Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Для студентов первого курса специальности
1-39 03 01 Электронные системы безопасности

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2017

Примеры решения типовых задач

2.1 Методы расчета электрических цепей постоянного тока

2.1.1 Метод эквивалентных преобразований («метод свертки»)

Пример. На рисунке 2.1 приведена схема замещения разветвленной электрической цепи с одним источником электрической энергии, для которой известны значения сопротивлений резисторов $R_1 = 2\ Ом;\ R_2 = 6\ Ом;\ R_3 = 4\ Ом;\ R_4 = 12\ Ом;\ R_5 = 8\ Ом;\ R_6 = 14\ Ом$, значения ЭДС $E_1 = 40\ В$ и его внутреннего сопротивления $R_{01} = 0{,}6\ Ом$. Требуется определить токи во всех участках электрической цепи.

Решение. Для решения такой задачи отдельные участки электрической цепи с последовательно или параллельно соединенными элементами заменяют одним эквивалентным элементом. Так, резисторы R_4 и R_5 соединены последовательно, а резистор R_6 к ним параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление запишется как

$$R_{456} = \frac{R_{45}R_6}{R_{45} + R_6} = 8{,}2\ Ом, \text{ где } R_{45} = R_4 + R_5 = 20\ Ом.$$

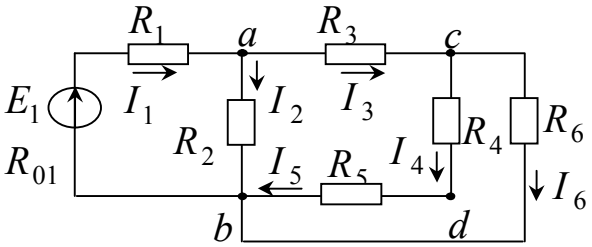


Рисунок 2.1 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с одним источником электрической энергии

Сопротивления R_3 и R_{456} соединены последовательно, поэтому их общее сопротивление будет равно $R_{3456} = R_3 + R_{456} = 12{,}2\ Ом$.

Сопротивления R_2 и R_{3456} соединены параллельно, следовательно

$$R_{23456} = \frac{R_2(R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}} = 4\ Ом.$$

Эквивалентное (входное) сопротивление всей цепи находят из уравнения

$$R_{экв.} = R_{01} + R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}} = 6{,}6\ Ом.$$

Ток I_1 в неразветвленной части схемы определяют из закона Ома:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{экв.}} = 6\ A.$$

Токи I_2 и I_3 можно определить так

$$I_2 = I_1 \frac{R_3 + R_{456}}{R_2 + R_3 + R_{456}} = 4\ A;$$

$$I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_{456}} = 2\ A.$$

Токи $I_4; I_5; I_6$ определяют по следующим формулам:

$$I_4 = I_5 = I_3 \frac{R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = 0{,}8\ A; I_6 = I_3 \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = 1{,}2\ A.$$

Зная ток I_1, можно найти ток I_2 по-другому. На основании второго правила Кирхгофа, определяем напряжение на участке ab $U_{ab} = E_1 - I_1(R_{01} + R_1) = 24{,}4\ B$, тогда значение тока будет равно $I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = 4\ A$.

Правильность вычисленных значений можно проверить, воспользовавшись первым правилом Кирхгофа

$$I_1 = I_2 + I_3;$$

$$6\ A = 4\ A + 2\ A;$$

$$I_3 = I_4 + I_6;$$

$$2\ A = 0{,}8\ A + 1{,}2\ A.$$

или составив уравнение для баланса мощностей

$$E_1 I_1 = (R_{01} + R_1) I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + (R_4 + R_5) I_4^2 + R_6 I_6^2;$$

$$40 \cdot 6 = (0{,}6 + 2) \cdot 6^2 + 6 \cdot 4^2 + 4 \cdot 2^2 + (12 + 8) \cdot 0{,}8^2 + 14 \cdot 1{,}2^2;$$

$$240 = 238{,}56.$$

2.1.2 Расчет электрических цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа

Пример. Для электрической цепи, схема, которой изображена на рисунке 2.2, известны значения сопротивлений резисторов

$R_1 = 2\ Ом;\ R_2 = 6\ Ом;\ R_3 = 4\ Ом;\ R_4 = 12\ Ом;\ R_5 = 8\ Ом$, значения ЭДС $E_1 = 40\ В$ и $E_2 = 20\ В$. Требуется определить токи во всех участках электрической цепи.

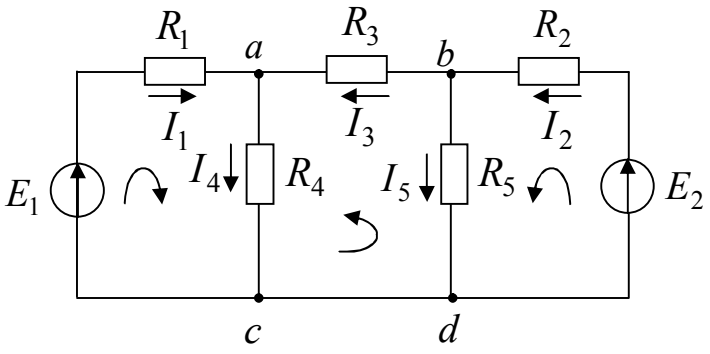


Рисунок 2.2 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии для расчета с применением правил Кирхгофа

Решение. Составим систему уравнений по правилам Кирхгофа. Эта схема имеет пять ветвей и три узла, поэтому по первому правилу Кирхгофа для нее нужно составить два уравнения, например:

для узла a: $I_1 + I_3 - I_4 = 0$;

для узла b: $I_2 - I_5 - I_3 = 0$.

Выбрав направления обхода контура, составляем три уравнения по второму правилу Кирхгофа для трех произвольно выбранных контуров:

$E_1 = I_1R_1 + I_4R_4$;

$E_2 = I_2R_2 + I_5R_5$;

$0 = I_3R_3 + I_4R_4 - I_5R_5$.

Подставляя значения сопротивлений и ЭДС, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 + I_3 - I_4 = 0 \\ I_2 - I_5 - I_3 = 0 \\ 40 = 2I_1 + 12I_4 \\ 20 = 6I_2 + 8I_5 \\ 0 = 4I_3 + 12I_4 - 8I_5 \end{cases}$$

Для решения данной системы уравнений можно применить все известные методы. Применим метод подстановки.

Подставим (1) и (2) в (3) – (5) и приведем подобные:

$$\begin{cases} 40 = 14I_1 + 12I_3 \quad (6) \\ 20 = 14I_2 - 8I_3 \quad (7) \\ 0 = 3I_1 - 2I_2 + 6I_3 \quad (8) \end{cases}$$

Из (6) выразим I_1, а из (7) – I_2, подставим в (8), приведем подобные и получим:

$I_3 = -2{,}5\ A$.

Подставив полученное значение тока I_3 в уравнения (6), (7), а затем в (1) и (2), найдем остальные токи:

$I_1 = 5\ A;\ I_2 = A;\ I_4 = 2{,}5\ A;\ I_5 = 2{,}5\ A.$

Правильность вычисленных значений токов, можно составив уравнение для баланса мощностей:

$$E_1 I_1 + E_2 I_3 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2;$$

$$40 \cdot 5 = 2 \cdot 5^2 + 6 \cdot 0^2 + 4 \cdot 2{,}5^2 + 12 \cdot 2{,}5^2 + 8 \cdot 2{,}5^2;$$

$$200 = 200.$$

2.1.3 Расчет электрических цепей постоянного тока по методу контурных токов

Пример. Для электрической цепи, схема, которой изображена на рисунке 2.3, известны значения сопротивлений резисторов $R_1 = 2\ Ом;\ R_2 = 6\ Ом;\ R_3 = 4\ Ом;\ R_4 = 12\ Ом;\ R_5 = 8\ Ом$, значения ЭДС $E_1 = 40\ B$ и $E_2 = 20\ B$. Требуется определить токи во всех участках электрической цепи.

Решение. Составим систему уравнений для трех независимых контуров по методу контурных токов:

$$\begin{cases} E_1 = I_{11}(R_1 + R_4) + I_{33} R_4 \\ E_2 = I_{22}(R_2 + R_5) - I_{33} R_5 \\ 0 = I_{11} R_4 - I_{22} R_5 + I_{33}(R_4 + R_3 + R_5). \end{cases}$$

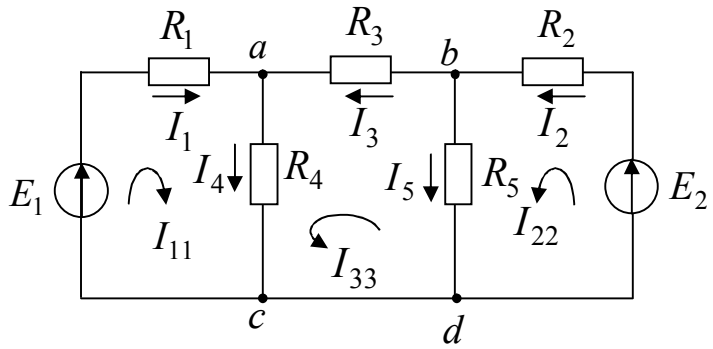


Рисунок 2.3 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии для расчета методом контурных токов

Подставляя значения сопротивлений и ЭДС, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 40 = (2+12)I_{11} + 12I_{33} \\ 20 = (2+8)I_{22} - 8I_{33} \\ 0 = 12I_{11} - 8I_{22} + 24I_{33}. \end{cases}$$

Данную систему решим, применив метод Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 14 & 0 & 12 \\ 0 & 10 & -8 \\ 12 & -8 & 24 \end{vmatrix} = 1024;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 40 & 0 & 12 \\ 20 & 10 & -8 \\ 0 & -8 & 24 \end{vmatrix} = 5120;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 14 & 0 & 12 \\ 0 & 20 & -8 \\ 12 & 0 & 24 \end{vmatrix} = 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 14 & 0 & 40 \\ 0 & 10 & 20 \\ 12 & -8 & 0 \end{vmatrix} = -2560.$$

Определим контурные токи:

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = 5\ A; \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = 0\ A; \quad I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = -2{,}5\ A.$$

Зная контурные токи, определяем действительные токи в ветвях схемы следующим образом:

$$I_1 = I_{11} = 5\ A; \quad I_2 = I_{22} = 0\ A; \quad I_3 = I_{33} = -2{,}5\ A; \ I_5 = I_{22} - I_{33} = 2{,}5\ A;$$

$$I_4 = I_{11} + I_{33} = 2{,}5\ A.$$

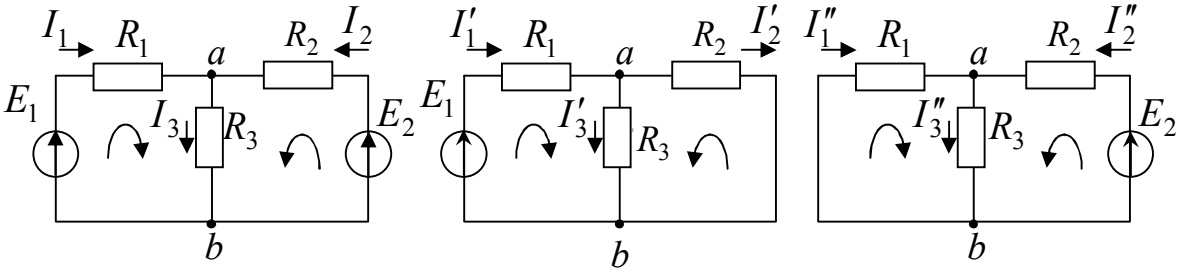
2.1.4 Расчет электрических цепей постоянного тока с применением метода наложения

Пример. Для электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 2.5, а), требуется определить токи во всех участках

электрической цепи, если известны значения ЭДС $E_1 = 40\ B$ и $E_2 = 20\ B$, значения резисторов $R_1 = 2\ Ом;\ R_2 = 6\ Ом;\ R_3 = 4\ Ом$.

Решение. Исключим в ней источник E_2, считая, что $E_2 = 0$. Тогда схема примет вид рисунка 2.5, б). Ток в неразветвленной части цепи будет равен общему току, т. е. току от действия первого источника ЭДС

$$I'_{общ.} = I'_1 = \frac{E_1}{R'_{экв.}}.$$



а) б) в)

Рисунок 2.5 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии (а) и схемы замещения электрической цепи для определения частичных токов от действия ЭДС E_1 (б) и ЭДС E_2 (в)

Вычислим значения $R'_{экв.} = R_1 + \dfrac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 4{,}4\ Ом$.

Тогда ток $I'_1 = \dfrac{E_1}{R'_{экв.}} = 9{,}1\ A$.

Ток I'_3 определим так $I'_3 = \dfrac{E_1 - I'_1 R_1}{R_3} = 5{,}45\ A$.

Применив первое правило Кирхгофа, вычислим $I'_2 = I'_1 - I'_3 = 3{,}65\ A$.

Токи I'_2, I'_3 можно вычислить и так:

$$I'_2 = I'_1 \frac{R_3}{R_3 + R_2} = 3{,}65\ A,\ I'_3 = I'_1 \frac{R_2}{R_3 + R_2} = 5{,}45\ A.$$

Исключим источник E_1, т. е. будем считать, что ЭДС первого источника $E_1 = 0$. Тогда схема примет вид, указанный на рисунке 2.5, в). Ток в неразветвленной части цепи в этом случае определим как

$$I''_{общ.} = I''_2 = \frac{E_2}{R''_{экв.}}.$$

Вычислим значение $R''_{экв.} = R_2 + \dfrac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 7{,}33\ Ом$.

Тогда ток $I''_2 = \dfrac{E_2}{R''_{экв.}} = 2{,}73\ A$.

Ток I_3'' определим как $I_3'' = \dfrac{E_1 - I_2'' R_2}{R_3} = 0{,}91\ A$,

а $I_1'' = I_3'' - I_2'' = -1{,}82\ A$.

Токи I_1'', I_3'' можно определить и так

$$I_1' = I_2' \frac{R_3}{R_3 + R_1} = 1{,}82\ A;\ I_3'' = I_1'' \frac{R_1}{R_3 + R_1} = 0{,}91\ A.$$

Действительные токи определим как алгебраическую сумму частичных токов (рисунок 2.5):

$I_1 = I_1' + I_1'' = 7{,}28\ A;\ I_2 = I_2'' - I_2' = -0{,}92\ A;\ I_3 = I_3' + I_3'' = 6{,}36\ A$.

2.1.5 Расчет электрических цепей постоянного тока по методу двух узлов

Пример. Рассчитаем токи для электрической цепи, изображенной на рисунке 2.6, если известны значения сопротивлений резисторов $R_1 = 2\ Ом;\ R_2 = 6\ Ом;\ R_3 = 4\ Ом;\ R_4 = 12\ Ом$, значения ЭДС $E_1 = 40\ B$, $E_2 = 20\ B$, $E_3 = 60\ B$.

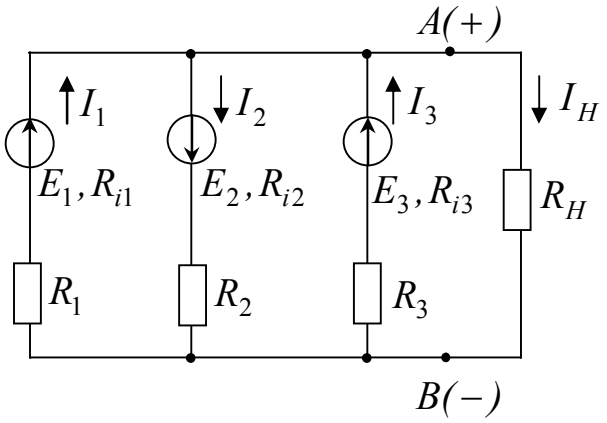


Рисунок 2.6 − Схема замещения разветвленной электрической цепи для расчета с применением метода двух узлов

Решение. Пусть например эквивалентная ЭДС направлена к точке A, т. е. на точке $A(+)$, а на точке $B\ (-)$. Рассчитаем значения эквивалентной ЭДС

$$E_{экв} = \frac{E_1(\frac{1}{R_1}) - E_2(\frac{1}{R_2}) + E_3(\frac{1}{R_3})}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{40\frac{1}{2} - 20\frac{1}{6} + 60\frac{1}{4}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{4} + \frac{1}{12}} = 31{,}67\ B.$$

Так как $U_{AB} = E_{экв}$, с учетом выбранных направлений токов, рассчитаем токи в ветвях

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{AB}}{R_1} = 4{,}17\ A;\ I_2 = \frac{E_2 + U_{AB}}{R_2} = 8{,}61\ A;$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U_{AB}}{R_3} = 7{,}08\ A;\ \ I_4 = \frac{U_{AB}}{R_4} = 2{,}64\ A.$$

2.1.6 Расчет электрических цепей постоянного тока с применением метода эквивалентного генератора

Пример. Рассмотрим схему, изображенную на рисунке 2.8, для которой известны значения сопротивлений резисторов $R_1 = 2\ Ом;\ R_2 = 6\ Ом;\ R_3 = 4\ Ом;\ R_4 = 12\ Ом;\ R_5 = 8\ Ом;\ R_6 = 10\ Ом$, значения ЭДС $E_2 = 20\ B$, $E_3 = 30\ B$, $E_4 = 10\ B$, $E_5 = 40\ B$ и $E_6 = 60\ B$. Требуется определить ток I_3.

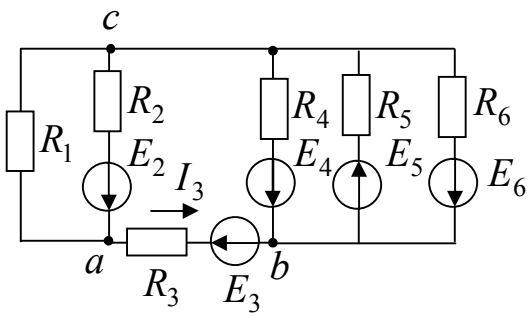


Рисунок 2.8 − Схема замещения разветвленной электрической цепи для расчета с применением метода эквивалентного генератора

Решение. Решение задачи состоит из двух этапов:

1) определяем напряжение холостого хода U_{xx} на зажимах разомкнутой ветви ab. Схема в этом случае имеет вид, показанный на рисунке 2.9. Для определения тока в первом контуре применим метод контурных токов:

$$I_{1X} = E_2 /(R_1 + R_2) = 20 /(2 + 6) = 2{,}5\ A;\ I_1 = I_{1X} = 2{,}5\ A.$$

Напряжения между точками cd U_{cb} находим по методу двух узлов

$$U_{cb} = \frac{E_5G_5 - E_4G_4 - E_6G_6}{G_5 + G_4 + G_6} = \frac{40\frac{1}{8} - 60\frac{1}{10} - 10\frac{1}{12}}{\frac{1}{8} + \frac{1}{12} + \frac{1}{10}} = -5{,}94\ B.$$

Напряжение U_{xx} вычислим так

$U_{xx} = U_{ab}$, где $U_{ab} = R_1I_1 + U_{cb} = -0{,}94\ B$.

2) Для определения сопротивления исключим все источники ЭДС. Схема в этом случае имеет вид, показанный на рисунке 2.10.

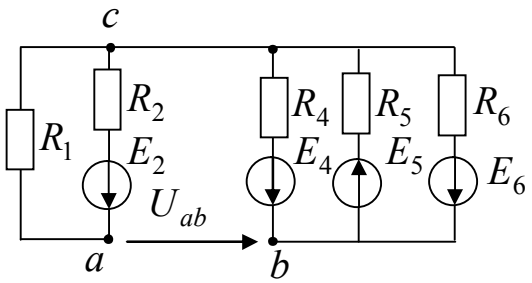


Рисунок 2.9 − Разомкнутая цепь

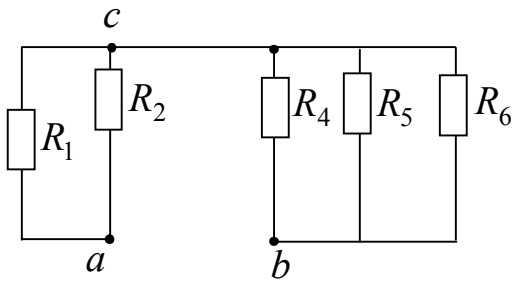


Рисунок 2.10− Схема электрической цепи рисунка 2.8 для расчета эквивалентного сопротивления

Рассчитаем эквивалентное сопротивление

$$R_{экв.} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_4R_5R_6}{R_4R_5 + R_6R_5 + R_4R_6} = \frac{12}{8} + \frac{12 \cdot 8 \cdot 10}{12 \cdot 8 + 8 \cdot 10 + 12 \cdot 10} = 4{,}74\ Ом.$$

Тогда ток I_3 вычистится по следующей формуле

$$I_3 = \frac{U_{XX} - E_3}{R_3 + R_{ЭКВ}} = -3{,}54\ A.$$

2.2 Методы расчета электрических цепей однофазного синусоидального тока

Пример. Рассчитать комплексные значения токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ и напряжений на участках $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}$, активную, реактивную и полную мощности и построить векторную диаграмму для электрической цепи, схема которой приведена рисунка 2.11, если известно, что $U = 120\ B$; $R_1 = 10\ Ом$; $R_2 = 24\ Ом$; $R_3 = 15\ Ом$; $L_1 = 19{,}1\ мГн$; $L_3 = 63{,}5\ мГн$; $C_2 = 455\ мкФ$; $f = 50\ Гц$.

Решение: Определим комплексные значения сопротивлений в ветвях цепи в алгебраической и показательной формах: $\underline{Z} = R \pm jX = Ze^{\pm j\varphi}$. Первая ветвь содержит активно индуктивное сопротивление, которое вычисляется по формуле в алгебраической форме $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = 10 + j6\,Ом$.

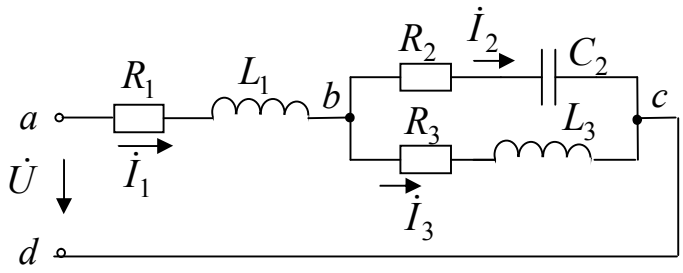


Рисунок 2.11 – Расчетная электрическая цепь

В показательной форме оно имеет вид $\underline{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi 1} = 11{,}6e^{j31^\circ}\ Ом$.

Вторая ветвь содержит активно емкостное сопротивление, которое вычисляется как $\underline{Z}_2 = R_2 - j\dfrac{1}{\omega C_2} = 24 - j7 = 25e^{-j16^\circ}\ Ом$.

Третья ветвь содержит активно индуктивное сопротивление, которое вычисляется как $\underline{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3 = 15 + j20 = 25e^{j\,53^\circ}\ Ом$.

Выразим заданное значение напряжения в комплексном виде

$\dot{U} = Ue^{j0^\circ} = 120\,B$.

Определим полное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_2\,\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 25{,}2 + j10{,}8 = 26{,}7e^{j23^\circ}\,Ом.$$

Определим токи в ветвях:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = 4{,}5e^{-j23^\circ} = (4{,}1 - j1{,}8)\ A;$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1\frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 2{,}7e^{j10^\circ} = (2{,}7 + j0{,}5)\ A;$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 2{,}7e^{-j58^\circ} = (1{,}4 - j2{,}3)\ A.$$

Запишем формулу для определения комплекса полной мощности цепи:

$$\widetilde{S} = \dot{U}\dot{I}^* = 540e^{j23^\circ} = 540\cos 23^\circ + j540\sin 23^\circ = (497 + j211)\ B\cdot A.$$

и из нее определим значения активной и реактивной мощности:

$P = 497\ Вт$; $Q = 211\ Вар$.

Построим векторную диаграмму и из нее определим значения напряжения $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}$ (рисунок 2.12). Для построения векторной диаграммы необходимо выбрать масштаб для значений напряжений и токов в ветвях схемы. Начнем построение векторной диаграммы с третьей ветви. Ток $\dot{I}_3 = 2{,}7e^{-j58^\circ}\ A$ протекает по резистору $R_3 = 15\ Ом$, вызывая на нем падение напряжения $\dot{U}_{R_3} = I_3 R_3 = 40{,}4e^{-j58^\circ} = (21{,}5 - j35)\ B$, причем этот ток и напряжение совпадают по фазе. Напряжение на индуктивном сопротивлении опережает ток на 90° и его значение равно $\dot{U}_{L_3} = I_3 X_{L_3} = 55{,}4e^{j31^\circ} = (46{,}5 - j28{,}5)\ B$. Сложим геометрически два вектора напряжения $\dot{U}_{R_3}$ и $\dot{U}_{L_3}$ получим вектор напряжения $\dot{U}_{вс}$, значение которого можно определить из векторной диаграммы, или так $\dot{U}_{вс} = \dot{U}_{R_3} + \dot{U}_{L_3} = 68{,}8e^{-j4^\circ} = (68 - j6{,}5)\ B$. Рассмотрим вторую схему ветви. Построим вектор тока $\dot{I}_2 = 2{,}7e^{j10^\circ}\ A$. Так как ток и напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе, вычислим значение $\dot{U}_{R_2} = \dot{I}_3 R_2 = 64{,}8e^{j10^\circ} = (64{,}4 + j12{,}3)\ B$ и построим его. На емкостном сопротивлении напряжение отстает от тока на 90°. Вычислим и построим $\dot{U}_{C_2} = \dot{I}_2 X_{C_2} = 18{,}9e^{-j79^\circ} = (3{,}6 - j18{,}8)\ B$. Сложим геометрически два вектора напряжения $\dot{U}_{R_2}$ и $\dot{U}_{C_2}$ получим вектор напряжения $\dot{U}_{вс}$. Построим первую ветвь. Ток $\dot{I}_1 = 4{,}5e^{-j23^\circ}\ A$ протекает по резистору R_1, вызывая на нем падение напряжения $\dot{U}_{R1} = \dot{I}_1 R_1 = 45e^{-j23^\circ} = (41{,}1 - j18{,}2)\ B$, причем этот ток и напряжение совпадают по фазе. Напряжение на индуктивном сопротивлении опережает ток на 90° и его значение равно $\dot{U}_{L_1} = \dot{I}_1 X_{L_1} = 27e^{j67^\circ} = (24{,}7 - j10{,}9)\ B$. Сложим геометрически два вектора напряжения $\dot{U}_{R_1}$ и $\dot{U}_{L_1}$ получим вектор напряжения $\dot{U}_{ав}$, значение которого можно определить из векторной диаграммы или так $\dot{U}_{ав} = \dot{U}_{R_1} + \dot{U}_{L_1} = 68{,}8e^{j8^\circ}\ B$. Сложив напряжения $\dot{U}_{ав}$ и $\dot{U}_{вс}$, получим значение напряжения, приложенное к цепи.

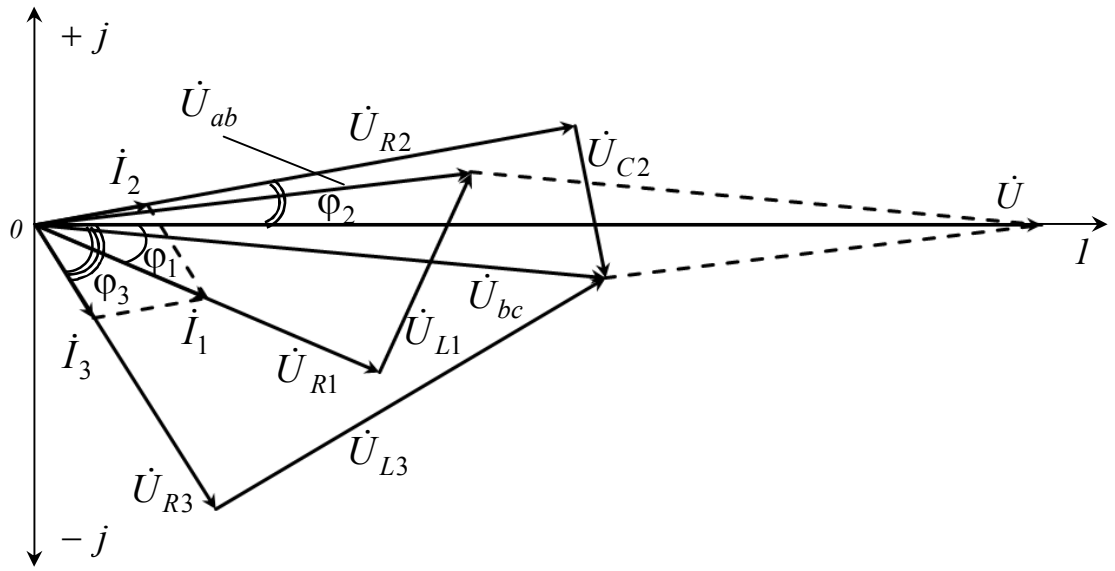


Рисунок 2.12 – Векторная диаграмма для электрической цепи рисунка 2.11

2.3 Методы расчета электрических цепей трехфазного тока

Пример 1. Для трехфазной электрической цепи рисунка 2.13 при соединении нагрузки звездой определить линейные и фазные токи, ток нулевого провода, активную, реактивную и полную мощность трехфазной цепи и построить векторную диаграмму, если известно, что фазное напряжение источника $U = 100\ B$, сопротивления резисторов $R_a = 10\ Ом;\ R_b = 8\ Ом;\ R_c = 2\ Ом;\ X_a = 4\ Ом;\ X_b = 2\ Ом;\ X_c = 10\ Ом.$

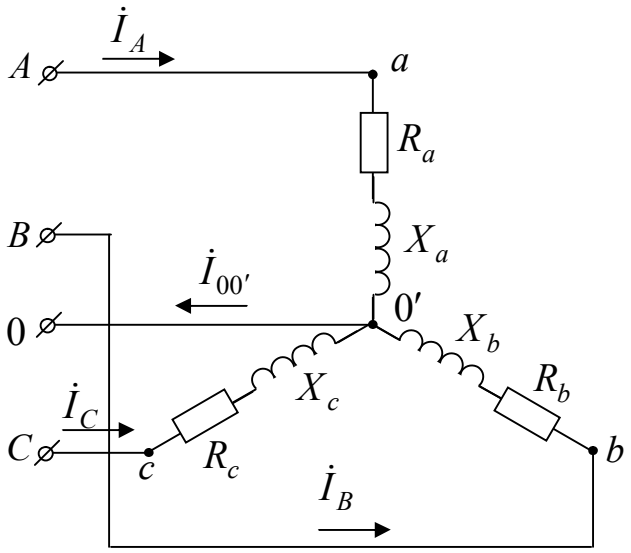


Рисунок 2.13 – Расчетная электрическая цепь

Решение. 1. Выберем направление линейных токов, зная, что они протекают от источника к нагрузке. Так нагрузка соединена звездой, то для нее справедливо равенство $I_Л = I_Ф$.

2. По определению трехфазной системы напряжения в каждой фазе источника определим так

$$\dot{U}_A = U_A = 100;$$

$$\dot{U}_B = U_A\, e^{-j120^\circ} = 100e^{-j120^\circ} = (50 - j86{,}6)\ B;$$

$$\dot{U}_C = U_A\, e^{j120^\circ} = 100_A\, e^{j120^\circ} = (-50 + j86{,}6)\ B.$$

3. Определим сопротивления в каждой фазе нагрузки

$$\underline{Z}_a = R_a + jX_a = 10 + j4 = 10{,}8e^{j22^\circ}\ Ом;$$

$$\underline{Z}_b = R_b + jX_b = 8 + j2 = 8{,}2e^{j14^\circ}\ Ом;$$

$$\underline{Z}_c = R_c + jX_c = 2 + j10 = 10{,}2e^{j79^\circ}\ Ом.$$

4 Определим проводимости в фазах нагрузки

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a} = \frac{1}{10 + j4} = 0{,}093e^{-j22^\circ}\ Ом^{-1};$$

$$\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b} = \frac{1}{8 + j2} = 0{,}12e^{-j14^\circ}\ Ом^{-1};$$

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{2 + j10} = 0{,}098e^{-j79^\circ}\ Ом^{-1}.$$

5 Определим напряжение между нейтральными точками 0 и 0′ по методу двух узлов

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{U}_A\underline{Y}_a + \dot{U}_B\underline{Y}_b + \dot{U}_C\underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_{00'}} = (6{,}7 - j3{,}8) = 7{,}7e^{-j30^\circ}\ B.$$

6 Найдем напряжения на фазах нагрузки через напряжения на фазах приемника и напряжение нулевого провода

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{00'} = (93{,}3 + j3{,}8) = 93{,}4e^{j2^\circ}\ B;$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{00'} = (-56{,}7 - j82{,}8) = 100{,}4e^{j56^\circ}\ B;$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{00'} = (-56{,}7 + j90{,}4) = 106{,}7e^{-j58^\circ}\ B.$$

7 Зная напряжения на фазах нагрузки, определим токи, учитывая, что для нагрузки соединенной звездой, справедливо равенство $I_Л = I_Ф$.

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = (\dot{U}_A - \dot{U}_{00'})\,\underline{Y}_a = (8{,}2 - j2{,}9) = 8{,}7e^{-j20^\circ}\ A;$$

$$I_B = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = (\dot{U}_B - \dot{U}_{00'})\,\underline{Y}_b = (-9{,}1 - j8{,}1) = 12{,}2e^{j42^\circ}\,A;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = (\dot{U}_C - \dot{U}_{00'})\underline{Y}_c = (7{,}6 + j7{,}2) = 10{,}5e^{-j137^\circ}\,A;$$

$$\dot{I}_{00'} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = (6{,}7 - j3{,}8) = 7{,}7e^{-j30^\circ}\,A.$$

8 Вычислим комплекс полной мощности трехфазной цепи

$$\widetilde{S} = \dot{U}_A\dot{I}_A^* + \dot{U}_B\dot{I}_B^* + \dot{U}_C\dot{I}_C^* = (2156 + j1691)\,B\cdot A.$$

Из полученных значений для комплекса полной мощности цепи, можно определить значения активной мощности $P = 2156\,Вт$ и значения реактивной мощности $Q = 1691\,Вар$ трехфазной цепи.

Построим векторную диаграмму. Для построения векторной диаграммы, необходимо выбрать масштаб для значений токов и напряжений, причем масштабы для токов и напряжений необязательно должны быть одинаковыми. Построим на векторной диаграмме напряжения, на каждой фазе источника, учитывая, что источник симметричный и сдвиг фаз составляет между фазами 120°. Построим значение напряжения нулевого провода. Из значений напряжений на фазах источника и значения нулевого провода определим из векторной диаграммы с учетом выбранного масштаба значения напряжения на фазах нагрузки. Сравним рассчитанные значения напряжений на фазах нагрузки и полученные из векторной диаграммы. На векторной диаграмме построим значения токов. Построенная диаграмма приведена на рисунке 2.14.

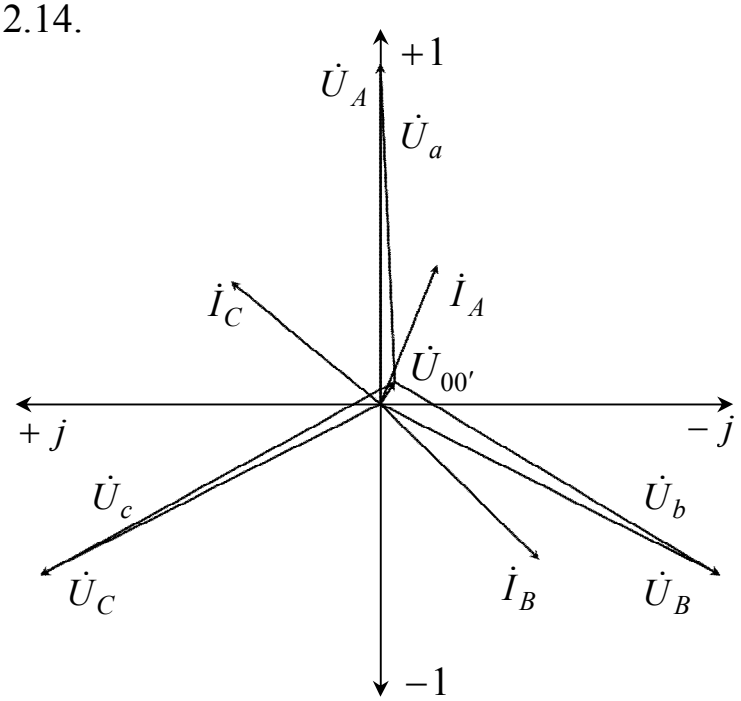


Рисунок 2.14 – Векторная диаграмма для электрической цепи рисунка 2.13

Пример 2. Для трехфазной электрической цепи рисунка 2.15 при соединении нагрузки треугольником определить линейные и фазные токи, активную, реактивную и полную мощность трехфазной цепи и построить векторную диаграмму, если известно, что линейное напряжение источника $U = 127\ B$, сопротивления резисторов $R_a = 4\ Ом;\ R_b = 12\ Ом;\ R_c = 6\ Ом;$ $X_a = 8\ Ом;\ X_b = 2\ Ом;\ X_c = 4\ Ом.$

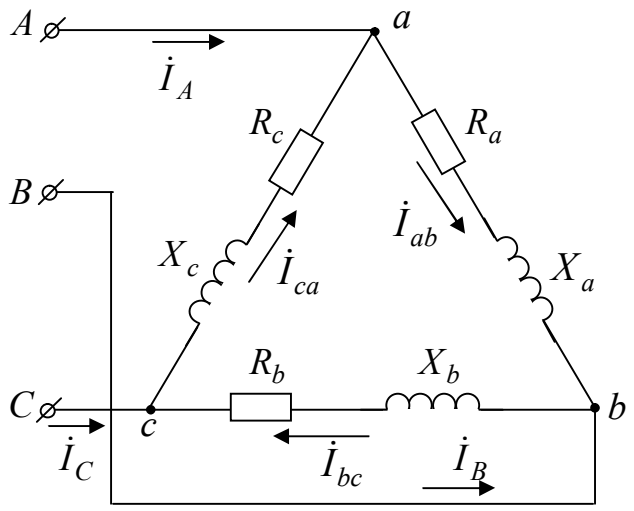


Рисунок 2.15 – Расчетная электрическая цепь

Решение. 1. Выберем направление линейных и фазных токов. Для нагрузки соединенной треугольником напряжения $U_Л = U_Ф$.

2. По определению трехфазной системы напряжения в каждой фазе источника определим так

$$\dot{U}_{AB} = U = 127\ B;$$

$$\dot{U}_{BC} = U\ e^{-j120^\circ} = 127e^{-j120^\circ} = (-63{,}5 - j110)\ B;$$

$$\dot{U}_{CA} = U\ e^{j120^\circ} = 127\ e^{j120^\circ} = (-63{,}5 + j110)\ B.$$

3. Вычислим сопротивления в каждой фазе нагрузки

$$\underline{Z}_a = R_a + jX_a = 4 + j8 = 8{,}9e^{j63^\circ}\ Ом;$$

$$\underline{Z}_b = R_b + jX_b = 12 + j2 = 12{,}2e^{j10^\circ}\ Ом;$$

$$\underline{Z}_c = R_c + jX_c = 6 + j4 = 7{,}2e^{j34^\circ}\ Ом.$$

4. Зная сопротивление фаз приемника, вычислим фазные токи по закону Ома учитывая, что $U_{AB} = U_{ав};\ U_{BC} = U_{вс};\ U_{CA} = U_{са}$:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = 6{,}4 - j12{,}7 = 14{,}2e^{j63^\circ}\ A;$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = -6{,}6 - j8{,}1 = 10{,}5e^{-j129^\circ}\ A;$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = 1{,}1 + j18 = 18e^{j87^\circ}\ A.$$

5. Применяя первое правило Кирхгофа к узловым точкам $a;\ b;\ c$, вычислим линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 5{,}3 + j30{,}7 = 32{,}2e^{-j80^\circ}\ A;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -13 + j4{,}6 = 13{,}8e^{j161^\circ}\ A;$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 17{,}7 + j26{,}1 = 31{,}5e^{j56^\circ}\ A.$$

6. Вычислим комплекс полной мощности трехфазной цепи

$$\widetilde{S} = \dot{U}_A \dot{I}_A^* + \dot{U}_B \dot{I}_B^* + \dot{U}_C \dot{I}_C^* = (3303 + j8050)\ B \cdot A.$$

Активную мощность трехфазной цепи вычислим так

$$P = U_A I_A \cos\varphi_A + U_B I_B \cos\varphi_B + U_C I_C \cos\varphi_C = 3303\ Вт.$$

Реактивную мощность трехфазной цепи вычислим так

$$Q = U_A I_A \sin\varphi_A + U_B I_B \sin\varphi_B + U_C I_C \sin\varphi_C = 8050\ Вар.$$

7. Построим векторную диаграмму. Для построения векторной диаграммы, необходимо выбрать масштаб для значений токов и напряжений, причем масштабы для токов и напряжений необязательно должны быть одинаковыми. Построим на векторной диаграмме напряжения, на каждой фазе источника, учитывая, что источник симметричный и сдвиг фаз составляет 120°, т. е. необходимо построить следующие значения напряжений

$$\dot{U}_A = U_A = 127\ B;\ \dot{U}_B = U_A\ e^{-j120^\circ} = 127e^{-j120^\circ} = (-63{,}5 - j110)\ B;$$

$$\dot{U}_C = U_A\ e^{j120^\circ} = 127\ e^{j120^\circ} = (-63{,}5 + j110)\ B.$$

Затем построим вычисленные значения токов на фазах приемника $\dot{I}_{ab} = 14{,}2e^{j63^\circ}\ A;\ \dot{I}_{bc} = 10{,}5e^{-j129^\circ}\ A;\ \dot{I}_{ca} = 18e^{j87^\circ}\ A$. Учитывая связь между фазными и линейными токами на основании первого правила Кирхгофа, построим линейные токи на векторной диаграмме $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca};\ \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab};\ \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$ и, учитывая выбранный масштаб, определим значения линейных токов по векторной диаграмме, значения которых должны совпасть с вычисленными ранее значениями. Сравним рассчитанные эти значения. Построенная диаграмма приведена на рисунке 2.16.

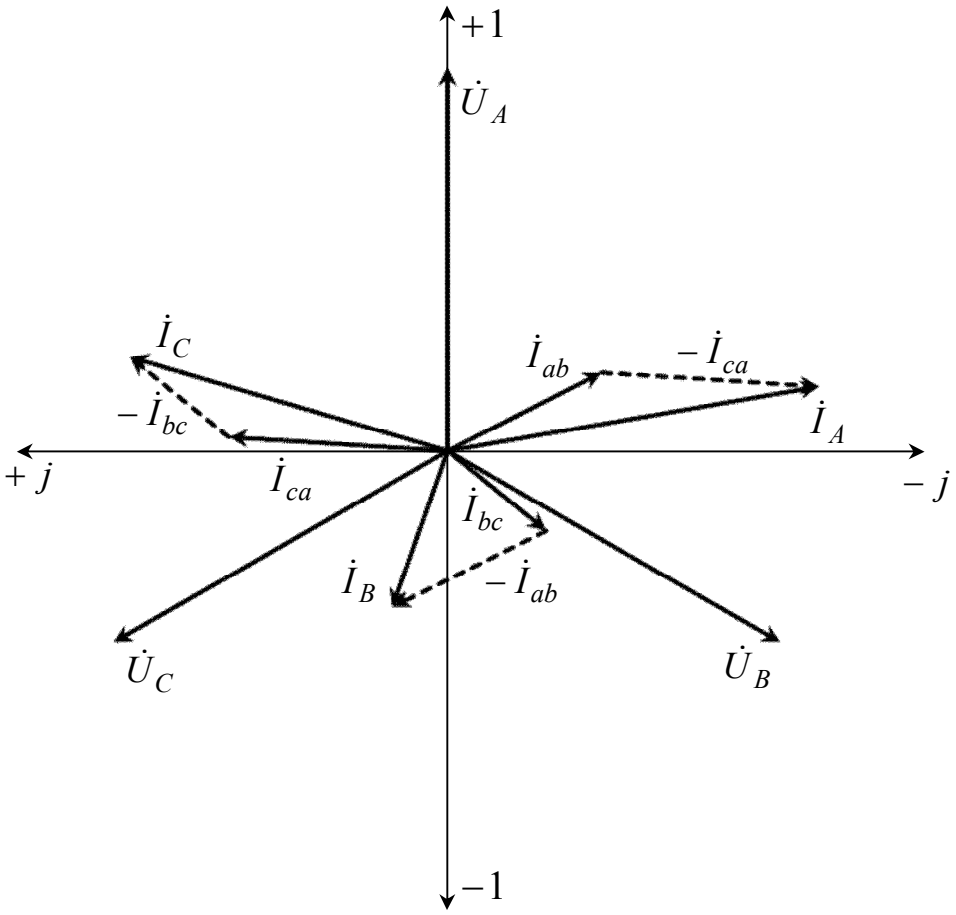


Рисунок 2.16 – Векторная диаграмма для электрической цепи рисунка 2.15

3 Контрольная работа № 1
Расчет сложных цепей постоянного тока

Для электрических цепей, схемы, которых приведены на рисунках 3.1- 3.50 и для заданных в таблице 3.1 значений ЭДС и сопротивлений резисторов, вычислить следующими методами:

− действующие значения токов по первому и второму правилам Кирхгофа;

− действующие значения токов по методу контурных токов;

− перерисовать схему, исключая источники ЭДС E_2, E_3, рассчитать действующие значения токов в полученной схеме с одним источником ЭДС (ЭДС E_1), применив «метод свертки»;

− перерисовать схему, исключив источник ЭДС E_3 и для электрической цепи с ЭДС E_1, E_2, рассчитать действующие значения токов, применив метод наложения;

− упростить схему, заменив треугольник сопротивлений R_4, R_5, R_6 эквивалентной звездой. Начертить полученную схему и рассчитать действующие значения токов в полученной схеме, применив метод узловых потенциалов;

− определить ток в резисторе R_6 методом эквивалентного генератора.

Примечание: При выполнении контрольной работы необходимо использовать раздел 1.1 основных сведений из теории электрических цепей, а также примеры решения типовых задач из раздела 2.1.

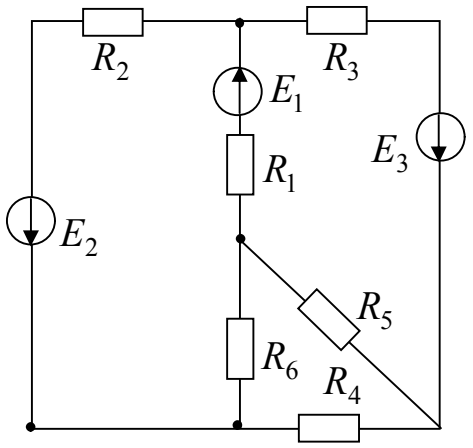


Рисунок 3.1

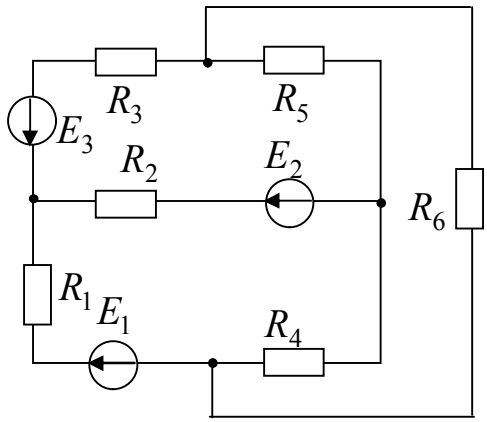


Рисунок 3.2

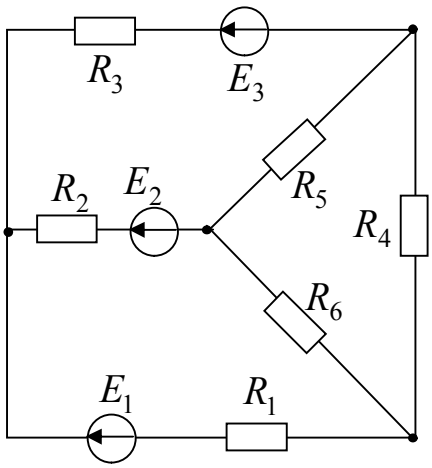


Рисунок 3.3

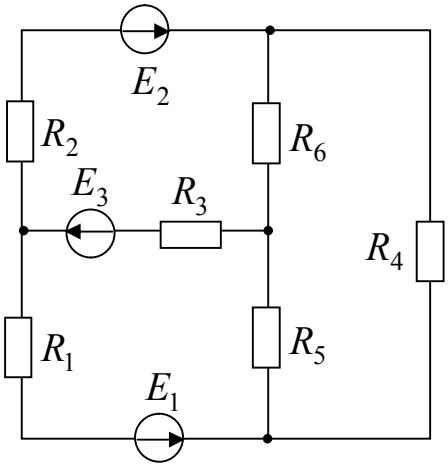


Рисунок 3.4

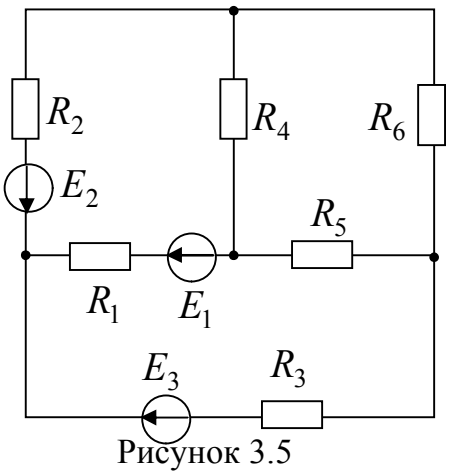


Рисунок 3.5

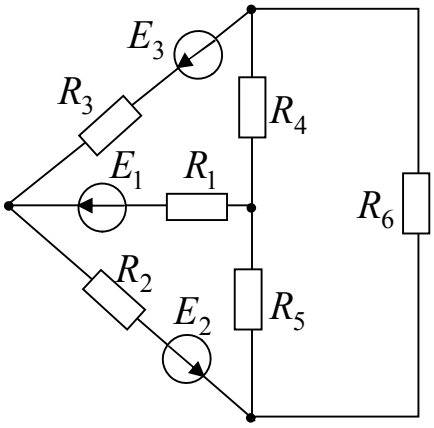


Рисунок 3.6

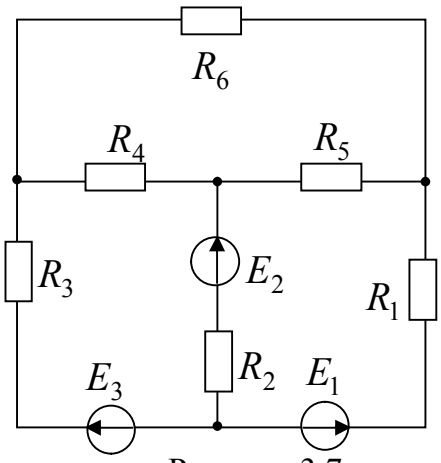


Рисунок 3.7

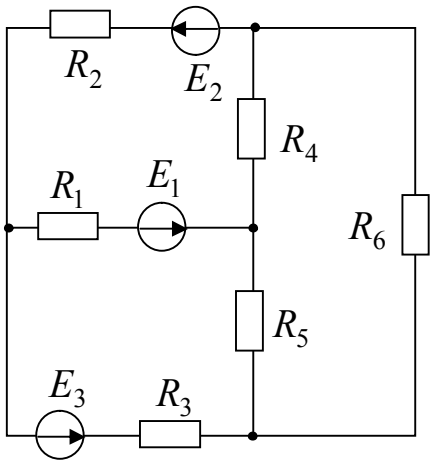


Рисунок 3.8

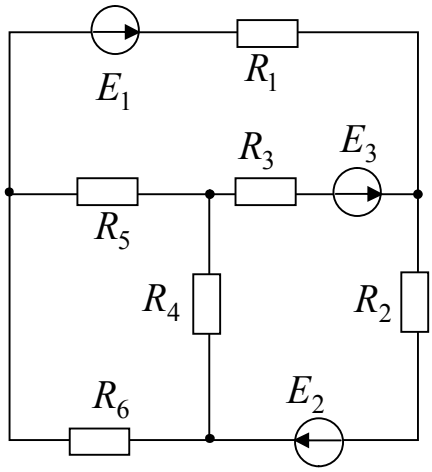


Рисунок 3.9

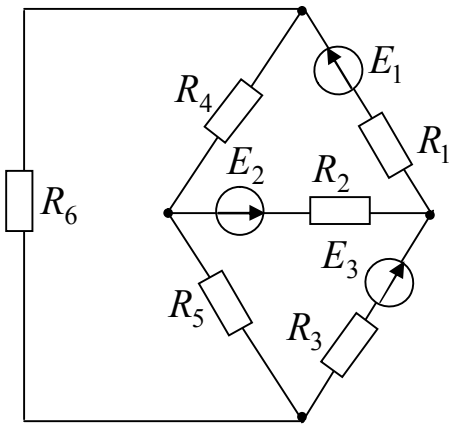


Рисунок 3.10

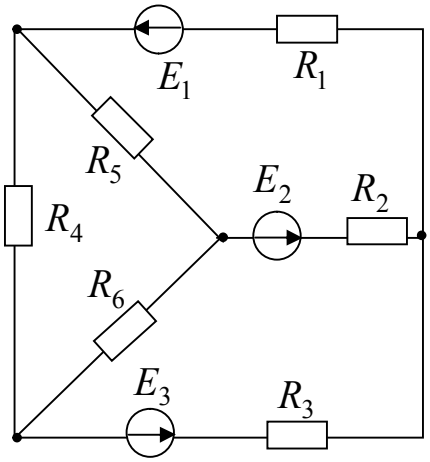


Рисунок 3.11

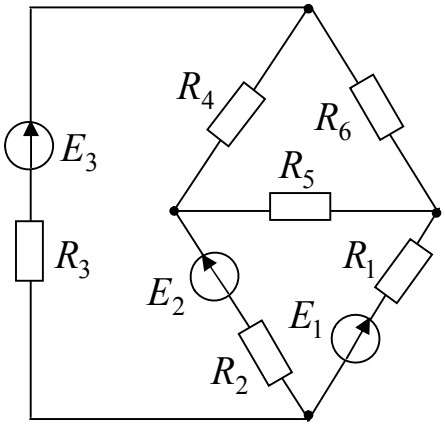


Рисунок 3.12

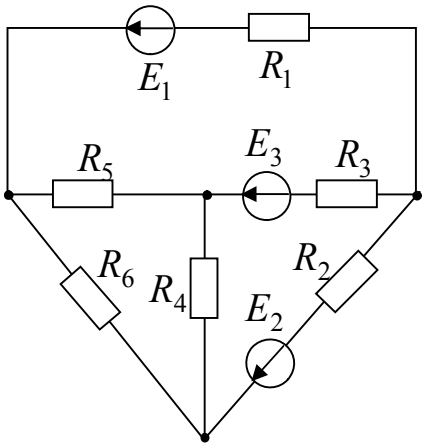


Рисунок 3.13

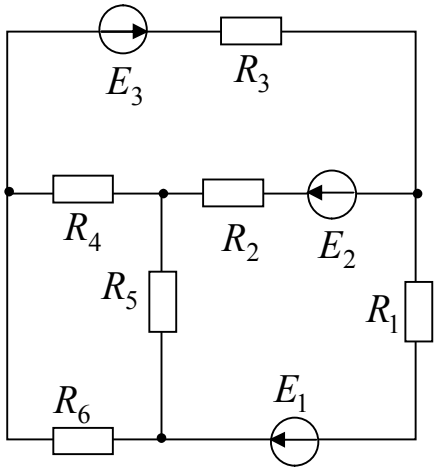


Рисунок 3.14

Рисунок 3.15

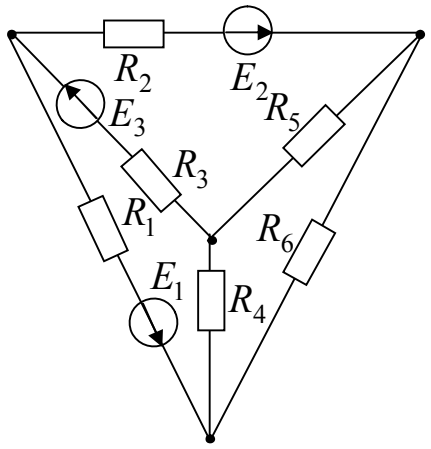


Рисунок 3.16

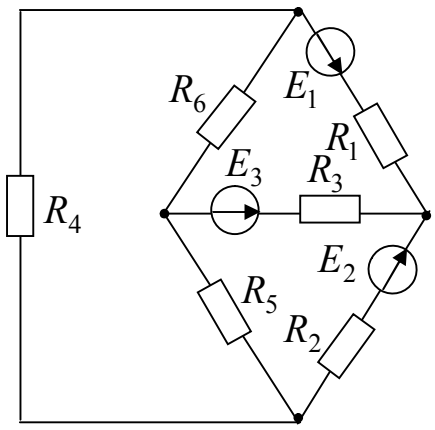


Рисунок 3.17

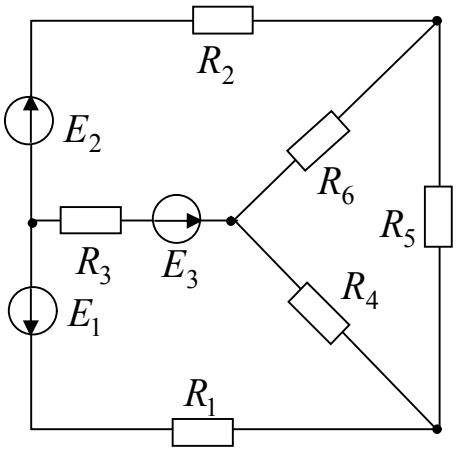


Рисунок 3.18

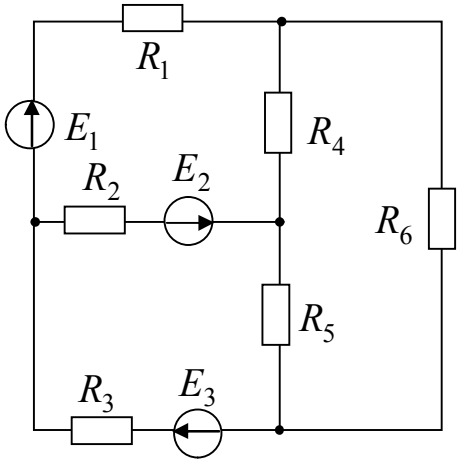


Рисунок 3.19

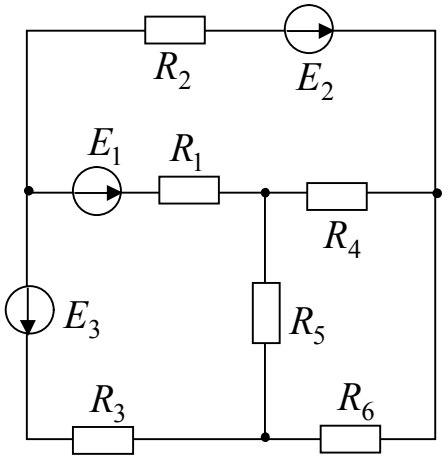
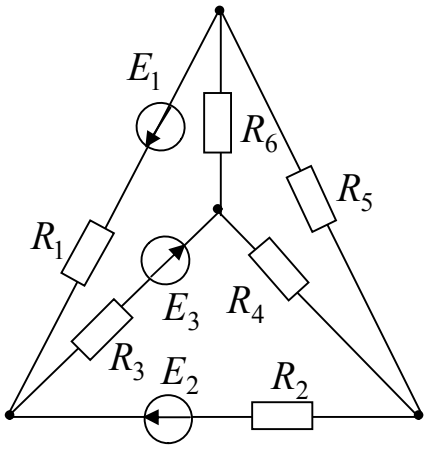


Рисунок 3.20



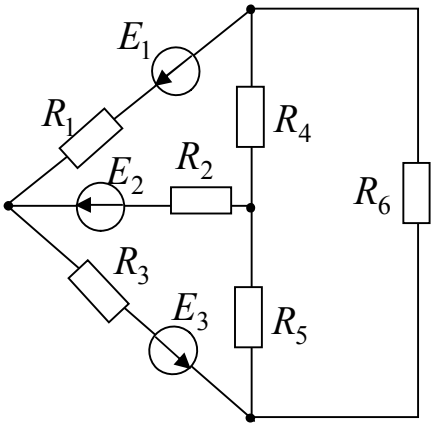


Рисунок 3.21

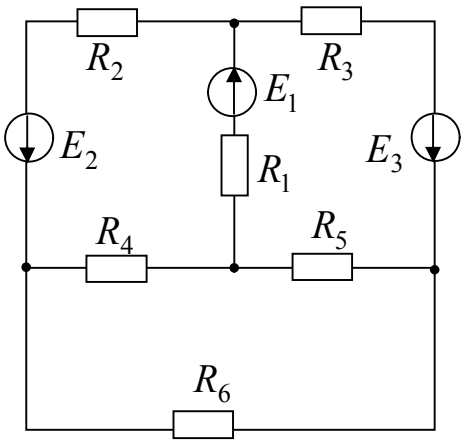


Рисунок 3.22

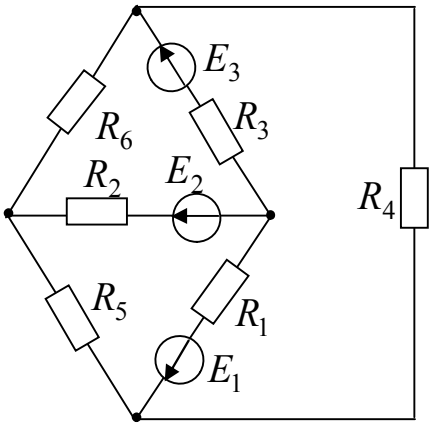


Рисунок 3.23

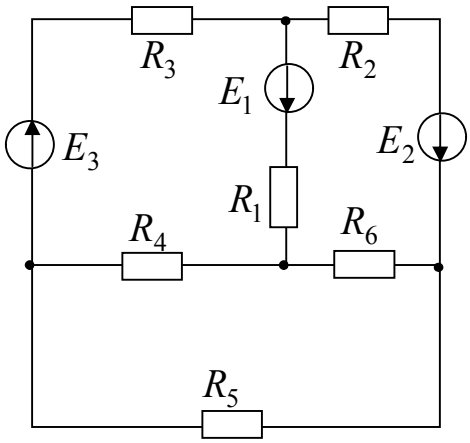


Рисунок 3.24

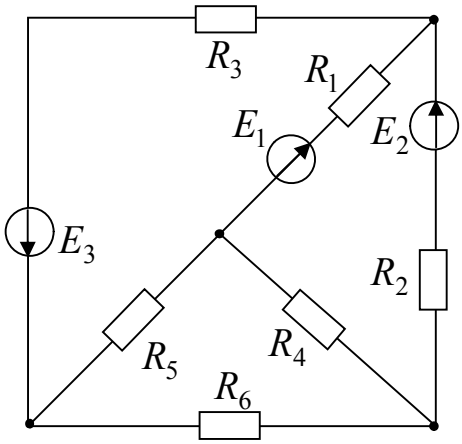


Рисунок 3.25

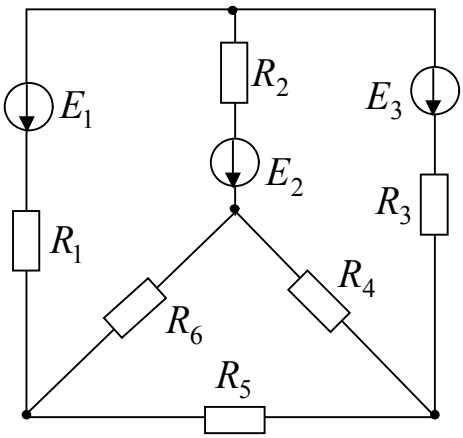


Рисунок 3.26

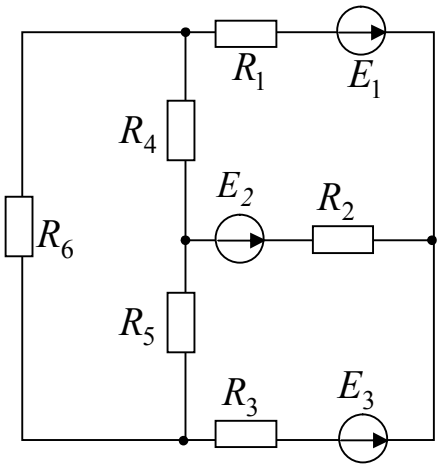


Рисунок 3.27

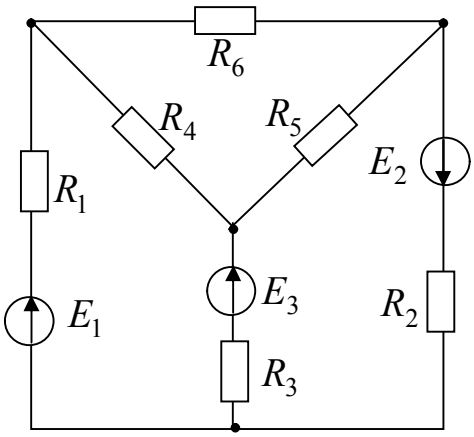


Рисунок 3.28

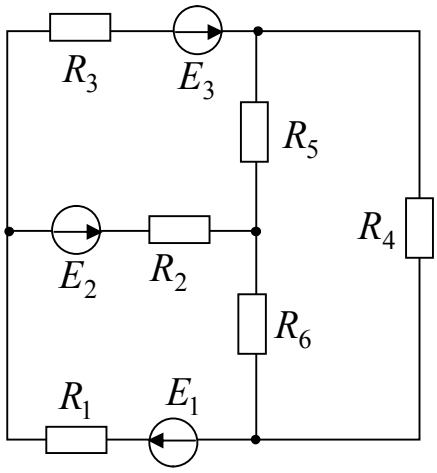


Рисунок 3.29

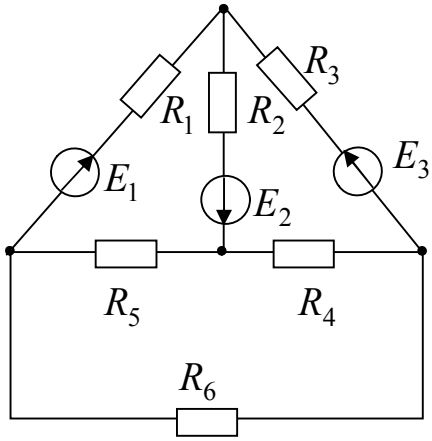


Рисунок 3.30

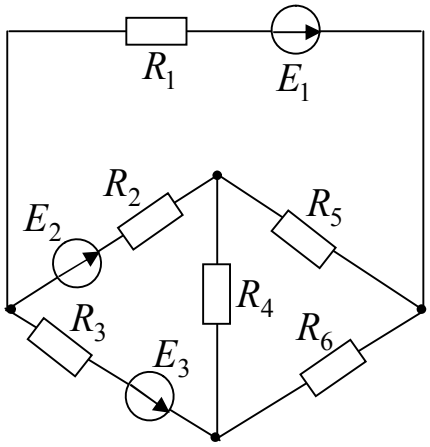


Рисунок 3.31

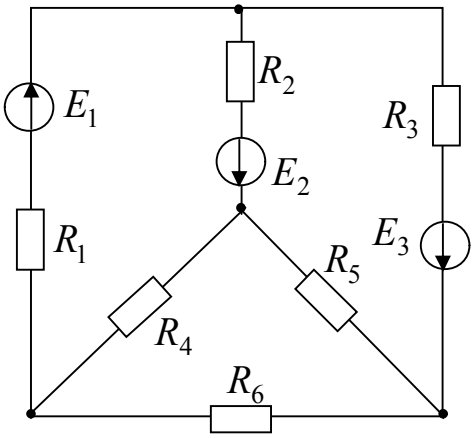


Рисунок 3.32

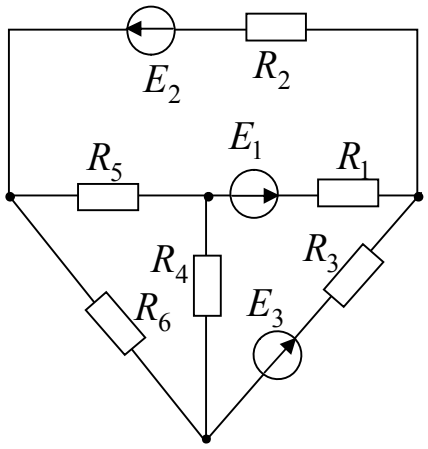


Рисунок 3.33

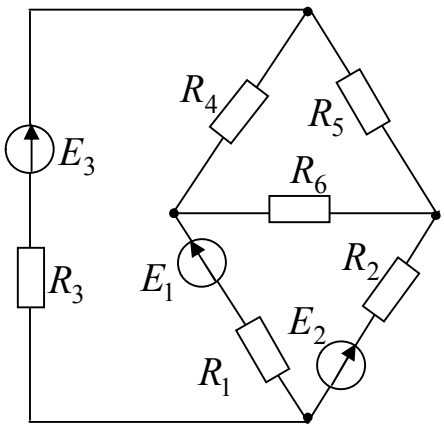


Рисунок 3.34

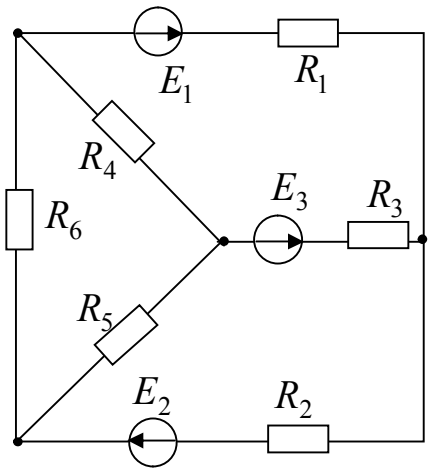


Рисунок 3.35

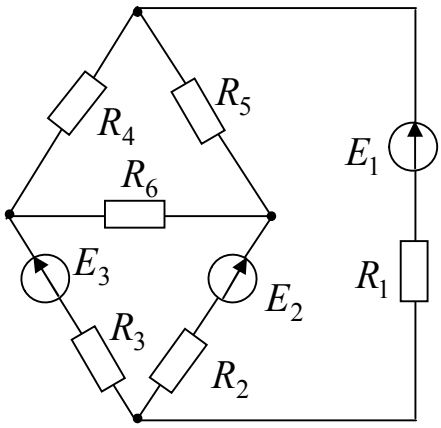


Рисунок 3.36

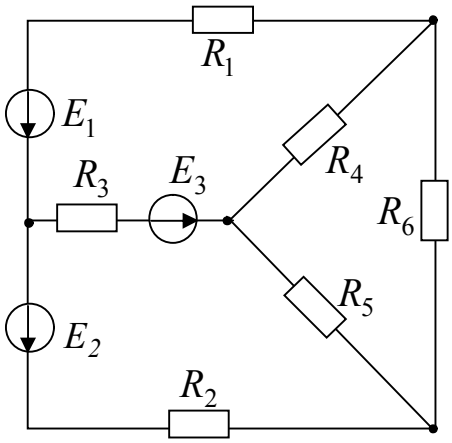


Рисунок 3.37

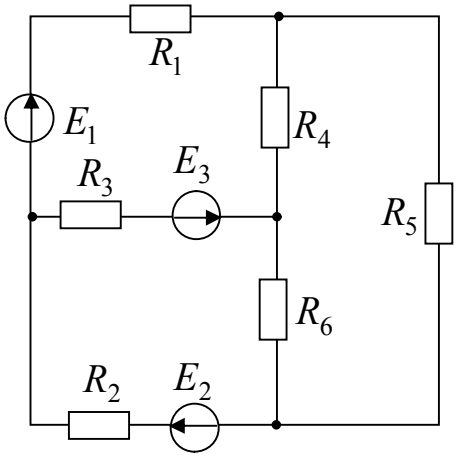


Рисунок 3.38

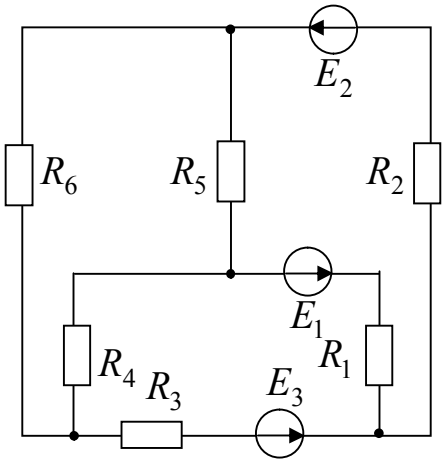


Рисунок 3.39

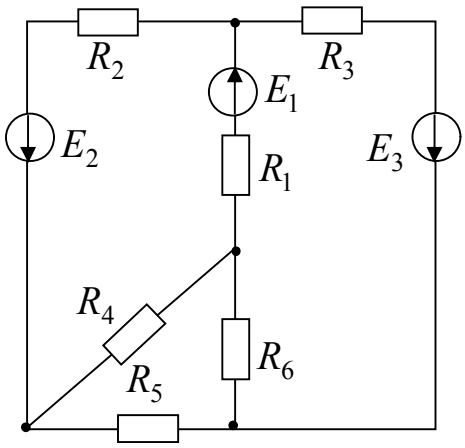


Рисунок 3.40

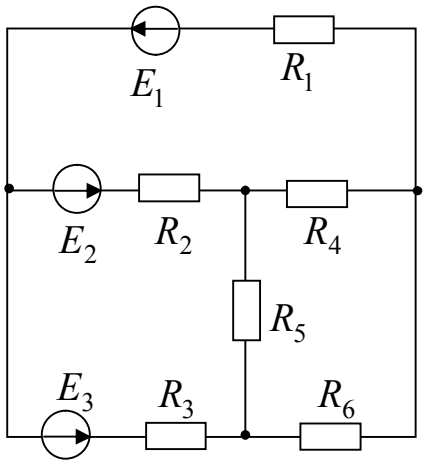


Рисунок 3.41

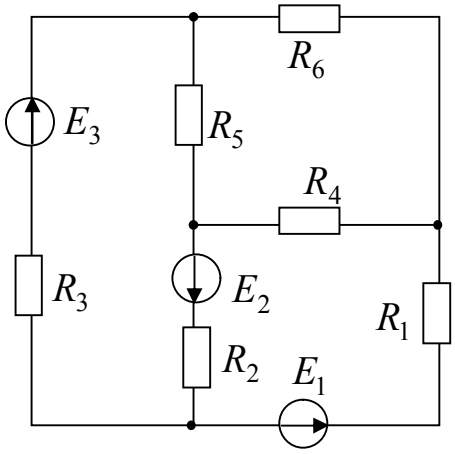


Рисунок 3.42

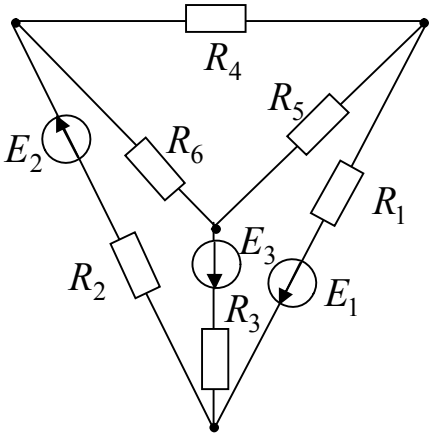


Рисунок 3.43

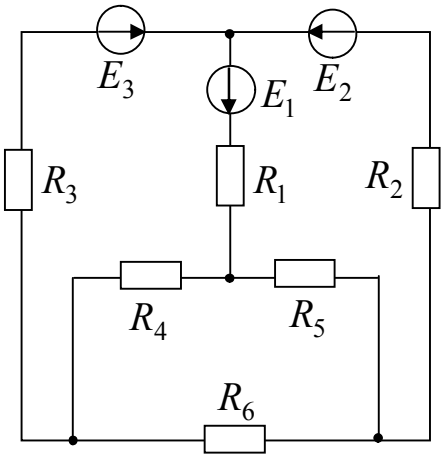


Рисунок 3.44

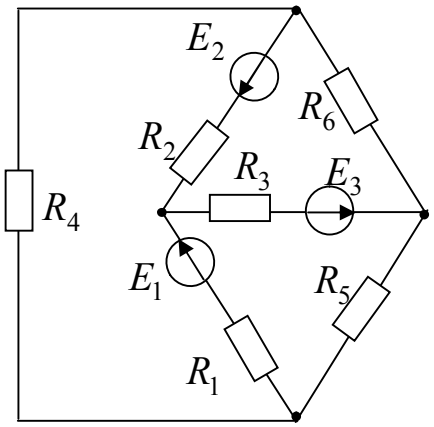


Рисунок 3.45

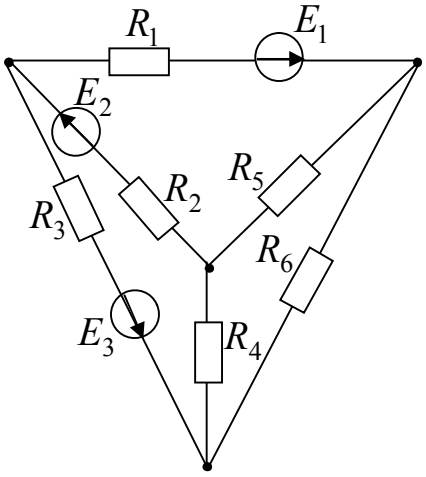


Рисунок 3.46

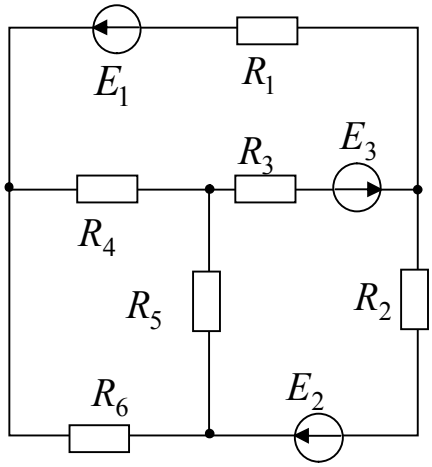


Рисунок 3.47

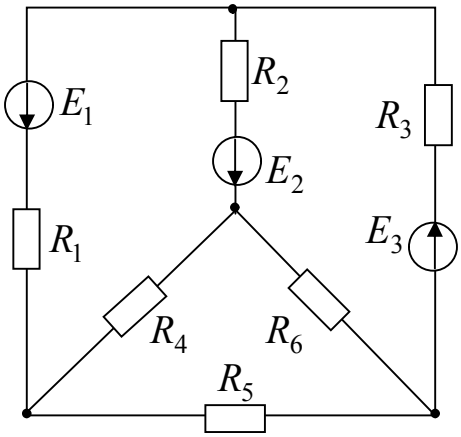


Рисунок 3.48

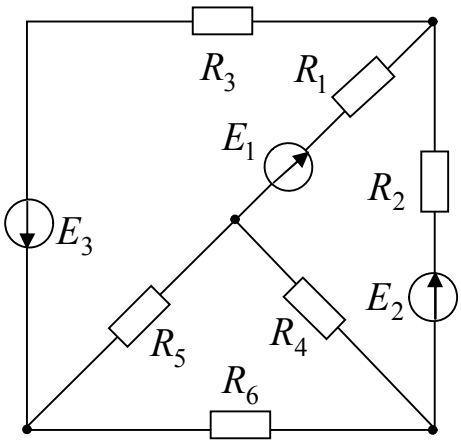


Рисунок 3.49

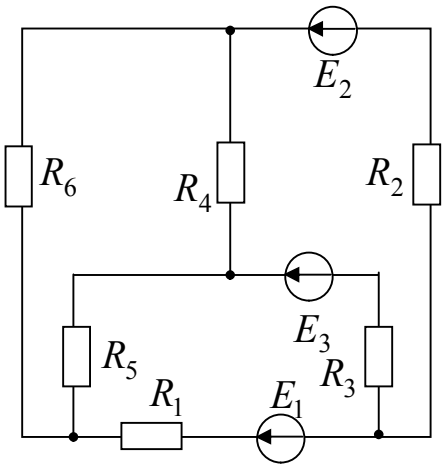


Рисунок 3.50

Таблица 3.1 − Значения ЭДС и сопротивлений резисторов для цепей, схемы которых приведены на рисунках 3.1- 3.50

№ вар.	№ рис.	E_1, В	E_2, В	E_3, В	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	R_5, Ом	R_6, Ом
1	3.1	24	10	6	4	10	6	2	6	3
2	3.2	55	18	4	2	4	4	8	12	8
3	3.3	36	10	25	1	2	7	2	4	5
4	3.4	16	5	36	4	10	5	6	8	6
5	3.5	14	25	28	2	2	6	4	9	12
6	3.6	20	22	0	3	8	4	10	6	8
7	3.7	10	6	24	3	5	6	6	3	1
8	3.8	6	20	4	4	6	4	4	3	3
9	3.9	21	4	10	5	7	2	8	1	1
10	3.10	4	9	18	7	10	4	8	10	2
11	3.11	4	24	6	9	8	6	6	10	4
12	312	16	8	9	5	6	6	5	10	5
13	3.13	48	12	6	2	4	2	12	6	2
14	3.14	12	36	12	5	5	1	5	6	9
15	3.15	12	6	40	2	3	8	5	7	8
16	3.16	8	6	36	3	2	1	6	8	6
17	3.17	72	12	4	6	1	10	4	12	4
18	3.18	12	48	6	2	1	4	15	2	2
19	3.19	12	30	9	3	2	3	3	1	3
20	3.20	9	6	27	4	2	8	13	4	3
21	3.21	15	63	6	5	3	1	2	12	3
22	3.22	54	27	3	8	3	1	4	2	2
23	3.23	36	9	24	3	4	2	1	5	1
24	3.24	3	66	9	1	4	2	2	7	3
25	3.25	12	30	25	1	5	1	1	6	4
26	3.26	30	16	10	2	5	3	1	8	5
27	3.27	10	32	10	1	6	1	7	1	5
28	3.28	5	10	36	1	6	3	2	2	2
29	3.29	40	25	8	3	3	2	4	3	2
30	3.30	8	40	10	5	3	3	3	2	1
31	3.31	22	24	10	2	1	8	4	10	6
32	3.32	55	18	4	8	4	3	2	4	4
33	3.33	36	10	25	4	8	3	1	2	7
34	3.34	16	5	32	9	3	2	4	1	5
35	3.35	14	25	28	5	2	8	2	2	6
36	3.36	5	16	30	6	4	3	2	5	3
37	3.37	10	6	24	5	5	6	6	3	1
38	3.38	6	20	4	4	6	4	4	3	3
39	3.39	21	4	10	5	7	2	8	1	1
40	3.40	4	9	18	7	10	4	8	10	2
41	3.41	4	4	6	8	1	6	10	4	5
42	3.42	16	8	9	2	6	6	5	10	5
43	3.43	48	12	6	4	4	2	12	6	2
44	3.44	12	36	12	5	5	1	5	6	9
1.45	3.45	12	6	40	2	3	8	5	7	8
46	3.46	20	24	36	6	8	10	5	12	5
47	3.47	60	22	48	10	6	16	8	12	7
48	3.48	16	10	30	3	4	6	10	12	16
49	3.49	25	22	24	18	16	10	4	8	16
50	3.50	30	10	5	4	6	8	8	6	4

4 Контрольная работа № 2

Расчет электрических цепей однофазного синусоидального тока

Для электрических цепей, схемы которых, приведенных на рисунках 4.1 − 4.50 и заданных в таблице 4.1 значений ЭДС, сопротивлений резисторов, индуктивностей, емкостей и частоты вычислить комплексные значения токов в ветвях, значения комплекса полной мощности и построить векторные диаграммы.

Примечание: При выполнении контрольной работы необходимо использовать раздел 1.2 основных сведений из теории электрических цепей, а также примеры решения типовых задач из раздела 2.2.

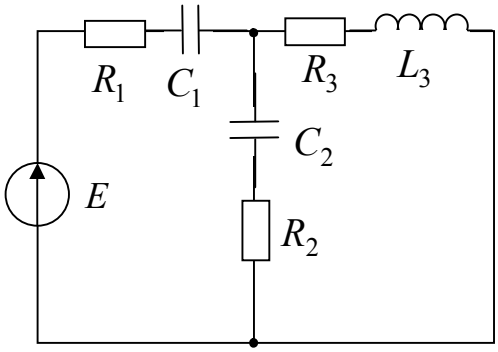


Рисунок 4.1

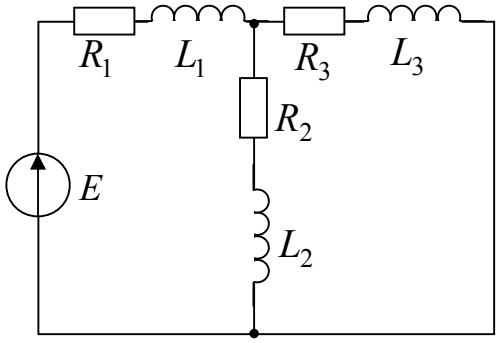


Рисунок 4.2

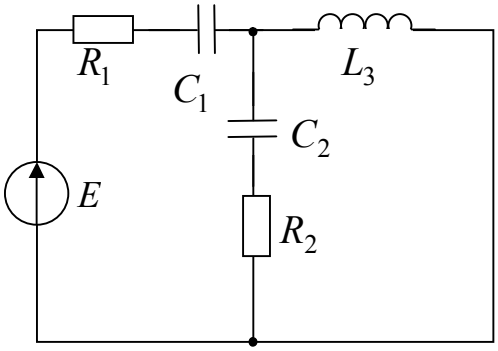


Рисунок 4.3

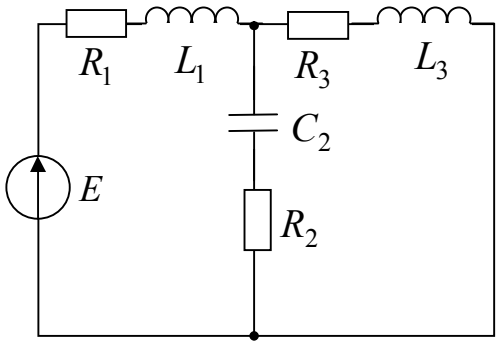


Рисунок 4.4

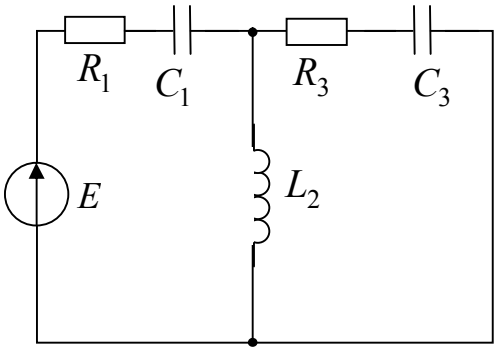


Рисунок 4.5

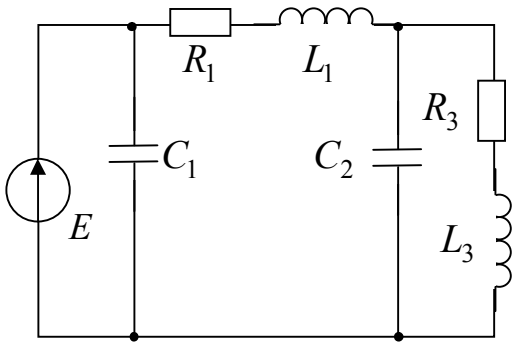


Рисунок 4.6

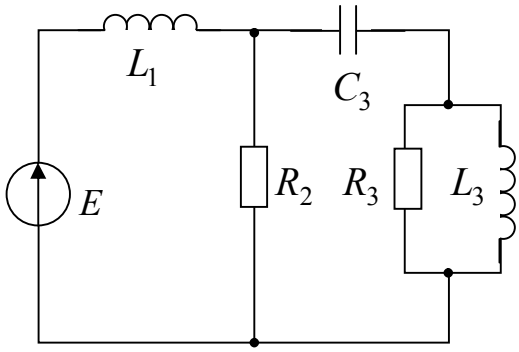


Рисунок 4.7

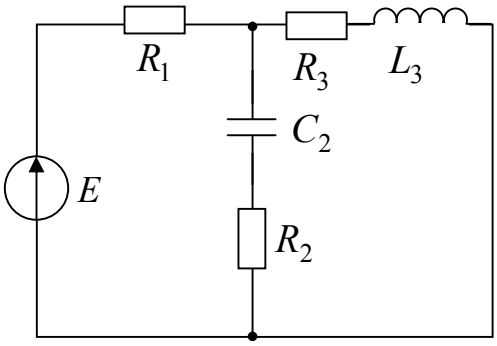


Рисунок 4.8

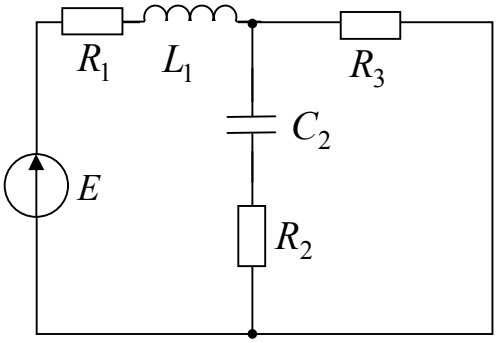


Рисунок 4.9

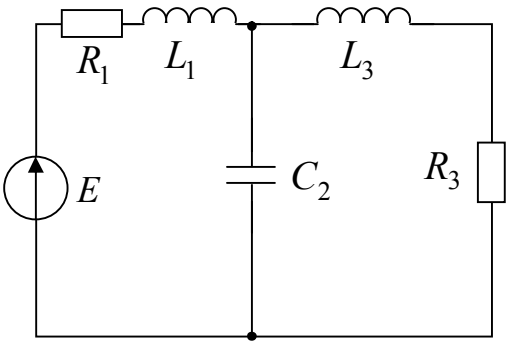


Рисунок 4.10

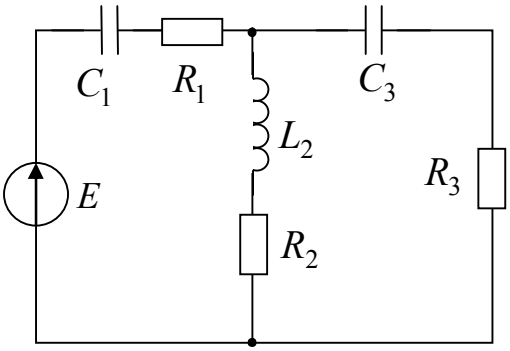


Рисунок 4.11

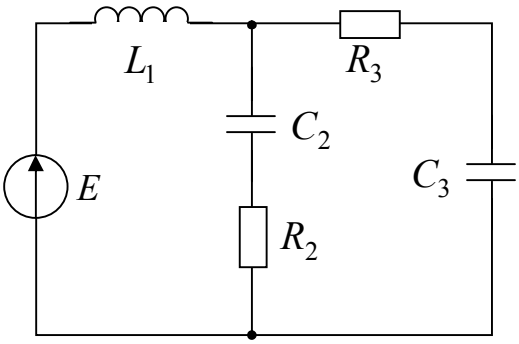


Рисунок 4.12

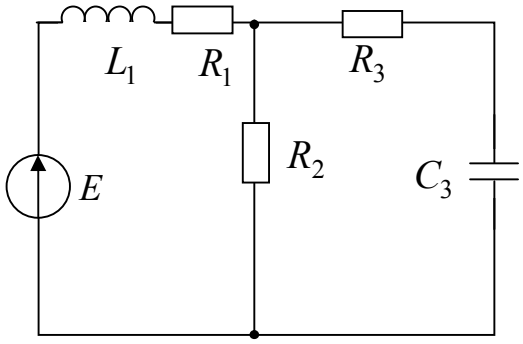


Рисунок 4.13

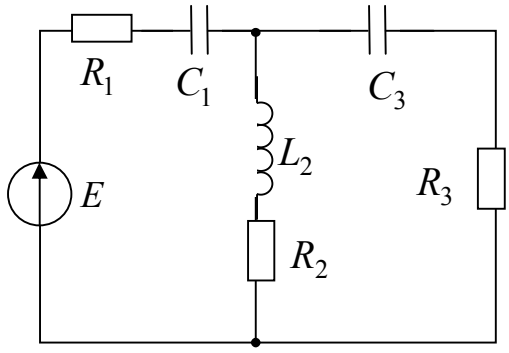


Рисунок 4.14

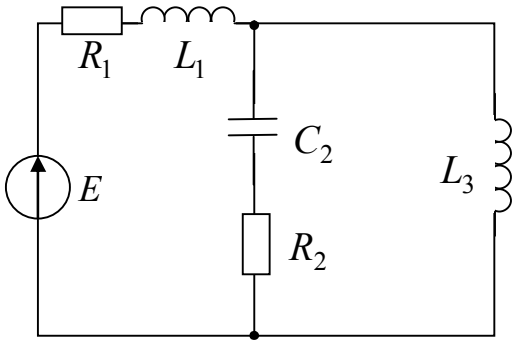


Рисунок 4.15

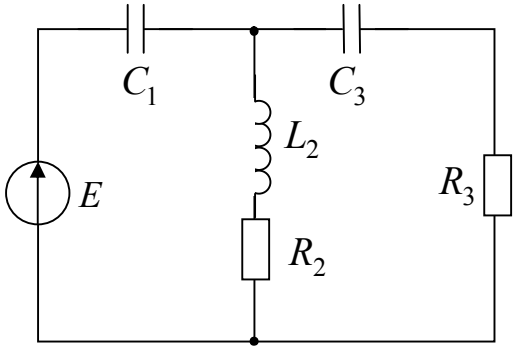


Рисунок 4.16

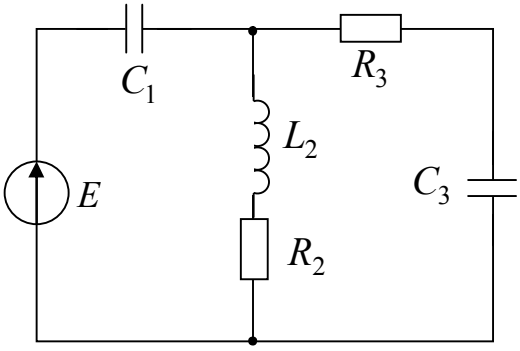


Рисунок 4.17

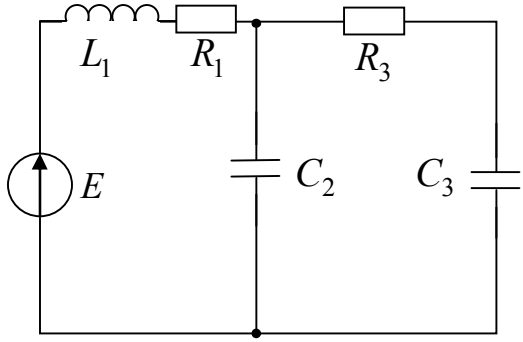


Рисунок 4.18

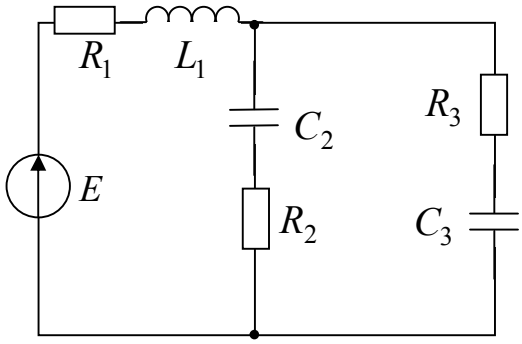


Рисунок 4.19

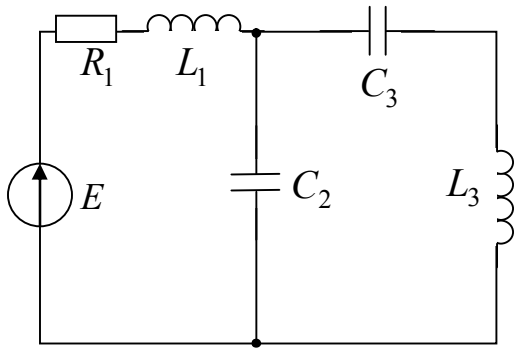


Рисунок 4.20

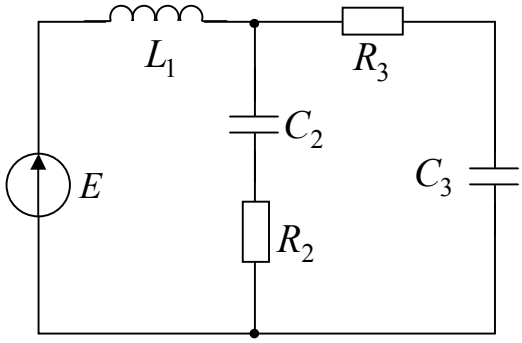


Рисунок 4.21

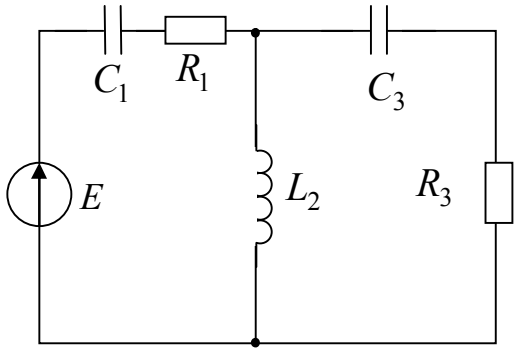


Рисунок 4.22

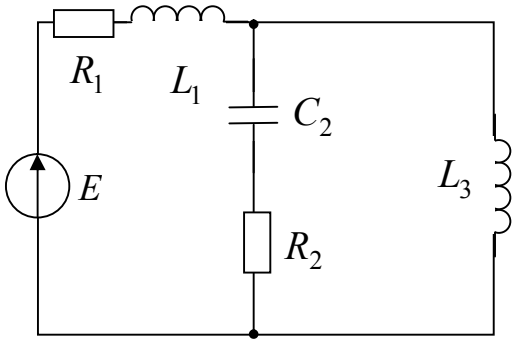


Рисунок 4.23

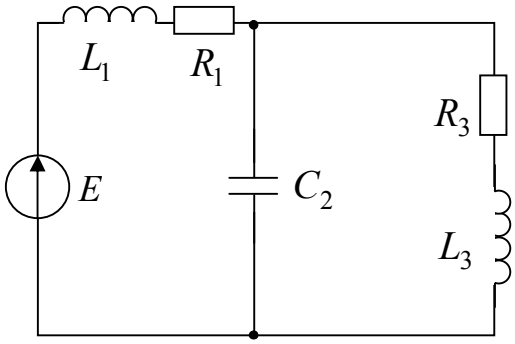


Рисунок 4.24

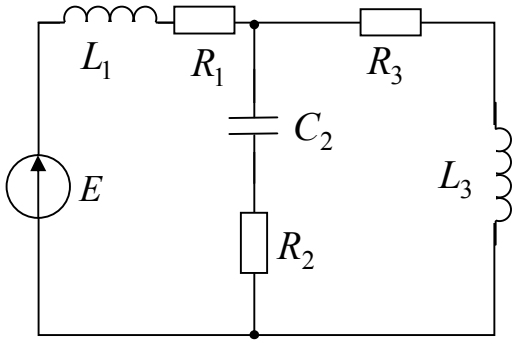


Рисунок 4.25

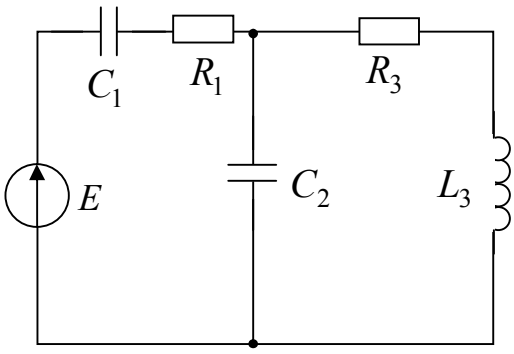


Рисунок 4.26

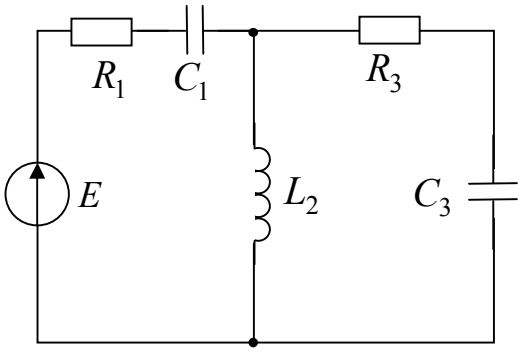


Рисунок 4.27

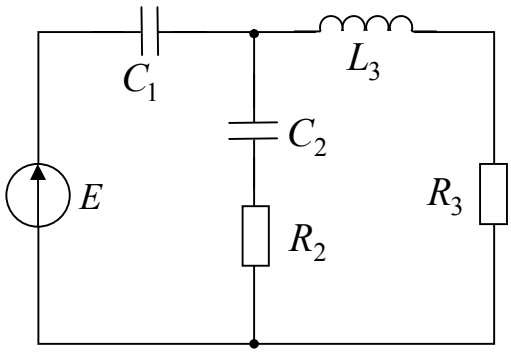


Рисунок 4.28

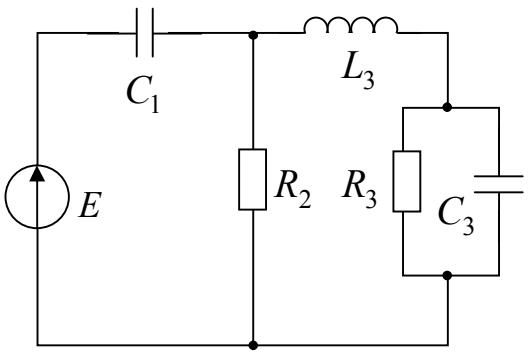


Рисунок 4.29

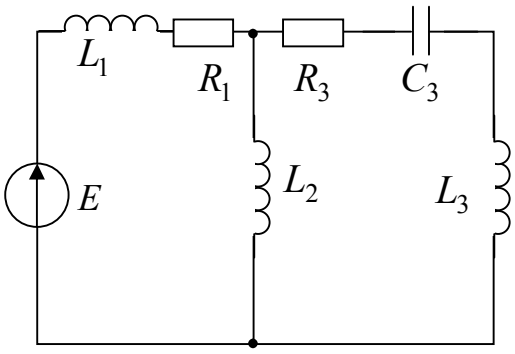


Рисунок 4.30

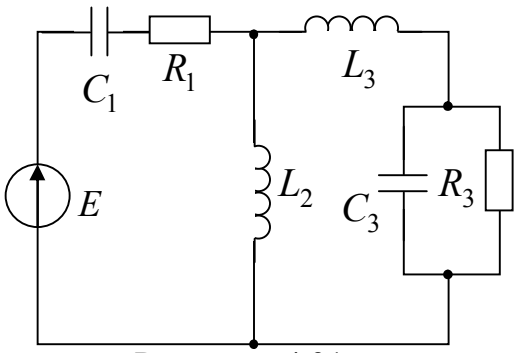


Рисунок 4.31

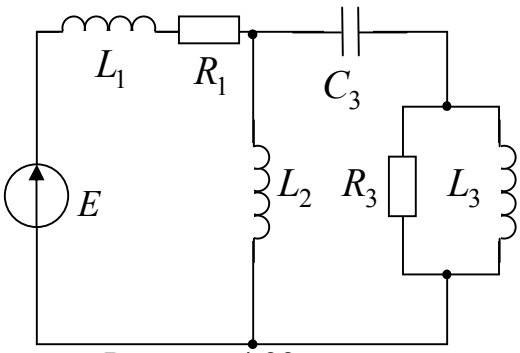


Рисунок 4.32

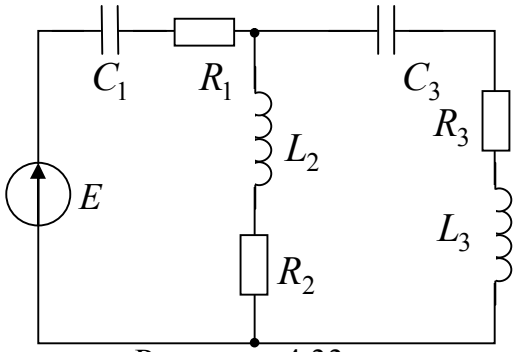


Рисунок 4.33

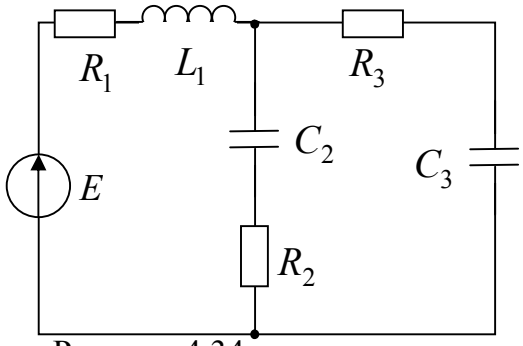


Рисунок 4.34

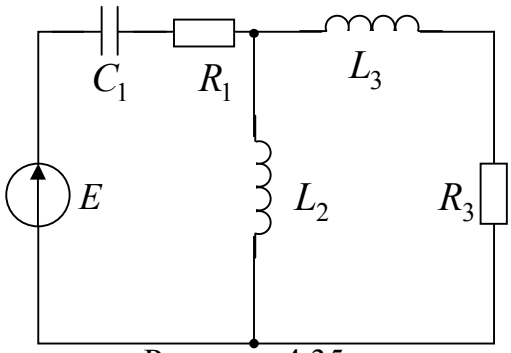


Рисунок 4.35

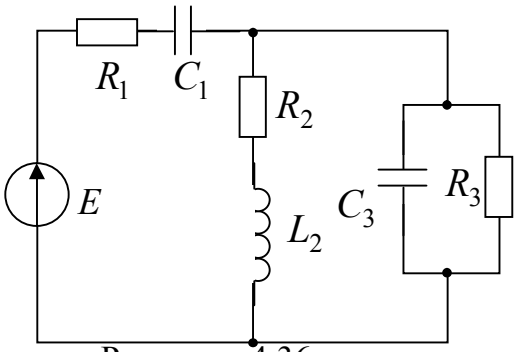


Рисунок 4.36

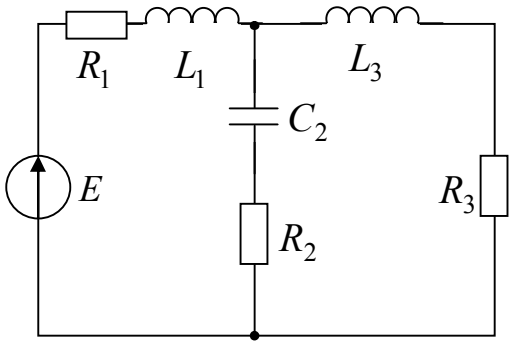


Рисунок 4.37

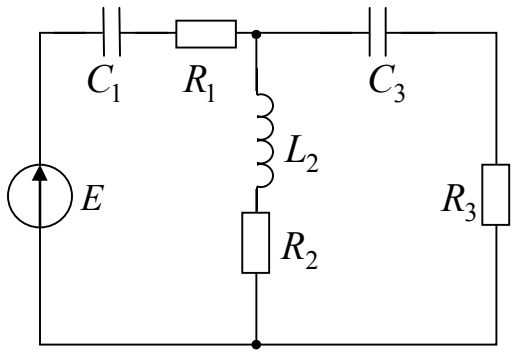


Рисунок 4.38

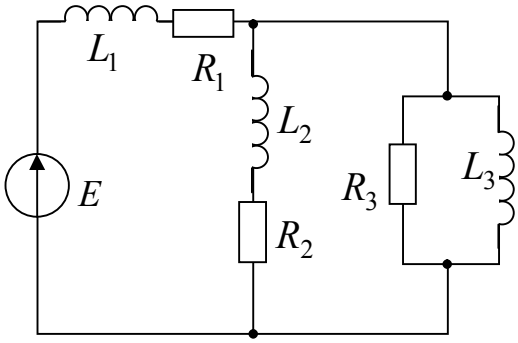


Рисунок 4.39

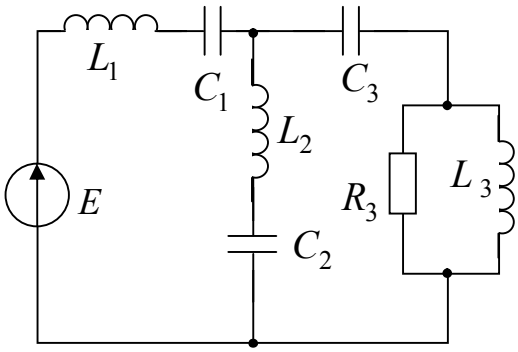


Рисунок 4.40

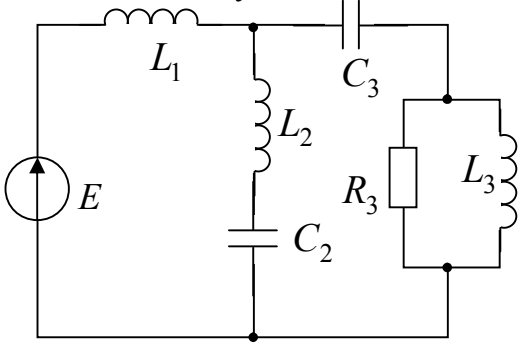


Рисунок 4.41

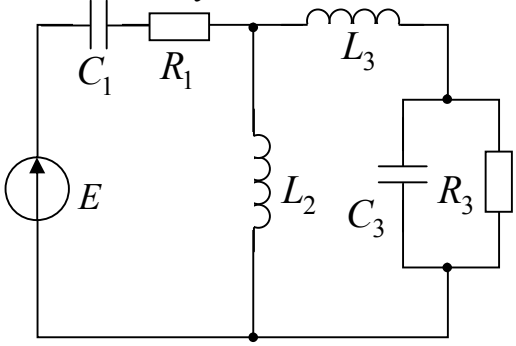


Рисунок 4.42

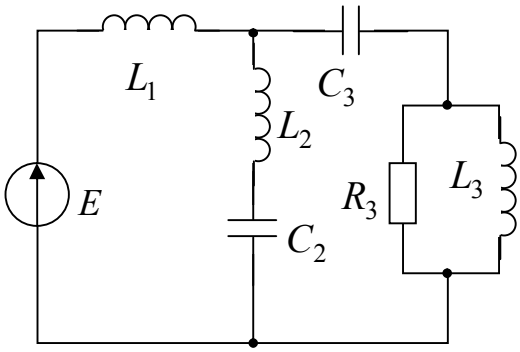


Рисунок 4.43

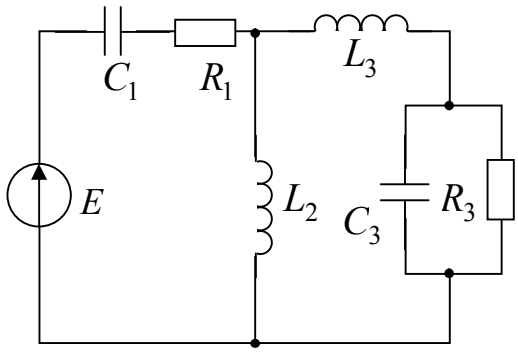


Рисунок 4.44

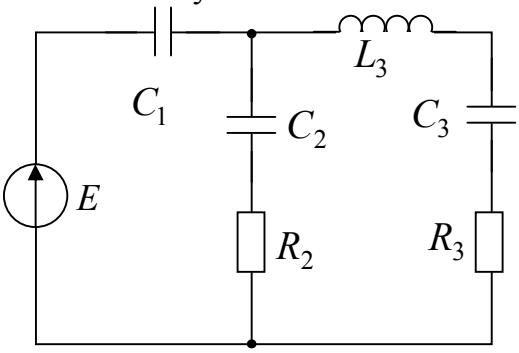


Рисунок 4.45

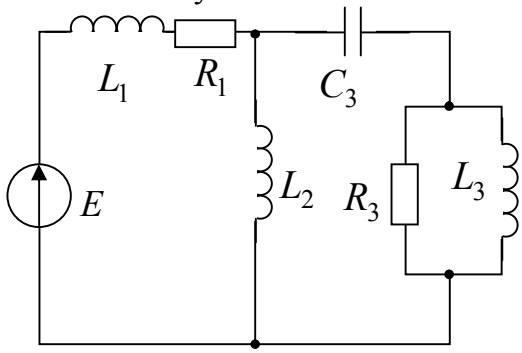


Рисунок 4.46

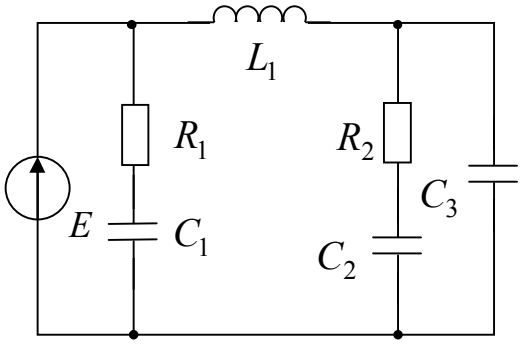


Рисунок 4.47

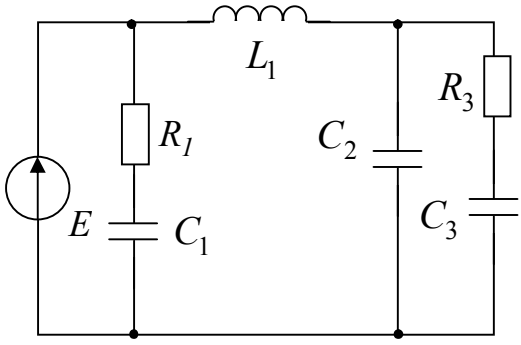


Рисунок 4.48

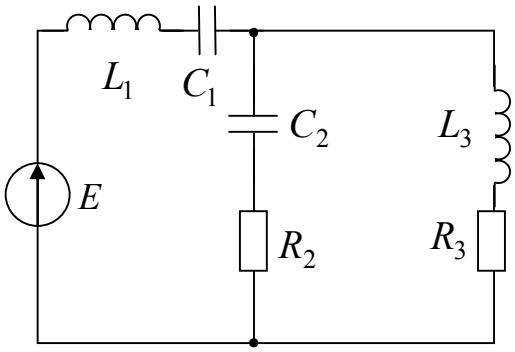


Рисунок 4.49

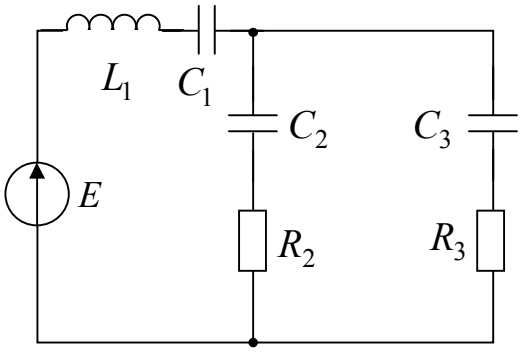


Рисунок 4.50

Таблица 4.2 − Значения ЭДС и сопротивлений резисторов для цепей, схемы которых приведены на рисунках 4.1- 4.50

№ вар.	№ рис.	E, *В*	f, *Гц*	C_1, *мкФ*	C_2, *мкФ*	C_3, *мкФ*	L_1, *мГн*	L_2, *мГн*	L_3, *мГн*	R_1, *Ом*	R_2, *Ом*	R_3, *Ом*
1	4.1	100	50	637	300	-	-	-	15,9	10	4	6
2	4.2	100	50	-	-	-	15,9	9	15,9	8	3	4
3	4.3	200	50	637	300	-	-	-	15,9	8	3	-
4	4.4	120	50	-	300	-	15,9	-	15,9	8	3	4
5	4.5	220	50	6,37	-	100	-	47,7	-	8	-	4
6	4.6	50	50	100	159	-	15,9	-	47,7	10	-	10
7	4.7	100	50	-	-	300	15,9	-	115	-	10	10
8	4.8	120	50	-	100	-	-	-	115	10	4	10
9	4.9	200	50	-	159	-	31,8	-	-	10	4	10
10	4.10	220	50	-	318	-	15,9	-	47,7	10	-	10
11	4.11	50	50	637	-	300	-	15,9	-	6	5	8
12	4.12	100	50	-	637	100	15,7	-	-	-	10	8
13	4.13	200	50	-	-	100	31,8	-	-	5	10	8
14	4.14	220	50	637	-	200	-	15,9	-	5	10	8
15	4.15	150	50	-	100	200	15,9	-	47,5	10	2	-
16	4.16	100	50	637	-	200	-	31,8	-	-	8	10
17	4.17	120	50	100	-	200	15,9	-	-	8	-	10
18	4.18	200	50	-	637	200	15,7	-	-	8	-	10
19	4.19	220	50	-	160	-	31,8	-	95	10	8	4
20	4.20	50	50	-	159	200	31,8	-	95	15	-	-
21	4.21	100	50	-	159	200	15,9	-	-	-	15	10
22	4.22	120	50	637	159	200	-	15,9	-	10	-	20
23	4.23	200	50	-	159	-	115	-	47,7	15	10	-
24	4.24	220	50	-	159	-	32,8	-	95	4	-	20
25	4.25	150	50	-	159	-	25	-	95	6	10	8
26	4.26	100	50	100	159	-	-	-	95	6	-	20
27	4.27	100	50	100	-	159	-	25	-	6	-	4
28	4.28	200	50	100	159	-	-	-	95	-	6	2
29	4.29	220	50	637	-	637	-	-	25	-	10	2
30	4.30	500	50	-	-	637	25	15,7	31,8	10	-	4
31	4.31	100	50	318	-	300	-	31,8	31,8	12	-	10
32	4.32	120	50	-	-	300	25	15,9	-	4	-	10
33	4.33	200	50	318	-	300	-	31,8	95	10	12	4
34	4.34	220	50	-	159	300	25	-	-	4	15	10
35	4.35	50	50	100	-	-	-	15,9	31,8	8	-	4
36	4.36	100	50	637	-	200	-	19,5	-	8	10	4
37	4.37	150	50	-	637	-	31,8	-	95	8	12	4
38	4.38	200	50	637	-	200	-	15,9	-	8	12	4
39	4.39	100	50	-	-	300	31,8	95	15,9	6	2	8
40	4.40	120	50	100	159	637	25	31,8	95	-	-	15
41	4.41	200	50	-	120	200	31,8	115	31,8	-	-	12
42	4.42	180	50	100	-	637	-	31,8	15,9	4	-	8
43	4.43	160	50	-	300	100	31,8	15,9	47,5	-	-	14
44	4.44	120	50	637	-	300	-	47,5	95	14	-	10
45	4.45	100	50	100	200	300	-	-	47,5	-	12	12
46	4.46	200	50	-	-	100	45,5	95	31,8	8	-	10
47	4.47	100	50	159	637	200	95	-	-	4	10	-
48	4.48	50	50	200	300	159	31,8	-	-	12	-	12
49	4.49	220	50	159	324	-	95	-	47,5	-	10	14
50	4.50	140	50	100	367	300	45,7	-	-	-	8	10

5 Контрольная работа № 3

Расчет электрических цепей трехфазного тока

Для трехфазных электрических цепей, схемы которых, приведены на рисунках 5.1- 5.50 вычислить фазное напряжение генератора, линейные и фазные токи, ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной линии), фазные и линейные напряжения приемника, активную, реактивную мощности всей цепи и каждой фазы приемника отдельно. Построить векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.

Значения линейного напряжения симметричного генератора, соединенного звездой, активных и реактивных сопротивлений приемника заданы в таблице 5.1.

Примечание: для трехфазной цепи, соединенной звездой, сопротивление нулевого провода взять равным $\underline{Z}_{00'} = (1 + j1)\ Ом$.

При выполнении контрольной работы необходимо использовать раздел 3.1 основных сведений из теории электрических цепей, а также примерами решения типовых задач из раздела 3.1.

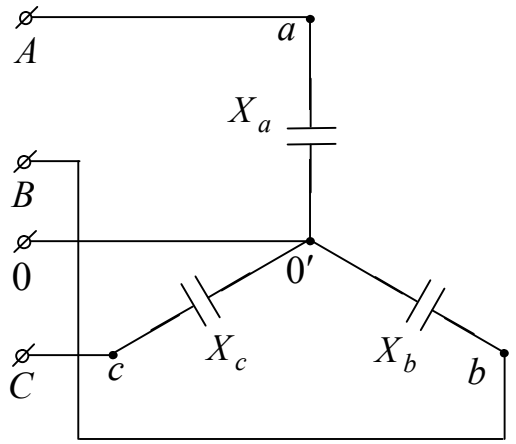


Рисунок 5.1

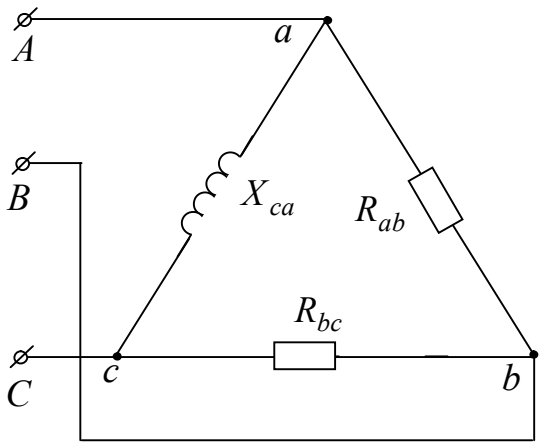


Рисунок 5.2

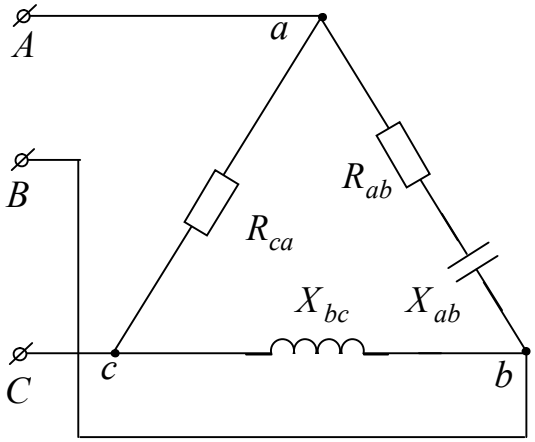


Рисунок 5.3

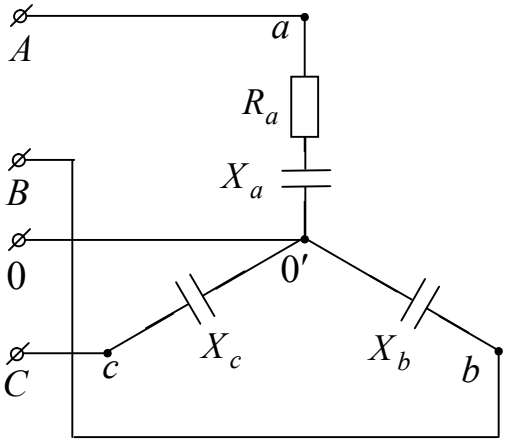


Рисунок 5.4

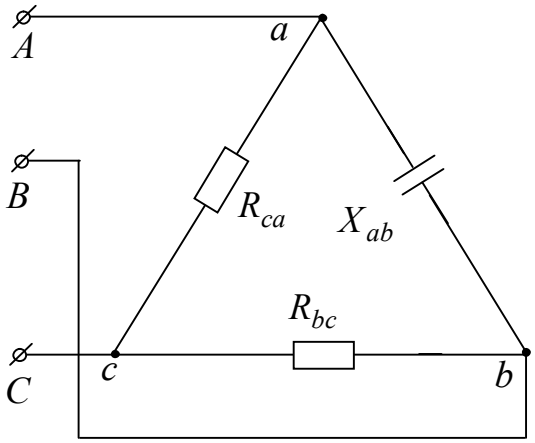


Рисунок 5.5

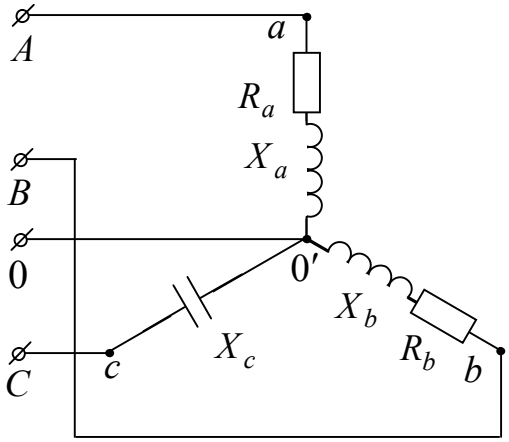


Рисунок 5.6

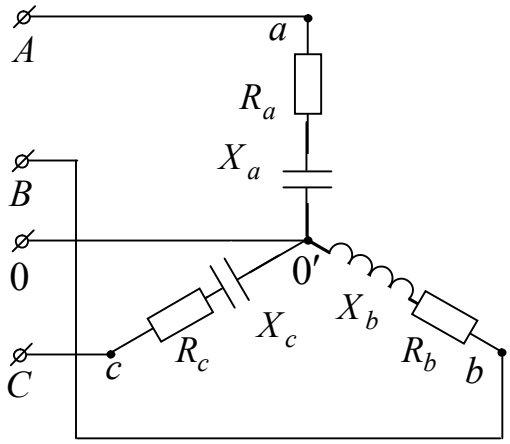


Рисунок 5.7

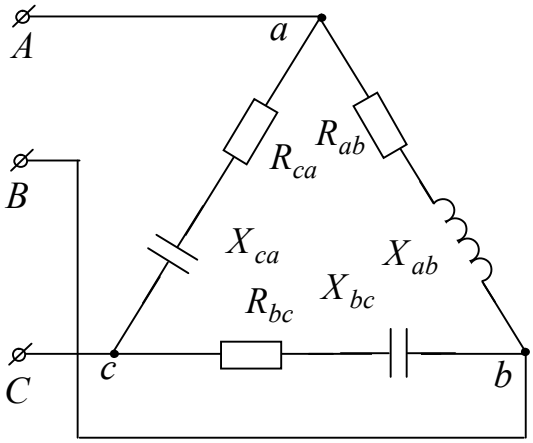


Рисунок 5.8

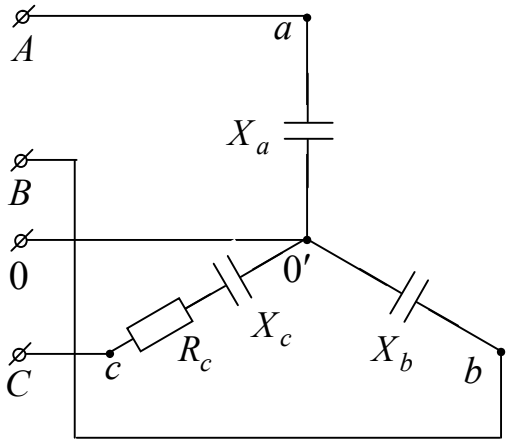


Рисунок 5.9

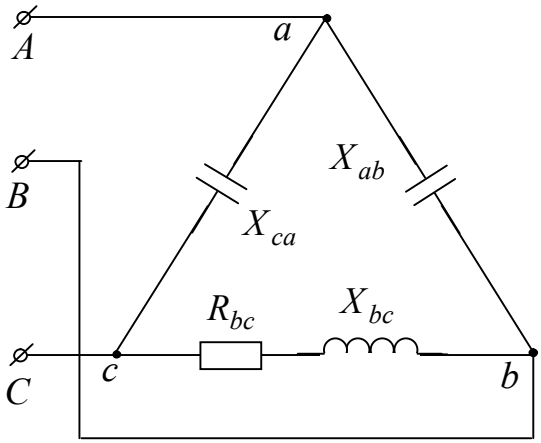


Рисунок 5.10

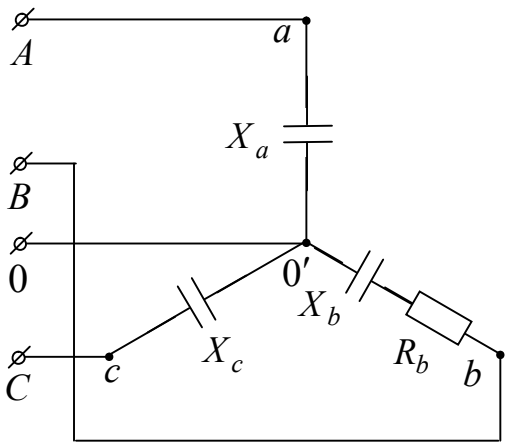


Рисунок 5.11

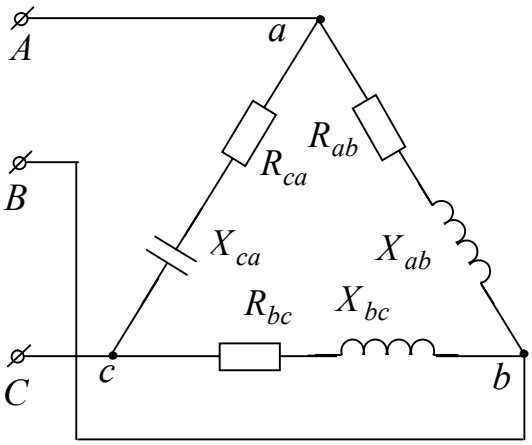


Рисунок 5.12

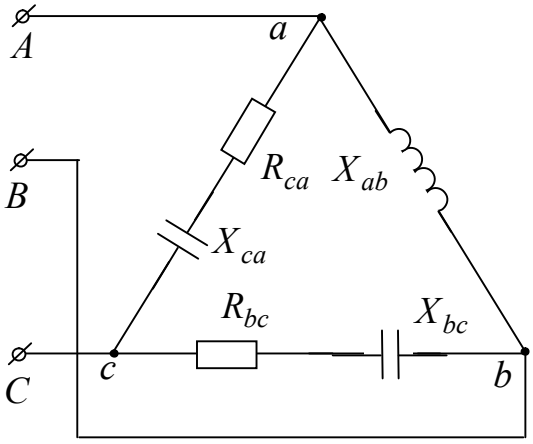


Рисунок 5.13

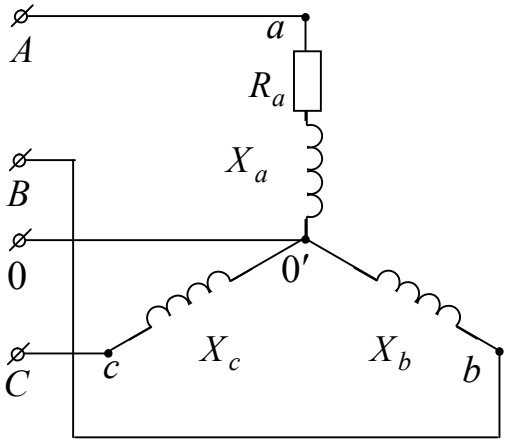


Рисунок 5.14

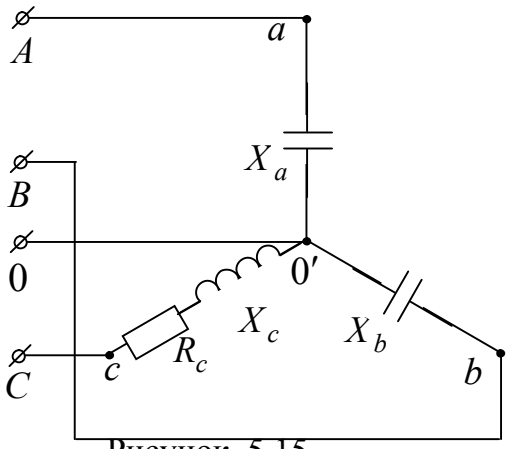


Рисунок 5.15

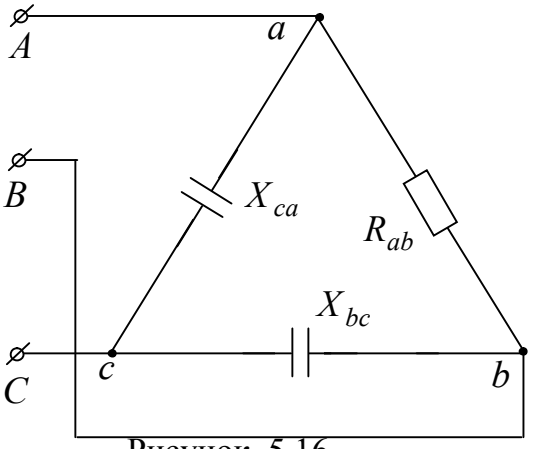


Рисунок 5.16

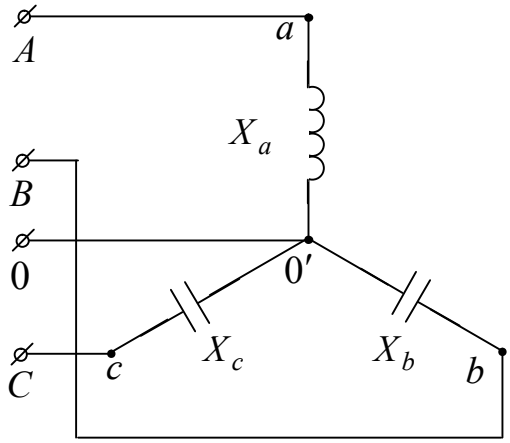


Рисунок 5.17

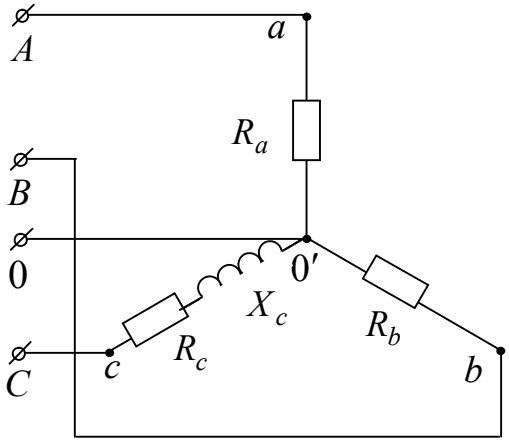


Рисунок 5.18

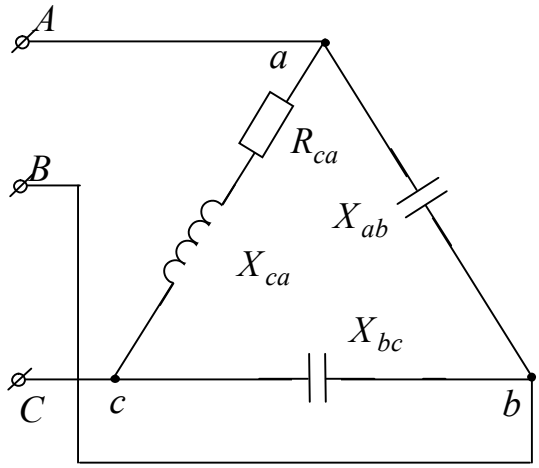


Рисунок 5.19

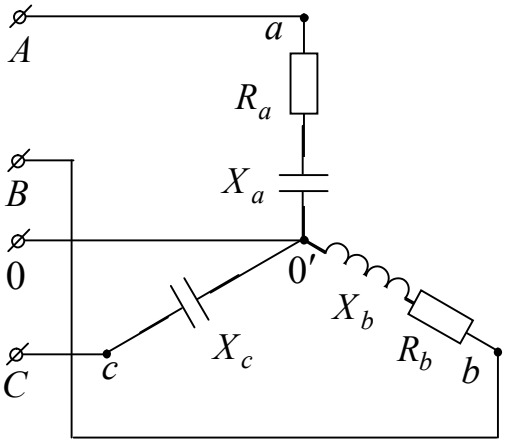


Рисунок 5.20

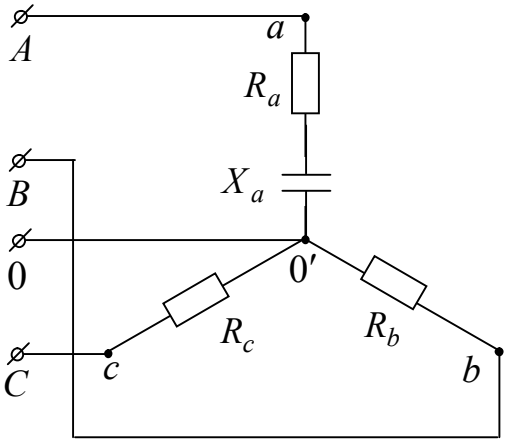


Рисунок 5.21

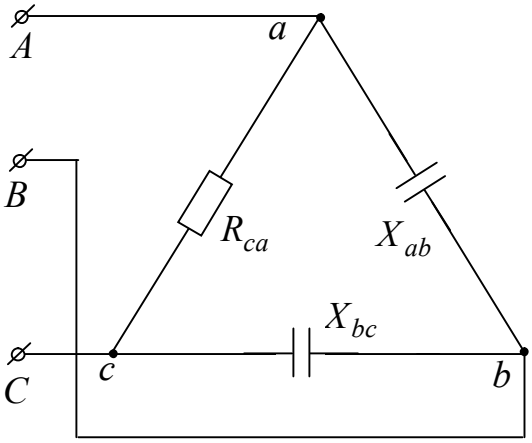


Рисунок 5.22

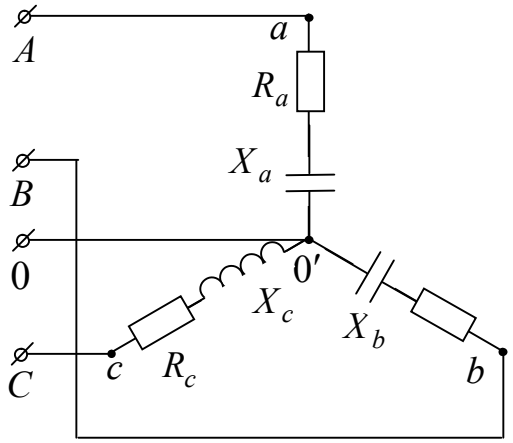


Рисунок 5.23

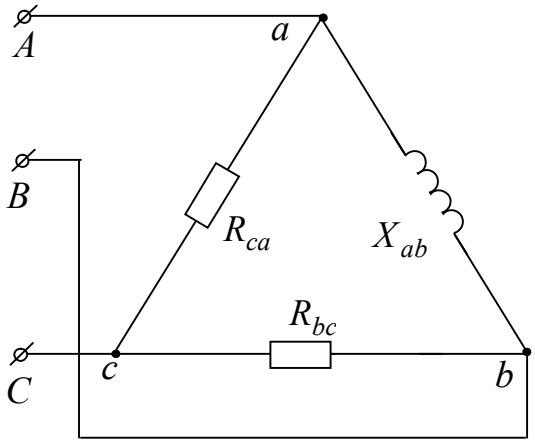


Рисунок 5.24

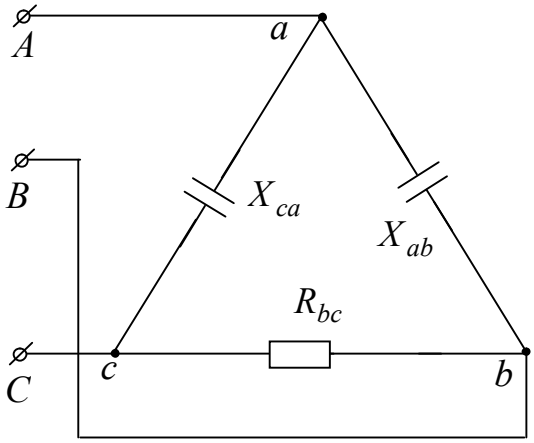


Рисунок 5.25

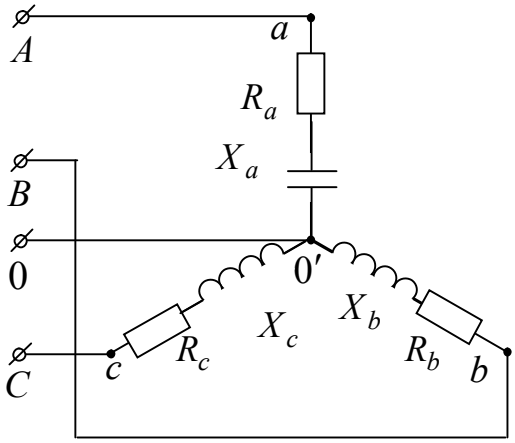


Рисунок 5.26

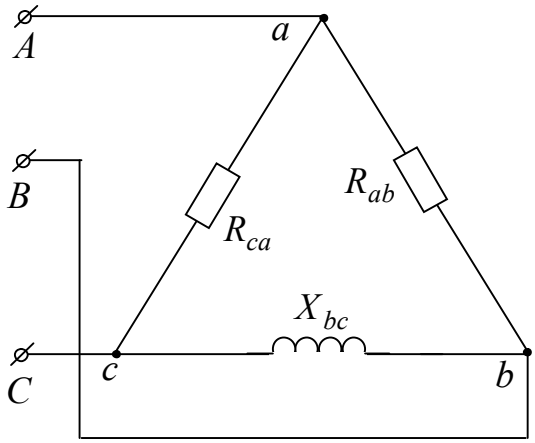


Рисунок 5.27

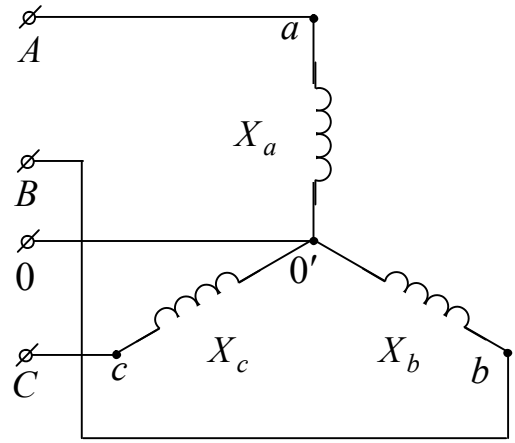


Рисунок 5.28

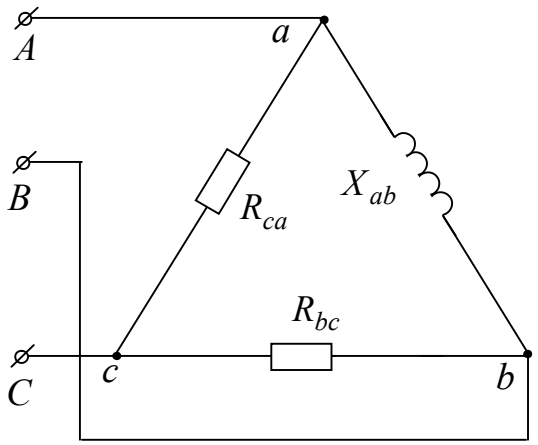


Рисунок 5.29

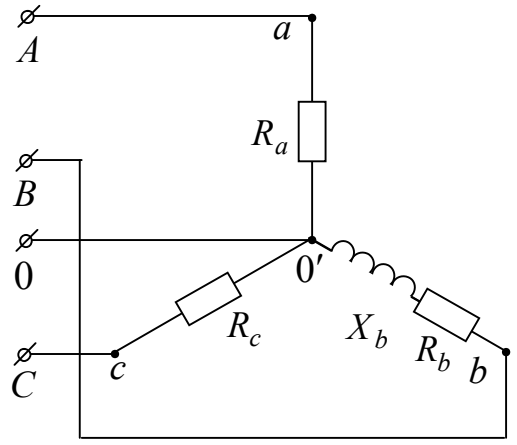


Рисунок 5.30

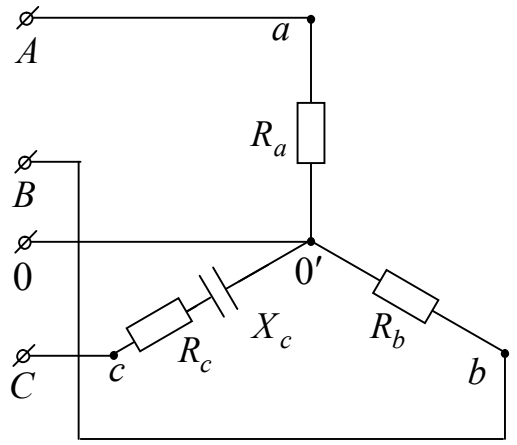


Рисунок 5.31

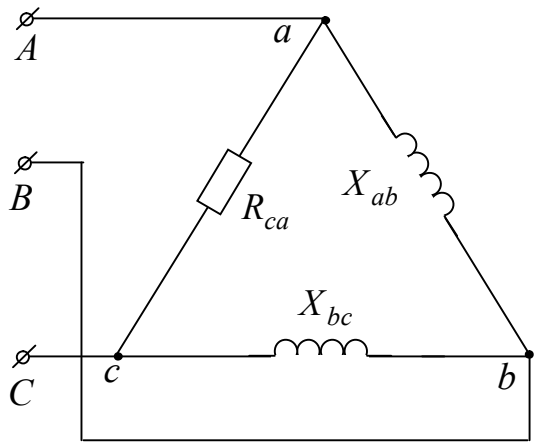


Рисунок 5.32

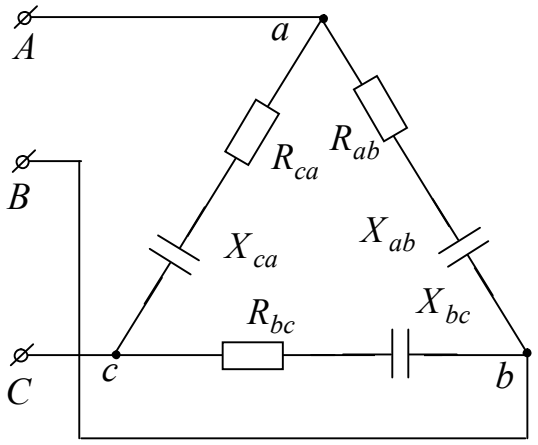


Рисунок 5.33

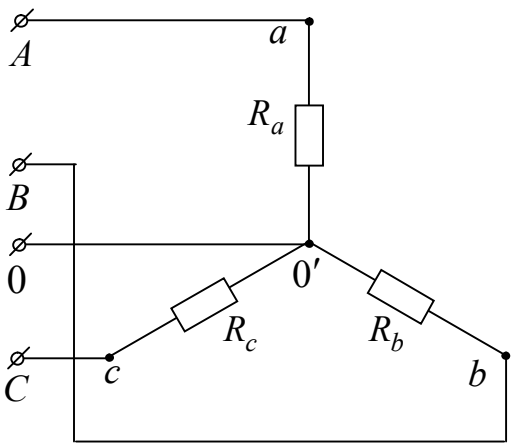


Рисунок 5.34

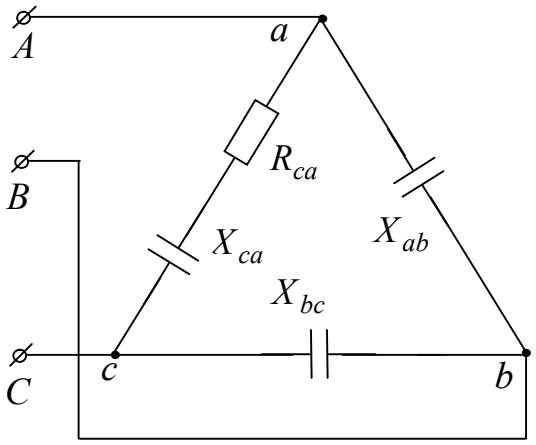


Рисунок 5.35

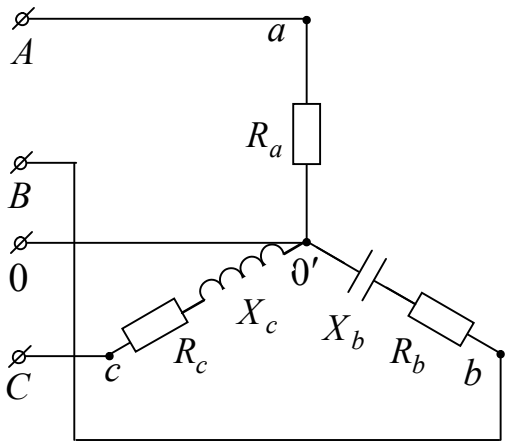


Рисунок 5.36

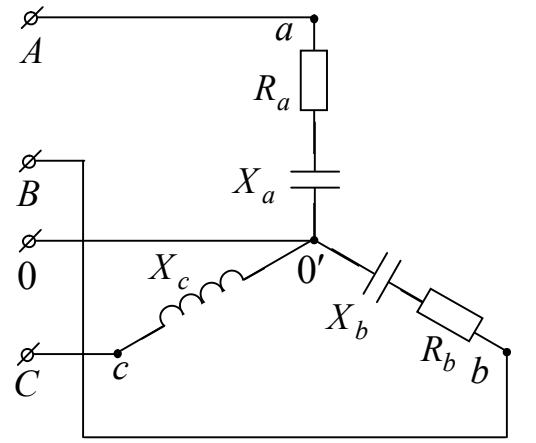


Рисунок 5.37

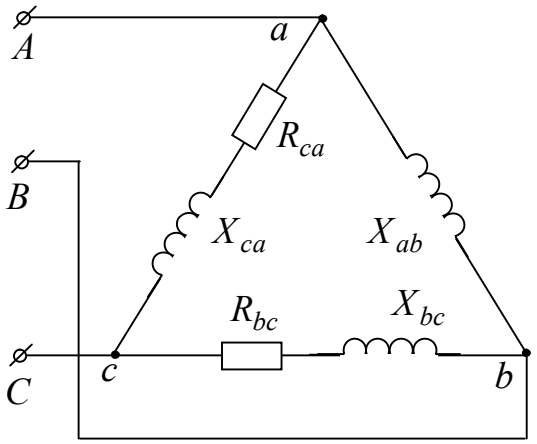


Рисунок 5.38

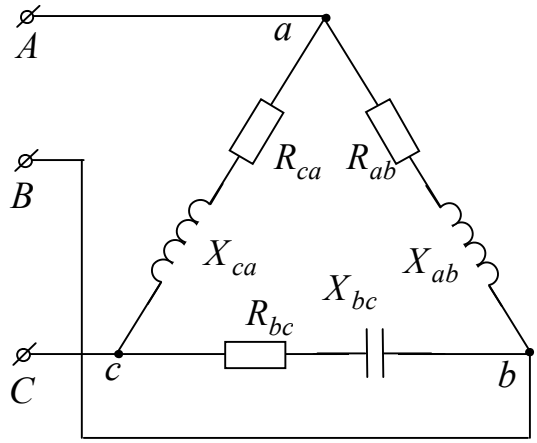


Рисунок 5.39

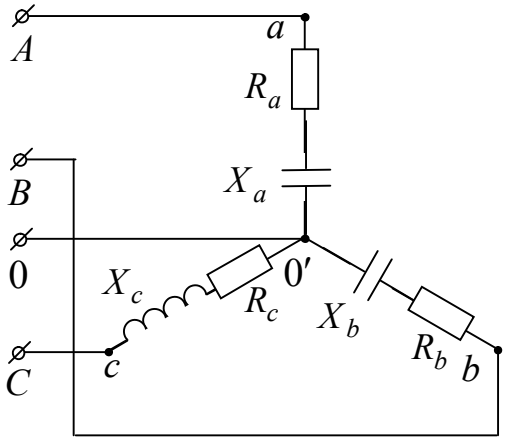


Рисунок 5.40

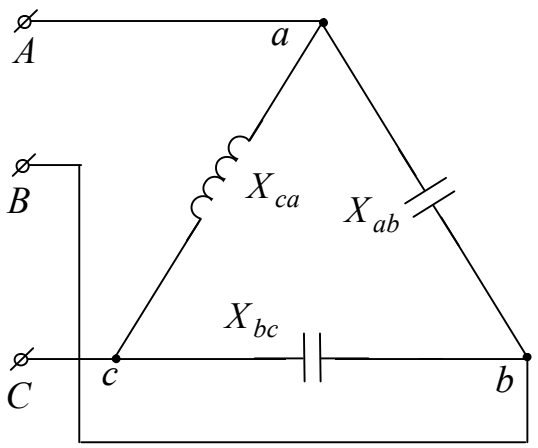


Рисунок 5.41

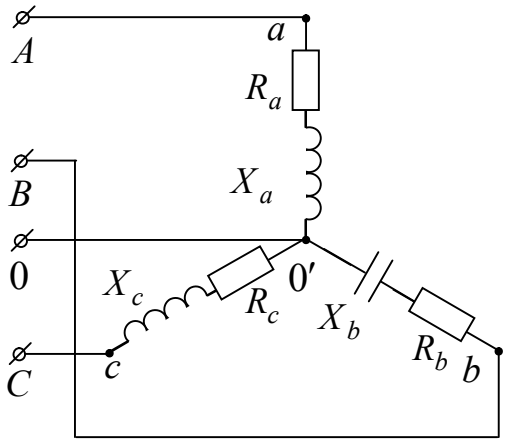


Рисунок 5.42

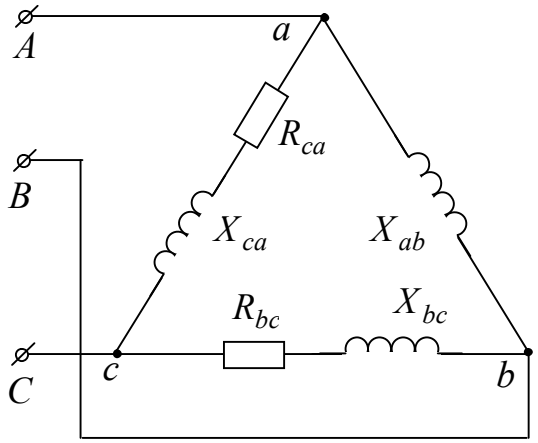


Рисунок 5.43

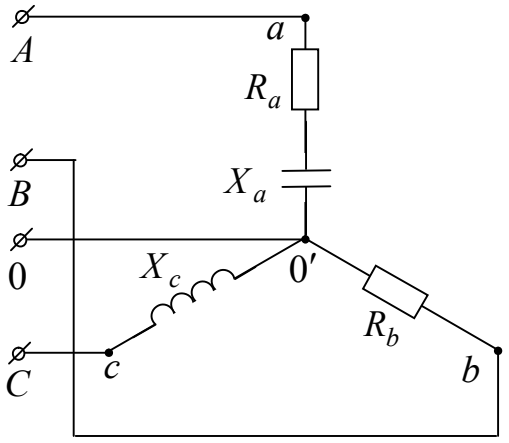


Рисунок 5.44

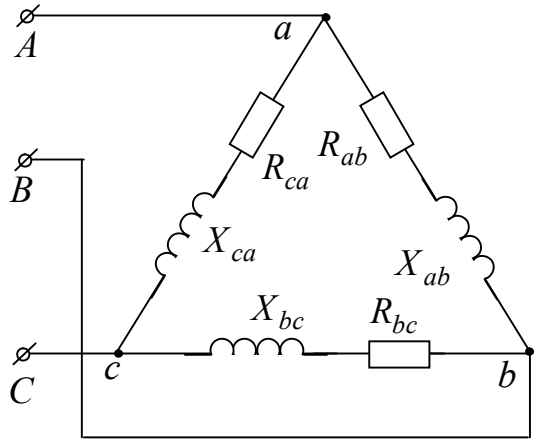


Рисунок 5.45

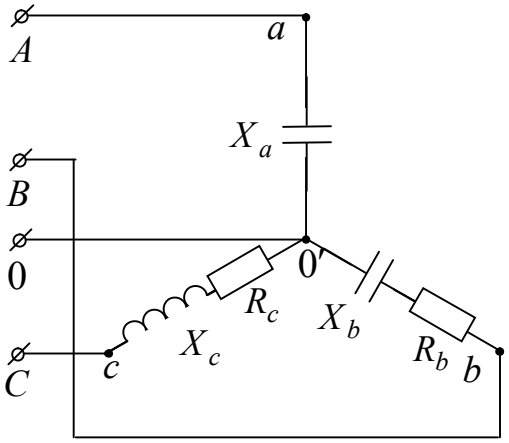


Рисунок 5.46

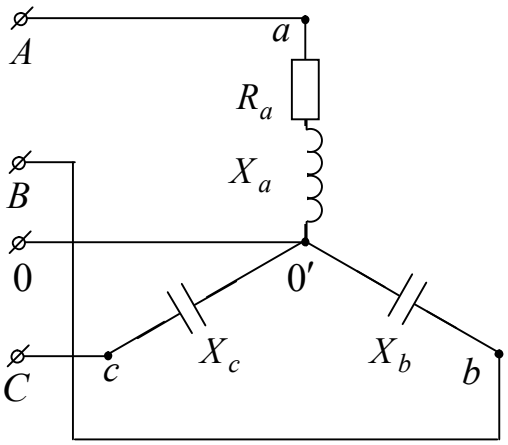


Рисунок 5.47

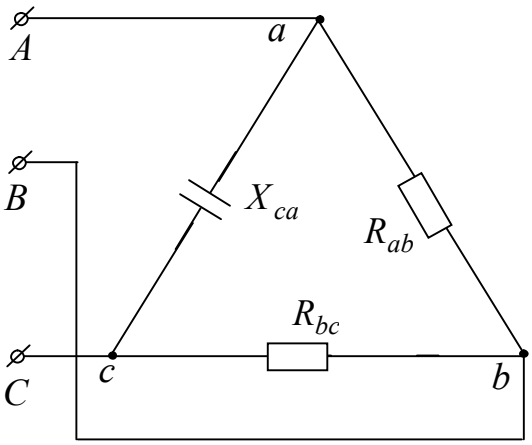


Рисунок 5.48

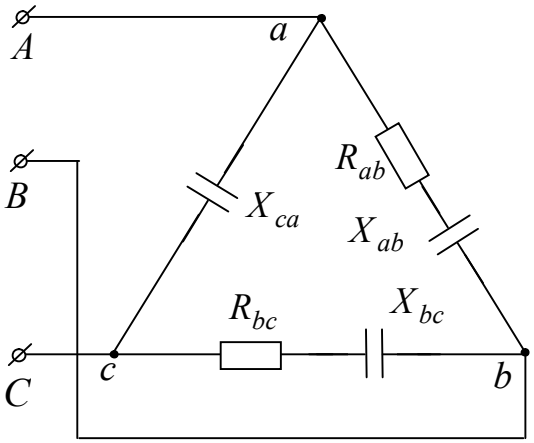


Рисунок 5.49

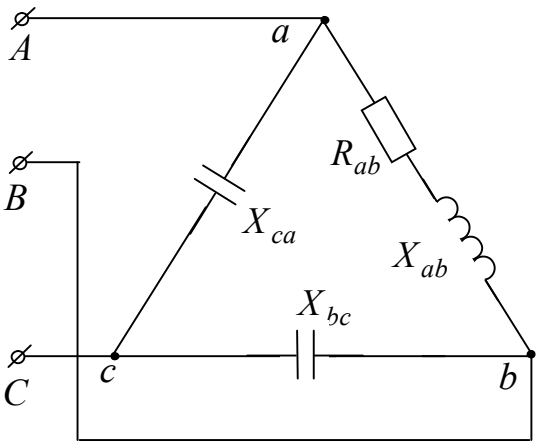


Рисунок 5.50

Таблица 5.1 − Значения линейных напряжений и сопротивлений резисторов для цепей, схемы которых приведены на рисунках 5.1- 5.50

вар.	№ рис.	$U_Л$, *В*	R_a, *Ом*	R_b, *Ом*	R_c, *Ом*	X_a, *Ом*	X_b, *Ом*	X_c, *Ом*	R_{ab}, *Ом*	R_{bc}, *Ом*	R_{ca}, *Ом*	X_{ab}, *Ом*	X_{bc}, *Ом*	X_{ca}, *Ом*
1	5.1	127	-	-	-	4	2	10	-	-	-	-	-	-
2	5.2	220	-	-	-	-	-	-	14,2	16	-	-	-	6
3	5.3	380	-	-	-	-	-	-	15	-	3	4	9	-
4	5.4	127	5	-	-	2	4	17	-	-	-	-	-	-
5	5.5	380	-	-	-	-	-	-	-	10	4	10	-	-
6	5.6	127	5	8	-	11	15	12	-	-	-	-	-	-
7	5.7	220	10	6	7	3	4	15	-	-	-	-	-	-
8	5.8	380	-	-	-	-	-	-	3	4	10	8	6	7
9	5.9	127	-	-	7	8	3	6	-	-	-	-	-	-
10	5.10	220	-	-	-	-	-	-	-	5	-	8	4	2
11	5.11	380	-	12	-	20	15	7	-	-	-	-	-	-
12	5.12	127	-	-	-	-	-	-	8	8	8	10	2	4
13	5.13	220	-	-	-	-	-	-	-	11	13	10	4	9
14	5.14	380	5	-	-	2	17	4	-	-	-	-	-	-
15	5.15	127	-	-	16	4	8	6	-	-	-	-	-	-
16	5.16	220	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	4	1
17	5.17	380	-	-	-	9-	15	9	-	-	-	-	-	-
18	5.18	127	5	6	19	-	-	15	-	-	-	-	-	-
19	5.19	220	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2,2	4	3
20	5.20	380	2,5	6	-	4	3,8	2	-	-	-	-	-	-
21	5.21	127	7	4	19	2	-	-	-	-	-	-	-	-
22	5.22	220	-	-	-	-	-	-	-	-	12	20	24	-
23	5.23	380	1,5	10	5	1	4	25	-	-	-	-	-	-
24	5.24	127	-	-	-	-	-	-	-	8	6	2	-	-
25	5.25	220	-	-	-	-	-	-	-	22	-	2	-	13
26	5.26	380	2	4	7	7	25	15	-	-	-	-	-	-
27	5.27	127	-	-	-	-	-	-	31,8	-	15	-	22	-
28	5.28	220	-	-	-	3	25	19	-	-	-	-	-	-
29	5.29	380	-	-	-	-	-	-	-	10	12	4	-	-
30	5.30	127	23	11	19	-	25	-	-	-	-	-	-	-
31	5.31	220	12	10	8	-	-	15	-	-	-	-	-	-
32	5.32	380	-	-	-	-	-	-	-	-	10	4	2	-
33	5.33	127	-	-	-	-	-	-	5	8	12	4	3	9
34	5.34	220	4	6	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	5.35	380	-	-	-	-	-	-	-	-	2	8	11	12
36	5.36	127	2	12	15	-	2	3	-	-	-	-	-	-
37	5.37	220	5	4	-	20	31	11	-	-	-	-	-	-
38	5.38	380	-	-	-	-	-	-	-	4	16	8	11	7
39	5.39	127	-	-	-	-	-	-	4,5	12	11	14	6	8
40	5.40	220	1	6	3	3	2	4,5	-	-	-	-	-	-
41	5.41	380	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	9,5	8
42	5.42	127	6,5	5	11	10	4,5	9,	-	-	-	-	-	-
43	5.43	220	-	-	-	-	-	-	-	4	10	3	2	1
44	5.44	380	10	20	-	15	-	11	-	-	-	-	-	-
45	5.45	127	-	-	-	-	-	-	4,5	8	10	14	4	9
46	5.46	220	-	10	3	3	4	7	-	-	-	-	-	-
47	5.47	220	15	-	-	10	3	7	-	-	-	-	-	-
48	5.48	380	-	-	-	-	-	-	4,7	10	-	-	-	5
49	5.49	127	-	-	-	-	-	-	15	11	-	10	12	2
50	5.50	220	-	-	-	-	-	-	11	-	-	10	8	7