

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники»

Кафедра теоретических основ электротехники

Типовой расчет №2 по курсу: «Теория электрических цепей»
Шифр студента №950501-6

Проверил: Батюков С. В.
Выполнил: ст. гр. 950501
Деркач А. В.

Минск 2020

1. Чертеж исходной схемы

Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Номер ветви	Начало-конец	Сопротивления			Источник ЭДС		Источник тока	
		R	X_L	X_C	мод.	арг.	мод.	арг.
1	15	0	16	18	0	0	0	0
2	53	14	0	0	0	0	0	0
3	34	0	11	0	0	0	0	0
4	46	16	0	0	0	0	0	0
5	62	58	0	17	0	0	0	0
6	21	0	34	0	64	241	0	0
7	56	58	0	74	0	0	0	0
8	31	0	29	95	0	0	0	0

Начертим схему согласно заданному варианту (рис. 1):

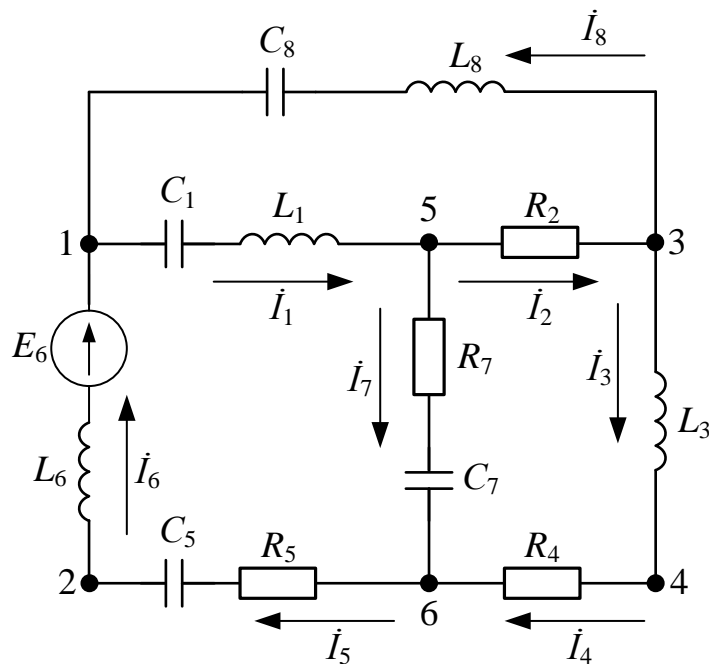


Рисунок 1 – Исходная схема

2. Нахождение комплексных сопротивлений

Найдем комплексные сопротивления каждой ветви схемы (рис. 1)

$$Z_1 = jX_{L_1} - jX_{C_1} = -j2 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = R_2 = 14 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = jX_{L_3} = j11 \text{ Ом}$$

$$Z_4 = R_4 = 16 \text{ Ом}$$

$$Z_5 = R_5 - jX_{C_5} = 58 - j17 \text{ Ом}$$

$$Z_6 = jX_{L_6} = j34 \text{ Ом}$$

$$Z_7 = R_7 - jX_{C_7} = 58 - j74 \text{ Ом}$$

$$Z_8 = jX_{L_8} - jX_{C_8} = -j66 \text{ Ом}$$

Объединим последовательно включенные комплексные сопротивления Z_3 и Z_4 , Z_5 и Z_6 в эквивалентные комплексные сопротивления и получим схему (рис. 2):

$$Z_{34} = Z_3 + Z_4 = 16 + j11 \text{ Ом}$$

$$Z_{56} = Z_5 + Z_6 = 58 + j17 \text{ Ом}$$

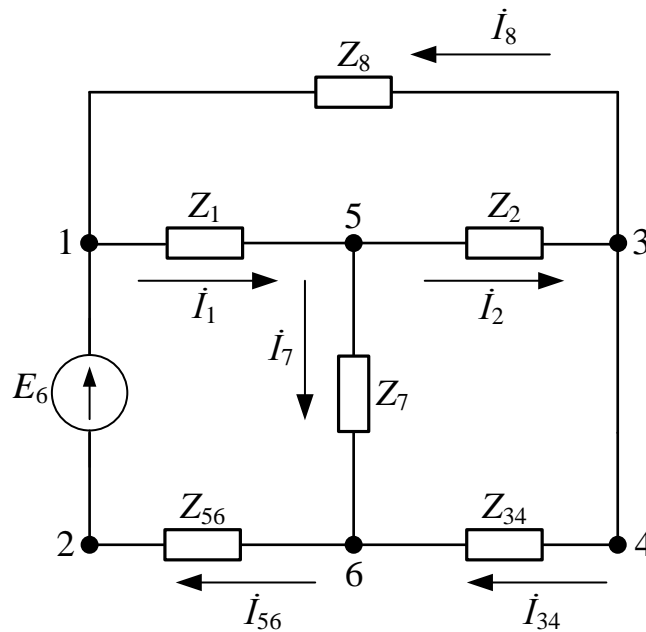


Рисунок 2

Преобразуем треугольник Z_2 - Z_{34} - Z_7 в эквивалентную звезду (рис. 3):

$$Z_{27} = \frac{Z_2 \cdot Z_7}{Z_2 + Z_{34} + Z_7} = 11,673 - j3,416 \text{ Ом}$$

$$Z_{234} = \frac{Z_2 \cdot Z_{34}}{Z_2 + Z_{34} + Z_7} = 0,855 + j2,362 \text{ Ом}$$

$$Z_{347} = \frac{Z_{34} \cdot Z_7}{Z_2 + Z_{34} + Z_7} = 16,024 + j5,267 \text{ Ом}$$

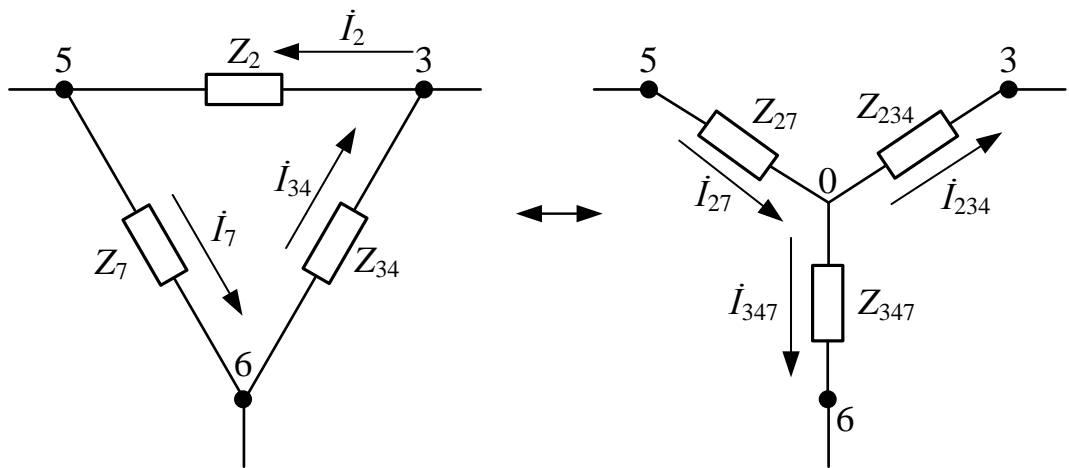


Рисунок 3

После всех преобразований получаем схему (рис. 4):

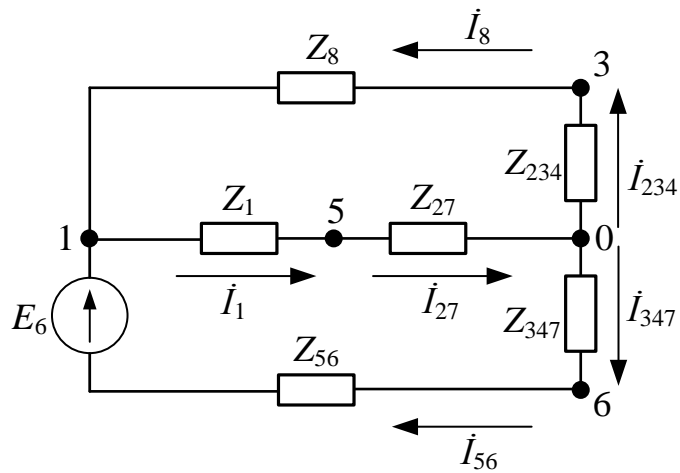


Рисунок 4

Объединим последовательно включенные комплексные сопротивления Z_8 и Z_{234} , Z_1 и Z_{27} , Z_{56} и Z_{347} в эквивалентные комплексные сопротивления (рис. 5):

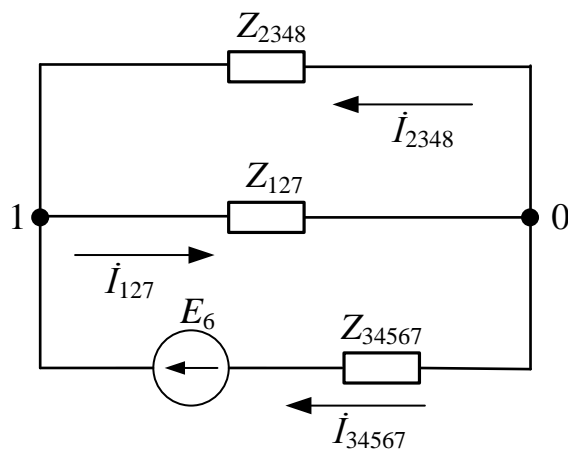


Рисунок 5

$$Z_{2348} = Z_8 + Z_{234} = 0,855 - j63,638 \text{ Ом}$$

$$Z_{127} = Z_1 + Z_{27} = 11,673 - j5,416 \text{ Ом}$$

$$Z_{34567} = Z_{347} + Z_{56} = 74,024 + j22,267 \text{ Ом}$$

Найдём общее сопротивление цепи, изображенной на рисунке 5:

$$Z_{общ} = \frac{Z_{2348} \cdot Z_{127}}{Z_{2348} + Z_{127}} + Z_{34567} = 83,653 + j15,674 \text{ Ом}$$

Найдем общий ток цепи:

$$\dot{I}_{общ} = \frac{\dot{E}_6}{Z_{общ}} = -0,479 - j0,579 \text{ А}$$

Теперь найдем токи в схеме, постепенно разворачивая цепь:

$$\dot{I}_6 = \dot{I}_{общ} = -0,479 - j0,579 \text{ А}$$

$$\dot{I}_5 = \dot{I}_6 = -0,479 - j0,579 \text{ А}$$

Для нахождения токов \dot{I}_{127} и \dot{I}_{2348} воспользуемся правилом плеч:

$$\dot{I}_{127} = \dot{I}_{общ} \cdot \frac{Z_{2348}}{Z_{127} + Z_{2348}} = -0,516 - j0,446 \text{ А}$$

$$\dot{I}_{2348} = -\dot{I}_{общ} \cdot \frac{Z_{127}}{Z_{127} + Z_{2348}} = 0,036 - j0,133 \text{ А}$$

Поэтому:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{127} = -0,516 - j0,446 \text{ А}$$

$$\dot{I}_8 = \dot{I}_{2348} = -0,036 + j0,133 \text{ А}$$

Для нахождения оставшихся токов найдем напряжение между узлами 5 и 3:

$$\dot{U}_{53} = -\dot{I}_8 \cdot Z_8 - \dot{I}_1 \cdot Z_1 = -7,889 - j3,419 \text{ В}$$

Находим сами токи:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{53}}{Z_2} = -0,563 - j0,244 \text{ A}$$

$$\dot{I}_7 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 0,048 - j0,202 \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_2 - \dot{I}_8 = -0,527 - j0,377 \text{ A}$$

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_3 = -0,527 - j0,377 \text{ A}$$

По найденным действующим значениям токов записываем их мгновенные значения:

$$i_1 = \sqrt{2} \cdot 0,682 \sin(\omega t - 139,125^\circ) \text{ A}$$

$$i_2 = \sqrt{2} \cdot 0,614 \sin(\omega t - 156,565^\circ) \text{ A}$$

$$i_3 = \sqrt{2} \cdot 0,648 \sin(\omega t - 144,415^\circ) \text{ A}$$

$$i_4 = \sqrt{2} \cdot 0,648 \sin(\omega t - 144,415^\circ) \text{ A}$$

$$i_5 = \sqrt{2} \cdot 0,752 \sin(\omega t - 129,612^\circ) \text{ A}$$

$$i_6 = \sqrt{2} \cdot 0,752 \sin(\omega t - 129,612^\circ) \text{ A}$$

$$i_7 = \sqrt{2} \cdot 0,208 \sin(\omega t - 76,680^\circ) \text{ A}$$

$$i_8 = \sqrt{2} \cdot 0,138 \sin(\omega t + 105,215^\circ) \text{ A}$$

3. Баланс мощностей

Составим баланс мощностей:

Определяем полную комплексную мощность, отдаваемую источником ЭДС:

$$S = \dot{E}_6 \cdot \bar{I}_6 = 47,304 + j8,863 \text{ ВА.}$$

Найдём активную мощность приёмников энергии:

$$P_{\text{потр.}} = |\dot{I}_2|^2 \cdot R_2 + |\dot{I}_4|^2 \cdot R_4 + |\dot{I}_5|^2 \cdot R_5 + |\dot{I}_7|^2 \cdot R_7 = 47,304 \text{ Вт}$$

Найдём реактивную мощность приёмников энергии:

$$P_{\text{потр.}} = |\dot{I}_1|^2 \cdot (X_{L_1} - X_{C_1}) + |\dot{I}_3|^2 \cdot X_{L_3} - |\dot{I}_5|^2 \cdot X_{C_5} + |\dot{I}_6|^2 \cdot X_{L_6} - |\dot{I}_7|^2 \cdot X_{C_7} + |\dot{I}_8|^2 \cdot (X_{L_8} - X_{C_8}) = 8,863 \text{ ВАр}$$

Поскольку активные и реактивные мощности источника ЭДС равны активной и реактивной мощности приемников энергии, то баланс мощностей выполняется.

4. Векторная диаграмма

Для построения топографической векторной диаграммы добавим в схему дополнительные точки (рис. 6):

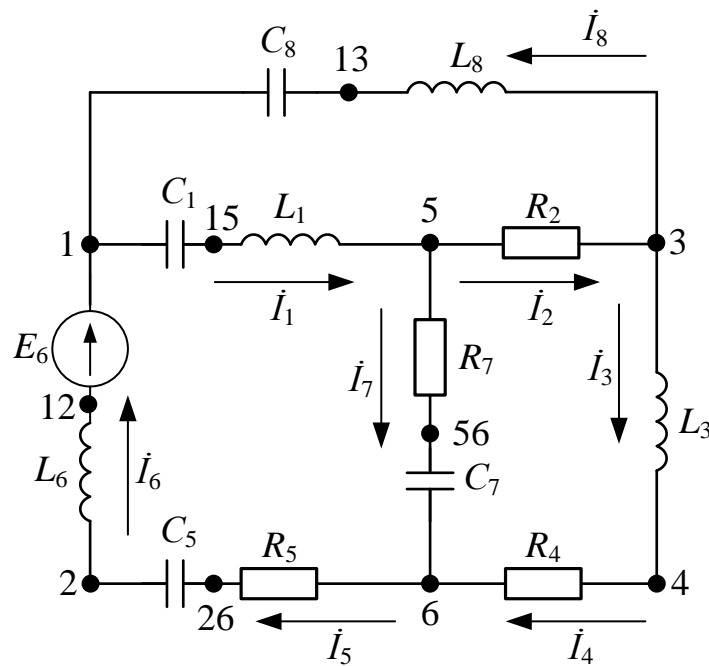


Рисунок 6

Рассчитаем потенциалы точек каждого замкнутого контура, приняв потенциал точки 5 равным 0.

Контур 1:

$$\dot{\phi}_5 = 0 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{56} = \dot{\phi}_5 + \dot{I}_7 \cdot R_7 = 2,774 - j11,717 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_6 = \dot{\phi}_{56} - jX_{C_7} \cdot \dot{I}_7 = -12,175 - j15,256 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{26} = \dot{\phi}_6 + \dot{I}_5 \cdot R_5 = -39,983 - j48,856 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_{26} - jX_{C_5} \cdot \dot{I}_5 = -49,832 - j40,705 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{12} = \dot{\phi}_2 + jX_{L_6} \cdot \dot{I}_6 = -30,135 - j57,007 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_{12} - \dot{E}_6 = 0,893 - j1,031 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{15} = \dot{\phi}_1 - jX_{C_1} \cdot \dot{I}_1 = -7,140 + j8,250 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_{15} + jX_{L_1} \cdot \dot{I}_1 = 0 \text{ В}$$

Контур 2:

$$\dot{\phi}_5 = 0 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_5 + \dot{I}_2 \cdot R_2 = -7,889 - j3,419 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_3 + jX_{L_3} \cdot \dot{I}_3 = -3,738 - j9,220 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_6 = \dot{\phi}_4 + \dot{I}_4 \cdot R_4 = -12,175 - j15,256 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{56} = \dot{\phi}_6 + jX_{C_7} \cdot \dot{I}_7 = 2,774 - j11,717 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_{56} - \dot{I}_7 \cdot R_7 = 0 \text{ В}$$

Контур 3:

$$\dot{\phi}_5 = 0 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_5 + \dot{I}_2 \cdot R_2 = -7,889 - j3,419 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{13} = \dot{\phi}_3 + jX_{L_8} \cdot \dot{I}_8 = -11,747 - j4,469 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_{13} - jX_{C_8} \cdot \dot{I}_8 = 0,893 - j1,031 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{15} = \dot{\phi}_1 - jX_{C_1} \cdot \dot{I}_1 = -7,140 + j8,250 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_{15} + jX_{L_1} \cdot \dot{I}_1 = 0 \text{ В}$$

Векторная диаграмма токов и совмещенная с ней топографическая векторная диаграмма напряжений представлена в приложении А.

5. Уравнения по законам Кирхгофа при наличии индуктивной связи между любыми двумя индуктивностями

По условию полагаем, что существует индуктивная связь между индуктивностями L_3 и L_8 . Наличие индуктивной связи обозначим на рисунке 7 двусторонней стрелкой, возле которой обозначаем взаимную индуктивность M . Одноименные зажимы индуктивно связанных катушек обозначим точками. Так как токи относительно одноименных зажимов направлены одинаково, то имеет место согласное включение индуктивностей.

Число уравнений для законов Кирхгофа определяем по формулам:

$$N_{\text{ур. уз}} = N_{\text{уз}} - 1 = 6 - 1 = 5$$

$$N_{\text{ур. к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{л}} = 8 - 6 + 1 - 0 = 3$$

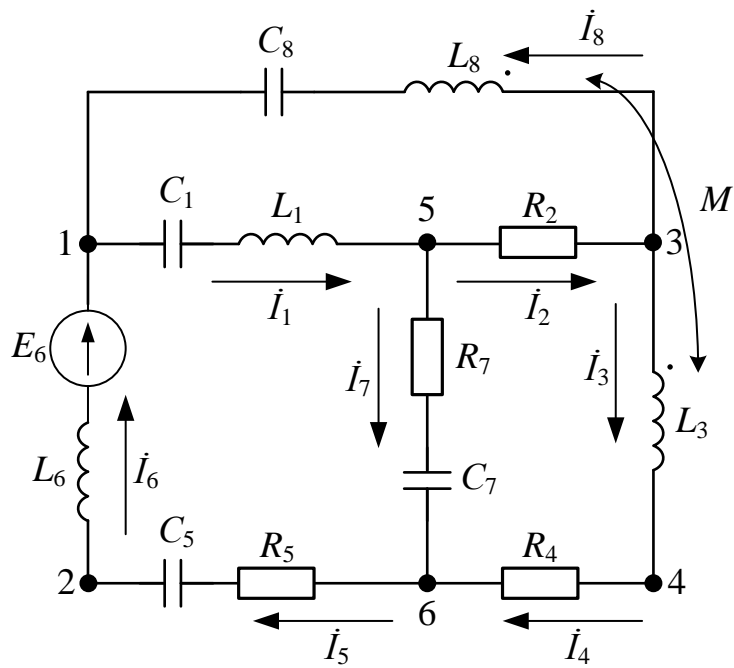


Рисунок 7

Составим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_1 = \dot{I}_6 + \dot{I}_8 - 1 \text{ узел} \\ \dot{I}_5 = \dot{I}_6 - 2 \text{ узел} \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_8 + \dot{I}_3 - 3 \text{ узел} \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_4 - 4 \text{ узел} \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_7 - 5 \text{ узел} \\ \dot{I}_6 \cdot Z_6 + \dot{I}_1 \cdot Z_1 + \dot{I}_7 \cdot Z_7 + \dot{I}_5 \cdot Z_5 = \dot{E}_6 - \text{I контур} \\ \dot{I}_2 \cdot Z_2 + \dot{I}_3 \cdot Z_3 + \dot{I}_8 \cdot jX_M + \dot{I}_4 \cdot Z_4 - \dot{I}_7 \cdot Z_7 = 0 - \text{II контур} \\ -\dot{I}_8 \cdot Z_8 - \dot{I}_3 \cdot jX_M - \dot{I}_1 \cdot Z_1 - \dot{I}_2 \cdot Z_2 = 0 - \text{III контур} \end{array} \right.$$

6. Метод законов Кирхгофа

Число уравнений для законов Кирхгофа определяем по формулам:

$$N_{\text{ур. уз}} = N_{\text{уз}} - 1 = 6 - 1 = 5$$

$$N_{\text{ур. к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{л}} = 8 - 6 + 1 - 0 = 3$$

Выбор контуров указан на рисунке 8:

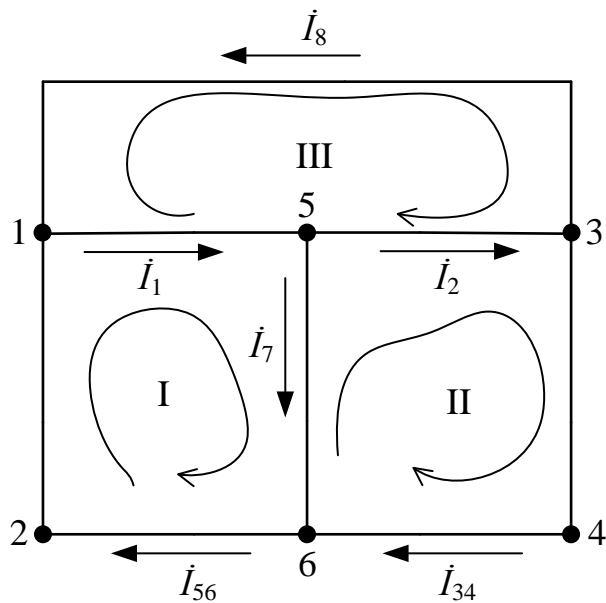


Рисунок 8

Составляем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_1 = \dot{I}_6 + \dot{I}_8 - 1 \text{ узел} \\ \dot{I}_5 = \dot{I}_6 - 2 \text{ узел} \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_8 + \dot{I}_3 - 3 \text{ узел} \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_4 - 4 \text{ узел} \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_7 - 5 \text{ узел} \\ \dot{I}_6 \cdot Z_6 + \dot{I}_1 \cdot Z_1 + \dot{I}_7 \cdot Z_7 + \dot{I}_5 \cdot Z_5 = \dot{E}_6 - \text{I контур} \\ \dot{I}_2 \cdot Z_2 + \dot{I}_3 \cdot Z_3 + \dot{I}_4 \cdot Z_4 - \dot{I}_7 \cdot Z_7 = 0 - \text{II контур} \\ -\dot{I}_8 \cdot Z_8 - \dot{I}_1 \cdot Z_1 - \dot{I}_2 \cdot Z_2 = 0 - \text{III контур} \end{array} \right.$$

Решение системы уравнений приведено в приложении Б:

$$\dot{I}_1 = -0,516 - j0,446 \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = -0,563 - j0,244 \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = -0,527 - j0,377 \text{ A}$$

$$\dot{I}_4 = -0,527 - j0,377 \text{ A}$$

$$\dot{I}_5 = -0,479 - j0,579 \text{ A}$$

$$\dot{I}_6 = -0,479 - j0,579 \text{ A}$$

$$\dot{I}_7 = 0,048 - j0,202 \text{ A}$$

$$\dot{I}_8 = -0,036 + j0,133 \text{ A}$$

7. Метод контурных токов

Число уравнений находим по данной формуле:

$$N_{\text{ур.к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{I}} = 6 - 4 + 1 - 0 = 3.$$

Выбор контуров указан на рисунке 9.

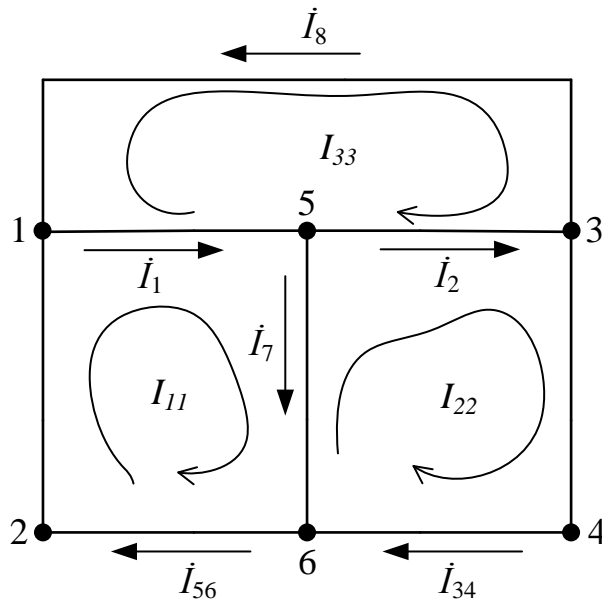


Рисунок 9

Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} \cdot (Z_1 + Z_7 + Z_{56}) - \dot{I}_{22} \cdot Z_7 - \dot{I}_{33} \cdot Z_1 = \dot{E}_6 \\ \dot{I}_{22} \cdot (Z_2 + Z_{34} + Z_7) - \dot{I}_{11} \cdot Z_7 - \dot{I}_{33} \cdot Z_2 = 0 \\ \dot{I}_{33} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_8) - \dot{I}_{11} \cdot Z_1 - \dot{I}_{22} \cdot Z_2 = 0 \end{cases}$$

Решение системы уравнений приведено в приложении В:

$$\dot{I}_{11} = -0,479 - j0,579 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{22} = -0,527 - j0,377 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{33} = 0,036 - j0,133 \text{ A}$$

Токи в цепи находим следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \dot{I}_{11} - \dot{I}_{33} = -0,516 - j0,446 \text{ A} \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_{22} - \dot{I}_{33} = -0,563 - j0,244 \text{ A} \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_{22} = -0,527 - j0,377 \text{ A} \\ \dot{I}_4 &= \dot{I}_{22} = -0,527 - j0,377 \text{ A} \\ \dot{I}_5 &= \dot{I}_{11} = -0,479 - j0,579 \text{ A} \\ \dot{I}_6 &= \dot{I}_{11} = -0,479 - j0,579 \text{ A} \\ \dot{I}_7 &= \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22} = 0,048 - j0,202 \text{ A} \\ \dot{I}_8 &= -\dot{I}_{33} = -0,036 + j0,133 \text{ A}\end{aligned}$$

8. Метод узловых напряжений

Число уравнений, составляемых по методу узловых напряжений, равно:

$$N_{yp} = N_y - 1 - N_{ЭДС} = 4 - 1 - 0 = 3$$

Базисный узел $\varphi_5 = 0 \text{ В}$, искомые узловые напряжения – \dot{U}_{15} , \dot{U}_{35} , \dot{U}_{65} .

Схема для решения методом узловых напряжений представлена на рисунке 10:

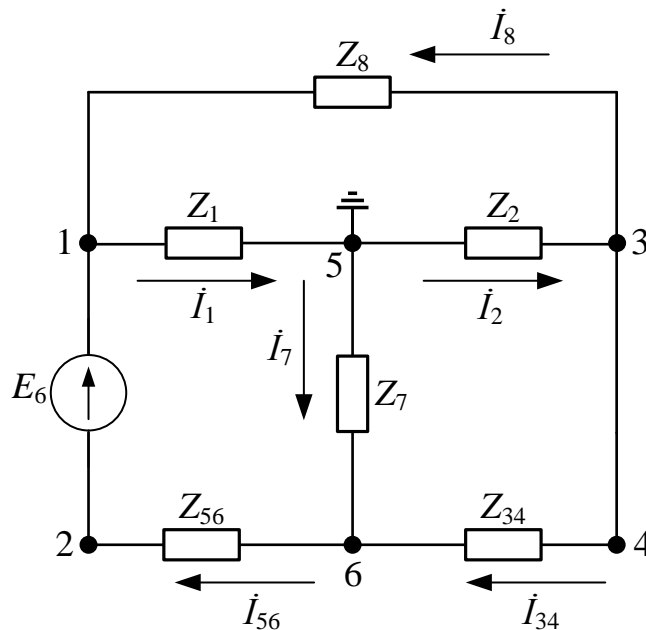


Рисунок 10

Составим систему уравнений для неизвестных узловых напряжений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{15} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_8} + \frac{1}{Z_{56}} \right) - \dot{U}_{35} \cdot \frac{1}{Z_8} - \dot{U}_{65} \cdot \frac{1}{Z_{56}} = \frac{\dot{E}_6}{R_{56}} \\ -\dot{U}_{15} \cdot \frac{1}{Z_8} + \dot{U}_{35} \cdot \left(\frac{1}{Z_8} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_{34}} \right) - \dot{U}_{65} \cdot \frac{1}{Z_{34}} = 0 \\ -\dot{U}_{15} \cdot \frac{1}{Z_{56}} - \dot{U}_{35} \cdot \frac{1}{Z_{34}} + \dot{U}_{65} \cdot \left(\frac{1}{Z_{34}} + \frac{1}{Z_7} + \frac{1}{Z_{56}} \right) = -\frac{\dot{E}_6}{Z_{56}} \end{cases}$$

Решение системы уравнений приведено в приложении Г.

Решив систему уравнений, получили следующие значения узловых напряжений:

$$\dot{U}_{15} = -0,893 + j1,031 \text{ В}$$

$$\dot{U}_{35} = 7,889 + j3,419 \text{ В}$$

$$\dot{U}_{65} = 12,175 + j15,256 \text{ В}$$

Находим токи в узлах с помощью закона Ома:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{15}}{Z_1} = -0,516 - j0,446 \text{ А}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_{35}}{Z_2} = -0,563 - j0,244 \text{ А}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{35} - \dot{U}_{65}}{Z_{34}} = -0,527 - j0,377 \text{ А}$$

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_3 = -0,527 - j0,377 \text{ А}$$

$$\dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_{65} - \dot{U}_{15} + \dot{E}_6}{Z_{56}} = -0,479 - j0,579 \text{ А}$$

$$\dot{I}_6 = \dot{I}_5 = -0,479 - j0,579 \text{ А}$$

$$\dot{I}_7 = \frac{-\dot{U}_{65}}{Z_7} = 0,048 - j0,202 \text{ А}$$

$$\dot{I}_8 = \frac{\dot{U}_{35} - \dot{U}_{15}}{Z_8} = -0,036 + 0,133 \text{ А}$$

9. Метод эквивалентного генератора

Делаем разрыв ветви 8 и получаем следующую цепь (рис. 11):

Находим токи с помощью метода контурных токов. Для этого выберем контуры, которые показаны на рисунке 12.

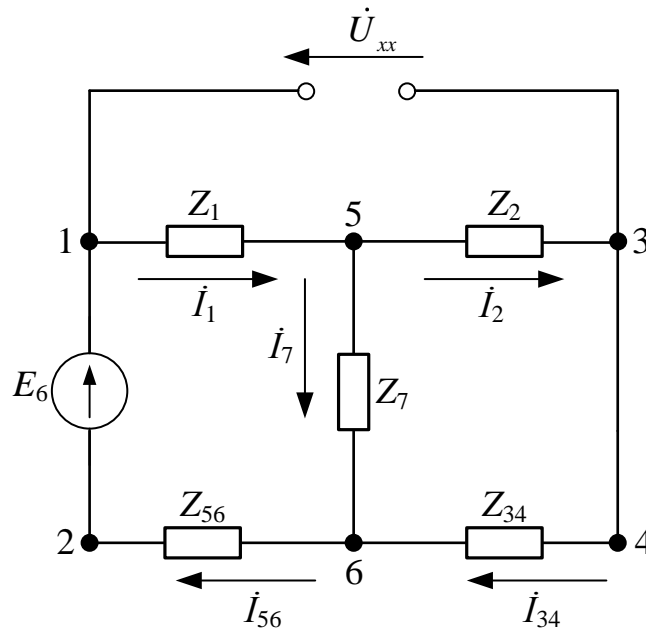


Рисунок 11

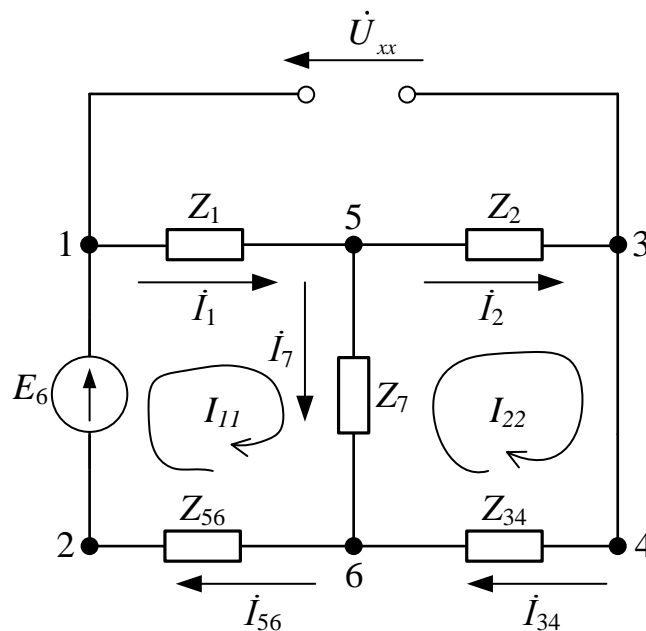


Рисунок 12

Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} \cdot (Z_1 + Z_{56} + Z_7) - \dot{I}_{22} \cdot Z_7 = \dot{E}_6 \\ \dot{I}_{22} \cdot (Z_2 + Z_{34} + Z_7) - \dot{I}_{11} \cdot Z_7 = 0 \end{cases}$$

Решение системы уравнений:

$$\dot{I}_{11} = -0,472 - j0,560 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{22} = -0,530 - j0,352 \text{ A}$$

Находим напряжение холостого хода (см. рис. 11):

$$\dot{U}_{xx} = \dot{I}_{22} \cdot Z_{34} + \dot{I}_{11} \cdot Z_{56} - \dot{E}_6 = 8,547 + j3,983 \text{ В}$$

Найдем $Z_{\text{экв}}$, для этого преобразуем схему в пассивную (рис. 13).

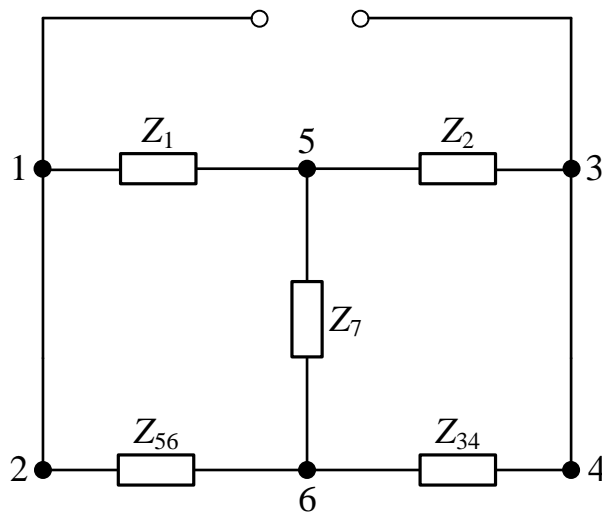


Рисунок 13

Преобразуем треугольник Z_2 - Z_7 - Z_{34} в эквивалентную звезду (рис. 14).

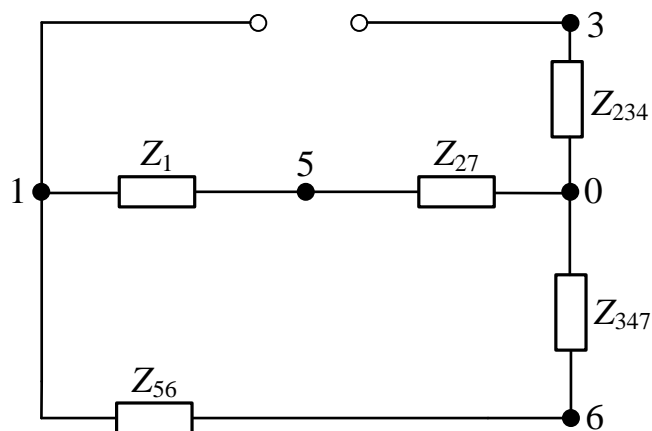


Рисунок 14

$$Z_{27} = \frac{Z_2 \cdot Z_7}{Z_2 + Z_{34} + Z_7} = 11,673 - j3,416 \text{ Ом}$$

$$Z_{234} = \frac{Z_2 \cdot Z_{34}}{Z_2 + Z_{34} + Z_7} = 0,855 + j2,362 \text{ Ом}$$

$$Z_{347} = \frac{Z_{34} \cdot Z_7}{Z_2 + Z_{34} + Z_7} = 16,024 + j5,267 \text{ Ом}$$

Объединим последовательно включенные комплексные сопротивления Z_1 и Z_{27} , Z_{56} и Z_{347} в эквивалентные комплексные сопротивления (рис. 15).

$$Z_{34567} = Z_{347} + Z_{56} = 74,024 + j22,267 \text{ Ом}$$

$$Z_{127} = Z_1 + Z_{27} = 11,673 - j5,416 \text{ Ом}$$

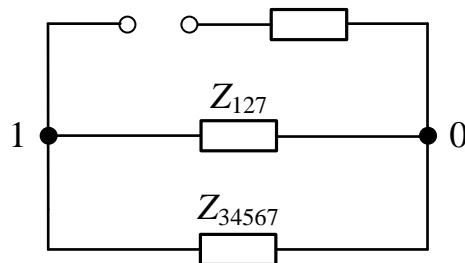


Рисунок 15

Рассчитаем $Z_{\text{экв}}$:

$$Z_{\text{экв}} = \frac{Z_{127} \cdot Z_{34567}}{Z_{127} + Z_{34567}} + Z_{234} = 11,606 - j1,397 \text{ Ом}$$

Находим \dot{I}_8 по формуле:

$$\dot{I}_8 = \frac{\dot{U}_{xx}}{Z_{\text{экв}} + Z_8} = -0,036 + j0,133 \text{ А}$$

Результаты расчета занесены в таблицу 2:

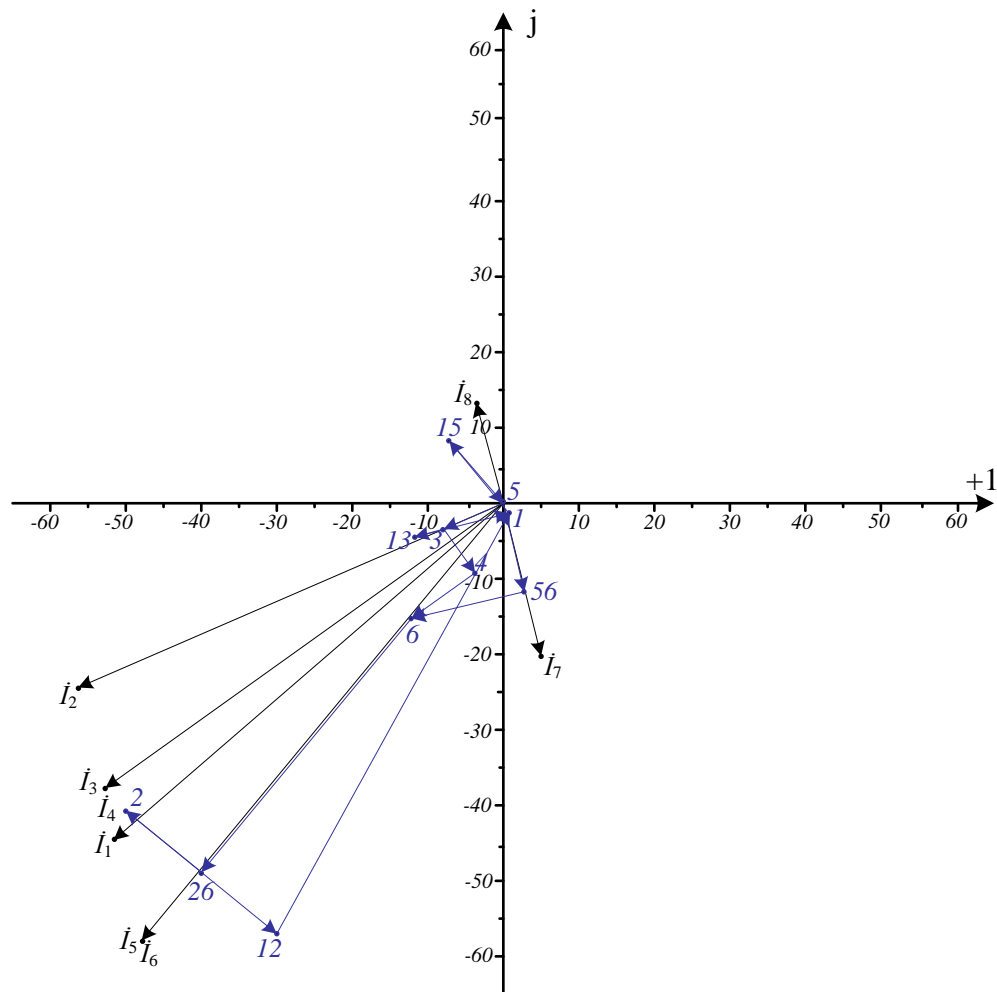
Таблица 2 – Результаты расчета

	Алгебраическая форма		Показательная форма	
	Re	Im	модуль	φ , град
ток \dot{I}_1	-0,516	-0,446	0,682	-139,125
ток \dot{I}_2	-0,563	-0,244	0,614	-156,565
ток \dot{I}_3	-0,527	-0,377	0,648	-144,415
ток \dot{I}_4	-0,527	-0,377	0,648	-144,415
ток \dot{I}_5	-0,479	-0,579	0,752	-129,612
ток \dot{I}_6	-0,479	-0,579	0,752	-129,612
ток \dot{I}_7	0,048	-0,202	0,208	-76,68
ток \dot{I}_8	-0,036	0,133	0,138	105,215
Мощность $S_{уст}$	47,304	8,863	48,127	10,612
Мощность $S_{номр}$	47,304	8,863	48,127	10,612
\dot{U}_{xx}	8,547	3,983	9,430	24,985
$Z_{ген}$	11,606	-1,397	11,689	-6,866

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Векторная диаграмма токов и совмещенная с ней топографическая векторная диаграмма напряжений

Масштаб: $\dot{I} : 100\text{мм} = 1\text{ A}$
 $\dot{\varphi} : 1\text{мм} = 1\text{В}$



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Определение токов методом законов Кирхгофа (расчеты MATHCAD)

$XL_1 := 16$	$XC_1 := 18$	$R_2 := 14$	$j := \sqrt{-1}$
$XL_3 := 11$	$XC_5 := 17$	$R_4 := 16$	
$XL_6 := 34$	$XC_7 := 74$	$R_5 := 58$	+
$XL_8 := 29$	$XC_8 := 95$	$R_7 := 58$	

$$E_6 := -31.027714788745 - j \cdot 55.9757171190477$$

$$Z_1 := j \cdot XL_1 - j \cdot XC_1 = -2i$$

$$Z_2 := R_2 = 14 \quad Z_6 := j \cdot XL_6 = 34i \quad Z_5 := R_5 - j \cdot XC_5 = 58 - 17i$$

$$Z_{34} := j \cdot XL_3 + R_4 = 16 + 11i \quad Z_3 := j \cdot XL_3 = 11i \quad Z_4 := R_4 = 16$$

$$Z_{56} := R_5 - j \cdot XC_5 + j \cdot XL_6 = 58 + 17i$$

$$Z_7 := R_7 - j \cdot XC_7 = 58 - 74i$$

$$Z_8 := j \cdot XL_8 - j \cdot XC_8 = -66i$$

Ограничительные приближения

$$\begin{array}{ll} I_1 := 0 & I_5 := 0 \\ I_2 := 0 & I_6 := 0 \\ I_3 := 0 & I_7 := 0 \\ I_4 := 0 & I_8 := 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} I_8 + I_6 = I_1 & I_6 \cdot Z_6 + I_1 \cdot Z_1 + I_7 \cdot Z_7 + I_5 \cdot Z_5 = E_6 \\ I_5 = I_6 & I_2 \cdot Z_2 + I_3 \cdot Z_3 + I_4 \cdot Z_4 - I_7 \cdot Z_7 = 0 \\ I_2 = I_8 + I_3 & -I_8 \cdot Z_8 - I_1 \cdot Z_1 - I_2 \cdot Z_2 = 0 \\ I_3 = I_4 & \\ I_1 = I_2 + I_7 & \end{array}$$

Решатель

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} := \text{find}(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8)$$

$I_1 = -0.516 - 0.446i$	$I_5 = -0.479 - 0.579i$
$I_2 = -0.563 - 0.244i$	$I_6 = -0.479 - 0.579i$
$I_3 = -0.527 - 0.377i$	$I_7 = 0.048 - 0.202i$
$I_4 = -0.527 - 0.377i$	$I_8 = -0.036 + 0.133i$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Определение токов методом контурных токов (расчеты MATHCAD)

$XL_1 := 16$	$XC_1 := 18$	$R_2 := 14$	$j := \sqrt{-1}$
$XL_3 := 11$	$XC_5 := 17$	$R_4 := 16$	
$XL_6 := 34$	$XC_7 := 74$	$R_5 := 58$	
$XL_8 := 29$	$XC_8 := 95$	$R_7 := 58$	
$E_6 := -31.027714788745 - j \cdot 55.9757171190477$			
$Z_1 := j \cdot XL_1 - j \cdot XC_1 = -2i$			
$Z_2 := R_2 = 14$	$Z_6 := j \cdot XL_6 = 34i$	$Z_5 := R_5 - j \cdot XC_5 = 58 - 17i$	
$Z_{34} := j \cdot XL_3 + R_4 = 16 + 11i$	$Z_3 := j \cdot XL_3 = 11i$	$Z_4 := R_4 = 16$	
$Z_{56} := R_5 - j \cdot XC_5 + j \cdot XL_6 = 58 + 17i$			
$Z_7 := R_7 - j \cdot XC_7 = 58 - 74i$			
$Z_8 := j \cdot XL_8 - j \cdot XC_8 = -66i$			

Оптимизация приближения

$$\begin{aligned}
 I_{11} &:= 0 \\
 I_{22} &:= 0 \\
 I_{33} &:= 0 \\
 I_{11} \cdot (Z_1 + Z_7 + Z_{56}) - I_{22} \cdot Z_7 - I_{33} \cdot Z_1 &= E_6 \\
 I_{22} \cdot (Z_2 + Z_{34} + Z_7) - I_{11} \cdot Z_7 - I_{33} \cdot Z_2 &= 0 \\
 I_{33} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_8) - I_{11} \cdot Z_1 - I_{22} \cdot Z_2 &= 0
 \end{aligned}$$

Решатель

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{bmatrix} := \text{find}(I_{11}, I_{22}, I_{33})$$

$I_{11} = -0.479 - 0.579i$	$I_{22} = -0.527 - 0.377i$	$I_{33} = 0.036 - 0.133i$
$I_1 := I_{11} - I_{33} = -0.516 - 0.446i$	$I_5 := I_{11} = -0.479 - 0.579i$	
$I_2 := I_{22} - I_{33} = -0.563 - 0.244i$	$I_6 := I_{11} = -0.479 - 0.579i$	
$I_3 := I_{22} = -0.527 - 0.377i$	$I_7 := I_{11} - I_{22} = 0.048 - 0.202i$	
$I_4 := I_{22} = -0.527 - 0.377i$	$I_8 := -I_{33} = -0.036 + 0.133i$	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Определение токов методом узловых напряжений (расчеты MATHCAD)

$XL_1 := 16$	$XC_1 := 18$	$R_2 := 14$	$j := \sqrt{-1}$
$XL_3 := 11$	$XC_5 := 17$	$R_4 := 16$	
$XL_6 := 34$	$XC_7 := 74$	$R_5 := 58$	
$XL_8 := 29$	$XC_8 := 95$	$R_7 := 58$	
$E_6 := -31.027714788745 - j \cdot 55.9757171190477$			
$Z_1 := j \cdot XL_1 - j \cdot XC_1 = -2i$			
$Z_2 := R_2 = 14$	$Z_6 := j \cdot XL_6 = 34i$	$Z_5 := R_5 - j \cdot XC_5 = 58 - 17i$	
$Z_{34} := j \cdot XL_3 + R_4 = 16 + 11i$	$Z_3 := j \cdot XL_3 = 11i$	$Z_4 := R_4 = 16$	
$Z_{56} := R_5 - j \cdot XC_5 + j \cdot XL_6 = 58 + 17i$			
$Z_7 := R_7 - j \cdot XC_7 = 58 - 74i$	+		
$Z_8 := j \cdot XL_8 - j \cdot XC_8 = -66i$			

Ограничивающие приближения

$$U_{15} := 0$$

$$U_{35} := 0$$

$$U_{65} := 0$$

$$U_{15} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_8} + \frac{1}{Z_{56}} \right) - U_{35} \cdot \frac{1}{Z_8} - U_{65} \cdot \frac{1}{Z_{56}} = \frac{E_6}{Z_{56}}$$

$$-U_{15} \cdot \frac{1}{Z_8} + U_{35} \cdot \left(\frac{1}{Z_8} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_{34}} \right) - U_{65} \cdot \frac{1}{Z_{34}} = 0$$

$$-U_{15} \cdot \frac{1}{Z_{56}} - U_{35} \cdot \frac{1}{Z_{34}} + U_{65} \cdot \left(\frac{1}{Z_{34}} + \frac{1}{Z_7} + \frac{1}{Z_{56}} \right) = -\frac{E_6}{Z_{56}}$$

Решатель

$$\begin{bmatrix} U_{15} \\ U_{35} \\ U_{65} \end{bmatrix} := \text{find}(U_{15}, U_{35}, U_{65})$$

$U_{15} = -0.893 + 1.031i$	$U_{35} = 7.889 + 3.419i$	$U_{65} = 12.175 + 15.256i$
$I_1 := \frac{U_{15}}{Z_1} = -0.516 - 0.446i$	$I_5 := \frac{U_{65} - U_{15} + E_6}{Z_{56}} = -0.479 - 0.579i$	
$I_2 := \frac{-U_{35}}{Z_2} = -0.563 - 0.244i$	$I_6 := I_5 = -0.479 - 0.579i$	
$I_3 := \frac{U_{35} - U_{65}}{Z_{34}} = -0.527 - 0.377i$	$I_7 := \frac{-U_{65}}{Z_7} = 0.048 - 0.202i$	
$I_4 := I_3 = -0.527 - 0.377i$	$I_8 := \frac{U_{35} - U_{15}}{Z_8} = -0.036 + 0.133i$	