$i_H(\omega t)$
28	2	ЭДС	1	$E_M=70B$	2000	$u_H(\omega t)$
29	1	тока	20	$J_M=1,2A$	1200	$i_H(\omega t)$
30	2	ЭДС	15	$E_M=55B$	1000	$u_H(\omega t)$

**Окончание таблицы 4.2.**

Вариант	Схема	Параметры элементов $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]						
		Номера ветвей						
		1	2	3	4	5	6	7
1	1	$R=75$	$L=10$	$L=10$	$R=75$	$L=20$	$C=6,7$	$R=75$
2	2	$L=2$	$L=2$	$C=15$	-	$L=4$	$R=50$	-
3	1	$R=37$	$C=500$	$C=500$	$R=37$	-	$C=250$	$R=37$
4	2	$C=100$	-	$R=13$	$C=200$	$C=200$	$R=13$	-
5	1	$R=10$	$L=7,5$	$L=7,5$	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
6	2	$L=25$	$C=50$	$R=80$	$L=25$	-	$R=80$	-
7	1	$R=200$	$L=2,5$	-	$C=20$	$L=2,5$	-	$R=28$
8	2	$R=30$	$C=250$	$R=30$	$C=250$	-	$R=30$	-
9	1	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$
10	2	$R=20$	-	$L=10$	$R=20$	$R=20$	$L=10$	-
11	2	$C=50$	$L=25$	$R=100$	-	$L=25$	$R=100$	-
12	1	$R=34$	$C=10^3$	$C=10^3$	$L=150$	$C=500$	-	$R=34$
13	2	$R=33$	$C=250$	$R=33$	$C=500$	$C=500$	$R=33$	-
14	1	$R=24$	$R=12$	$R=12$	$L=2$	$R=24$	-	$L=2$
15	2	$R=8$	$R=12$	$L=10$	$R=22$	$R=18$	$L=10$	-
16	1	$R=70$	$L=20$	-	$R=70$	$L=20$	$C=6,7$	$R=70$
17	2	$C=50$	-	$L=50$	$C=50$	-	$R=50$	-
18	1	$R=35$	-	$C=250$	$R=35$	$C=250$	-	$R=35$
19	2	$R=18$	$L=20$	$R=18$	$L=20$	-	$R=18$	-
20	1	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
21	2	$R=12$	$L=200$	$C=100$	$R=12$	$L=200$	$R=96$	-
22	2	$C=333$	$C=333$	$L=75$	$C=167$	-	$R=30$	-
23	1	$R=30$	$L=2,5$	-	$C=40$	$L=1,25$	$L=1,35$	$R=30$
24	2	$R=19$	$L=20$	$R=19$	$L=10$	$L=10$	$R=19$	-
25	1	$R=100$	$C=20$	-	$R=100$	$C=40$	$C=40$	$R=100$
26	2	$L=200$	$R=100$	$C=100$	$L=200$	$R=100$	$R=100$	-
27	1	$R=32$	$C=500$	-	$L=150$	$C=500$	-	$R=32$
28	2	$L=4$	$R=200$	$C=5$	$L=4$	$R=200$	$R=200$	-
29	1	$R=25$	$R=25$	-	$L=2$	$R=25$	-	$L=2$
30	2	$C=100$	-	$R=15$	$C=100$	-	$R=15$	-



Начало таблицы 4.3.

Вариант	Схема	Параметры источника				$f_H(\omega t)$
		Тип	Форма	$F_M [A, B]$	$\omega_1 [1/c]$	
1	1	тока	16	$J_M=1,4A$	2000	$i_H(\omega t)$
2	2	ЭДС	19	$E_M=70B$	2000	$u_H(\omega t)$
3	1	тока	6	$J_M=1,3A$	200	$i_H(\omega t)$
4	2	ЭДС	26	$E_M=65B$	200	$u_H(\omega t)$
5	1	тока	23	$J_M=1,2A$	1000	$i_H(\omega t)$
6	2	ЭДС	25	$E_M=60B$	1000	$u_H(\omega t)$
7	1	тока	4	$J_M=1,1A$	1000	$i_H(\omega t)$
8	2	ЭДС	5	$E_M=55B$	1000	$u_H(\omega t)$
9	1	тока	1	$J_M=1,0A$	1000	$i_H(\omega t)$
10	2	ЭДС	7	$E_M=50B$	1000	$u_H(\omega t)$
11	1	тока	9	$J_M=1,9A$	1000	$i_H(\omega t)$
12	2	ЭДС	6	$E_M=95B$	1000	$u_H(\omega t)$
13	1	тока	3	$J_M=1,8A$	1000	$i_H(\omega t)$
14	2	ЭДС	12	$E_M=90B$	1000	$u_H(\omega t)$
15	1	тока	15	$J_M=1,7A$	1000	$i_H(\omega t)$
16	2	ЭДС	14	$E_M=85B$	100	$u_H(\omega t)$
17	1	тока	2	$J_M=1,6A$	1000	$i_H(\omega t)$
18	2	ЭДС	13	$E_M=80B$	200	$u_H(\omega t)$
19	1	тока	11	$J_M=1,5A$	200	$i_H(\omega t)$
20	2	ЭДС	17	$E_M=75B$	1000	$u_H(\omega t)$
21	2	ЭДС	18	$E_M=125B$	100	$u_H(\omega t)$
22	2	ЭДС	8	$E_M=120B$	200	$u_H(\omega t)$
23	1	тока	21	$J_M=2,3A$	1000	$i_H(\omega t)$
24	2	ЭДС	10	$E_M=115B$	200	$u_H(\omega t)$
25	1	тока	22	$J_M=2,2A$	200	$i_H(\omega t)$
26	1	тока	26	$J_M=0,9A$	2000	$i_H(\omega t)$
27	2	ЭДС	28	$E_M=45B$	2000	$u_H(\omega t)$
28	1	тока	24	$J_M=0,8A$	250	$i_H(\omega t)$
29	2	ЭДС	20	$E_M=40B$	250	$u_H(\omega t)$
30	1	тока	27	$J_M=0,7A$	1000	$i_H(\omega t)$

Окончание таблицы 4.3.

Вариант	Схема	Параметры элементов $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]						
		Номера ветвей						
		1	2	3	4	5	6	7
1	1	$R=28$	$L=5$	-	$C=10$	$L=5$	-	$R=28$
2	2	$L=4$	-	$C=5$	$L=4$	-	$R=26$	-
3	1	$R=35$	-	$C=250$	$R=35$	$C=250$	-	$R=35$
4	2	$R=30$	$C=250$	$R=30$	$C=250$	-	$R=30$	-
5	1	$R=25$	$R=25$	-	$L=2$	$R=25$	-	$L=2$
6	2	$R=18$	$L=20$	$R=18$	$L=20$	-	$R=18$	-
7	1	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$
8	2	$C=100$	-	$R=15$	$C=100$	-	$R=15$	-
9	1	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
10	2	$R=20$	-	$L=10$	$R=20$	$R=20$	$L=10$	-
11	1	$R=24$	$R=12$	$R=12$	$L=2$	$R=24$	-	$L=2$
12	2	$C=100$	-	$R=13$	$C=200$	$C=200$	$R=13$	-
13	1	$R=100$	$C=20$	-	$R=100$	$C=40$	$C=40$	$R=100$
14	2	$R=8$	$R=12$	$L=10$	$R=22$	$R=18$	$L=10$	-
15	1	$R=10$	$L=7,5$	$L=7,5$	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
16	2	$L=200$	$R=10$	$C=100$	$L=200$	$R=10$	$R=100$	-
17	1	$R=70$	$L=20$	-	$R=70$	$L=20$	$C=6,7$	$R=70$
18	2	$L=25$	$C=50$	$R=80$	$L=25$	-	$R=80$	-
19	1	$R=32$	$C=500$	-	$L=150$	$C=500$	-	$R=32$
20	2	$C=50$	-	$L=50$	$C=50$	-	$R=50$	-
21	2	$R=12$	$L=200$	$C=100$	$R=12$	$L=200$	$R=96$	-
22	2	$C=50$	$L=25$	$R=100$	-	$L=25$	$R=100$	-
23	1	$R=75$	$L=10$	$L=10$	$R=75$	$L=20$	$C=6,7$	$R=75$
24	2	$C=333$	$C=333$	$L=75$	$C=167$	-	$R=30$	-
25	1	$R=50$	$C=10^3$	$C=10^3$	$L=150$	$C=500$	-	$R=50$
26	1	$R=30$	$L=5$	-	$C=12$	$L=5$	-	$R=30$
27	2	$L=5$	-	$C=7$	$L=5$	-	$R=29$	-
28	1	$R=40$	-	$C=250$	$R=40$	$C=250$	-	$R=40$
29	2	$R=35$	$C=300$	$R=35$	$C=300$	-	$R=35$	-
30	1	$R=28$	$R=28$	-	$L=5$	$R=28$	-	$L=5$

**Начало таблицы 4.4.**

Вариант	Схема	Параметры источника				$f_H(\omega t)$
		Тип	Форма	$F_M [A, B]$	$\omega_1 [1/c]$	
1	1	тока	16	$J_M=0,8A$	250	$i_H(\omega t)$
2	1	тока	25	$J_M=2,2A$	200	$i_H(\omega t)$
3	2	ЭДС	4	$E_M=120B$	200	$u_H(\omega t)$
4	1	тока	17	$J_M=1,5A$	200	$i_H(\omega t)$
5	2	ЭДС	7	$E_M=85B$	100	$u_H(\omega t)$
6	1	тока	10	$J_M=1,8A$	1000	$i_H(\omega t)$
7	2	ЭДС	14	$E_M=50B$	1000	$u_H(\omega t)$
8	1	тока	8	$J_M=1,1A$	1000	$i_H(\omega t)$
9	2	ЭДС	15	$E_M=65B$	200	$u_H(\omega t)$
10	1	тока	27	$J_M=1,4A$	2000	$i_H(\omega t)$
11	2	ЭДС	23	$E_M=40B$	250	$u_H(\omega t)$
12	1	тока	21	$J_M=0,9A$	2000	$i_H(\omega t)$
13	1	тока	6	$J_M=2,3A$	1000	$i_H(\omega t)$
14	2	ЭДС	11	$E_M=75B$	1000	$u_H(\omega t)$
15	1	тока	13	$J_M=1,6A$	1000	$i_H(\omega t)$
16	2	ЭДС	5	$E_M=90B$	1000	$u_H(\omega t)$
17	1	тока	6	$J_M=1,9A$	1000	$i_H(\omega t)$
18	2	ЭДС	4	$E_M=55B$	1000	$u_H(\omega t)$
19	1	тока	20	$J_M=1,2A$	1000	$i_H(\omega t)$
20	2	ЭДС	1	$E_M=70B$	2000	$u_H(\omega t)$
21	1	тока	16	$J_M=0,7A$	1000	$i_H(\omega t)$
22	2	ЭДС	18	$E_M=45B$	2000	$u_H(\omega t)$
23	2	ЭДС	3	$E_M=115B$	200	$u_H(\omega t)$
24	2	ЭДС	28	$E_M=125B$	100	$u_H(\omega t)$
25	2	ЭДС	2	$E_M=80B$	200	$u_H(\omega t)$
26	1	тока	26	$J_M=1,7A$	1000	$i_H(\omega t)$
27	2	ЭДС	15	$E_M=95B$	1000	$u_H(\omega t)$
28	1	тока	11	$J_M=1,0A$	1000	$i_H(\omega t)$
29	2	ЭДС	22	$E_M=60B$	1000	$u_H(\omega t)$
30	1	тока	26	$J_M=1,3A$	200	$i_H(\omega t)$

**Окончание таблицы 4.4.**

Вариант	Схема	Параметры элементов $R$ [Ом], $L$ [мГн], $C$ [мкФ]						
		Номера ветвей						
		1	2	3	4	5	6	7
1	1	$R=40$	-	$C=250$	$R=40$	$C=250$	-	$R=40$
2	1	$R=50$	$C=10^3$	$C=10^3$	$L=150$	$C=500$	-	$R=50$
3	2	$C=50$	$L=25$	$R=100$	-	$L=25$	$R=100$	-
4	1	$R=32$	$C=500$	-	$L=150$	$C=500$	-	$R=32$
5	2	$L=200$	$R=10$	$C=100$	$L=200$	$R=10$	$R=100$	-
6	1	$R=100$	$C=20$	-	$R=100$	$C=40$	$C=40$	$R=100$
7	2	$R=20$	-	$L=10$	$R=20$	$R=20$	$L=10$	-
8	1	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$
9	2	$R=30$	$C=250$	$R=30$	$C=250$	-	$R=30$	-
10	1	$R=28$	$L=5$	-	$C=10$	$L=5$	-	$R=28$
11	2	$R=35$	$C=300$	$R=35$	$C=300$	-	$R=35$	-
12	1	$R=30$	$L=5$	-	$C=12$	$L=5$	-	$R=30$
13	1	$R=75$	$L=10$	$L=10$	$R=75$	$L=20$	$C=6,7$	$R=75$
14	2	$C=50$	-	$L=50$	$C=50$	-	$R=50$	-
15	1	$R=70$	$L=20$	-	$R=70$	$L=20$	$C=6,7$	$R=70$
16	2	$R=8$	$R=12$	$L=10$	$R=22$	$R=18$	$L=10$	-
17	1	$R=24$	$R=12$	$R=12$	$L=2$	$R=24$	-	$L=2$
18	2	$C=100$	-	$R=15$	$C=100$	-	$R=15$	-
19	1	$R=25$	$R=25$	-	$L=2$	$R=25$	-	$L=2$
20	2	$L=4$	-	$C=5$	$L=4$	-	$R=26$	-
21	1	$R=28$	$R=28$	-	$L=5$	$R=28$	-	$L=5$
22	2	$L=5$	-	$C=7$	$L=5$	-	$R=29$	-
23	2	$C=333$	$C=333$	$L=75$	$C=167$	-	$R=30$	-
24	2	$R=12$	$L=200$	$C=100$	$R=12$	$L=200$	$R=96$	-
25	2	$L=25$	$C=50$	$R=80$	$L=25$	-	$R=80$	-
26	1	$R=10$	$L=7,5$	$L=7,5$	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
27	2	$C=100$	-	$R=13$	$C=200$	$C=200$	$R=13$	-
28	1	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
29	2	$R=18$	$L=20$	$R=18$	$L=20$	-	$R=18$	-
30	1	$R=35$	-	$C=250$	$R=35$	$C=250$	-	$R=35$

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

---

### **КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ и ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В 1930 году техникум точной механики и оптики был реорганизован в учебный комбинат, состоящий из института, техникума и ФЗУ в системе Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности.

В те годы электротехническую подготовку в нашем институте проводили кафедры «Электротехники» и «Электроизмерительных приборов». Кафедрой «Электротехники» руководил проф. Салтыков Л.Н., а кафедрой «Электроизмерительных приборов» проф. Шишелов Л.П.

С сентября 1933 года исполнять обязанности заведующего кафедрой «Электротехники» нашего института начинает Рукавишников Н. Н, а с ноября 1937 года, на заведование кафедрой назначается Солодовников А. А., известный специалист в области электротехники, электроизмерительных приборов и оборудования.

Во время войны при эвакуации ЛИТМО в г. Черепаново кафедрой руководил доц., к.т.н. Березниковский С. Ф.; штатное расписание кафедры в те годы насчитывало всего 4 человека.

После возвращения ЛИТМО из эвакуации в 1944 году кафедрой заведует Березниковский С.Ф., которого 25 января 1945 года освобождают от обязанностей заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» и назначают заведующим этой кафедрой профессора Зилитенкевича С.И.

В послевоенные годы в целом по стране и в Ленинграде ощущался дефицит опытных преподавателей высшей школы и руководство институтом пригласило в качестве заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» известного ученого, педагога и методиста Пиотровского Л. М. Большинство учебников по электрическим машинам в ту пору было написано Пиотровским Л.М. лично или в соавторстве с другими видными учеными.

В 1948 году на базе кафедры «Общей и специальной электротехники» образуются кафедры: «Общей электротехники и электрических машин» зав.каф.

доц. Березниковский С.Ф., «Теоретических основ электротехники» зав. каф. проф. Слепян Л.Б. и «Электроизмерительных приборов» исполняющий обязанности зав. каф. проф. Слепян Л.Б.

В 1951 году кафедры «Электротехники» и «ТОЭ» объединяют в единую кафедру «Электротехники и ТОЭ» под руководством доц. Березниковского С.Ф. в составе Радиотехнического факультета,

В 1956 году на радиотехническом факультете вновь образуются две кафедры – «ТОЭ» зав. каф. доц. Сочнев А.Я. и «Электрических машин» зав. каф. доц. Березниковский С.Ф.

В июле 1958 года доц. Сочнева А.Я. освобождают от обязанностей зав. каф. «ТОЭ», а доц. Фунтова Н.М. назначают в.и.о. зав. каф. и избирают по конкурсу на должность заведующего в 1960 году.

В 1961 году в ЛИТМО на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» приглашают профессора Сахарова А.П.

В 1965 году на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» избирается доц., к.т.н. Глазенко Т.А.

В 1968 году кафедры «ТОЭ» и «Электрических машин» объединяются в единую кафедру «Электротехники» под руководством Т.А. Глазенко.

Татьяна Анатольевна Глазенко в 1948 году с отличием закончила энергетический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1953 году она защитила кандидатскую диссертацию и в 1966 году докторскую диссертацию. Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, почетный член Электротехнической академии России проф. Глазенко Т.А. двадцать пять лет возглавляла кафедру. Она являлась видным, творчески активным ученым, автором более 200 опубликованных научных работ.

В 1990 году на должность заведующего кафедрой избирается профессор, д.т.н. Герман - Галкин С.Г.

В 1996 году кафедра «Электротехники» была переименована в кафедру «Электротехники и прецизионных электромеханических систем».

С 1991 года кафедрой руководит доцент, кандидат технических наук, Томасов Валентин Сергеевич.

С 1992 по 2005годы на кафедре работал заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Международной Энергетической академии, профессор, д.т.н., Сабинин Ю.А..

Сегодня на кафедре работают: профессор, д.т.н. Овчинников И.Е.; доценты, к.т.н.: Губанов Н.Н., Борисов П.В., Денисова А.В., Кротенко В.В., Лукичев Д.А., Никитина М.В., Осипов Ю.М., Петров Е.А., Сеницын В.А., Соловьев В.И., Толмачев В.А., Усольцев А.А.; доцент Гурьянов В.А.; ст. преподаватели: к.т.н. Махин И.Е., Денисов К.М.; ассистенты: Серебряков С. А., Жданов И.Н.

Толмачев Валерий Александрович  
Усольцев Александр Анатольевич  
Лукичев Дмитрий Вячеславович  
Никитина Мария Владимировна

## **Общая электротехника**

Методические рекомендации по выполнению домашних заданий

В авторской редакции  
Компьютерная вёрстка  
Дизайн обложки

Д.В.Лукичев  
А.А.Усольцев

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Лицензия ИД №00408 от 05.11.1999

Зав. редакционно-издательским отделом

Подписано к печати 23.03.2009

Тираж 500 экз. Заказ №2095. Отпечатано на ризографе.

Н.Ф.Гусарова

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского государственного  
университета информационных техноло-  
гий, механики и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский  
пр., 49

