

Учреждение образования
Белорусский Государственный университет информатики и
радиоэлектроники

Кафедра теоретических основ электротехники

Типовой расчет по курсу: «Теория электрических цепей»
Тема: «Расчет сложной цепи периодического синусоидального тока»

Шифр студента № 950503-21

Проверил:
Батюков С.В.

Выполнил:
Ст. гр. № 950503
Полховский А.Ф.

Минск 2020

Таблица1. – Исходные данные

№ ветви	Начало -конец	Сопротивления			Источник ЭДС		Источник тока	
		R	XL	XC	мод.	арг.	мод.	арг.
1	5-2	0	39	0	0	0	0	0
2	2-3	42	0	57	75	259	0	0
3	3-1	0	44	0	0	0	0	0
4	1-6	67	0	16	0	0	0	0
5	6-4	0	12	15	0	0	0	0
6	4-5	66	0	0	0	0	0	0
7	2-6	49	0	0	0	0	0	0
8	3-5	0	41	31	0	0	0	0

Порядок выполнения работы

1. Расшифровать задание.
2. Рассчитать методом эквивалентных преобразований токи во всех ветвях заданной цепи.
3. Составить баланс мощностей для заданной цепи.
4. По результатам расчетов построить векторную диаграмму токов и совмещенную с ней топографическую векторную диаграмму напряжений.
5. Полагая наличие индуктивной связи между любыми двумя индуктивностями, записать для заданной цепи уравнения по законам Кирхгофа.
6. Определить токи в ветвях исходной схемы методом законов Кирхгофа.
7. Определить токи в ветвях исходной схемы методом контурных токов.
8. Определить токи в ветвях исходной схемы методом узловых напряжений.
9. Определить ток в указанной ветви МЭГ.

1. Начертим схему согласно варианту.

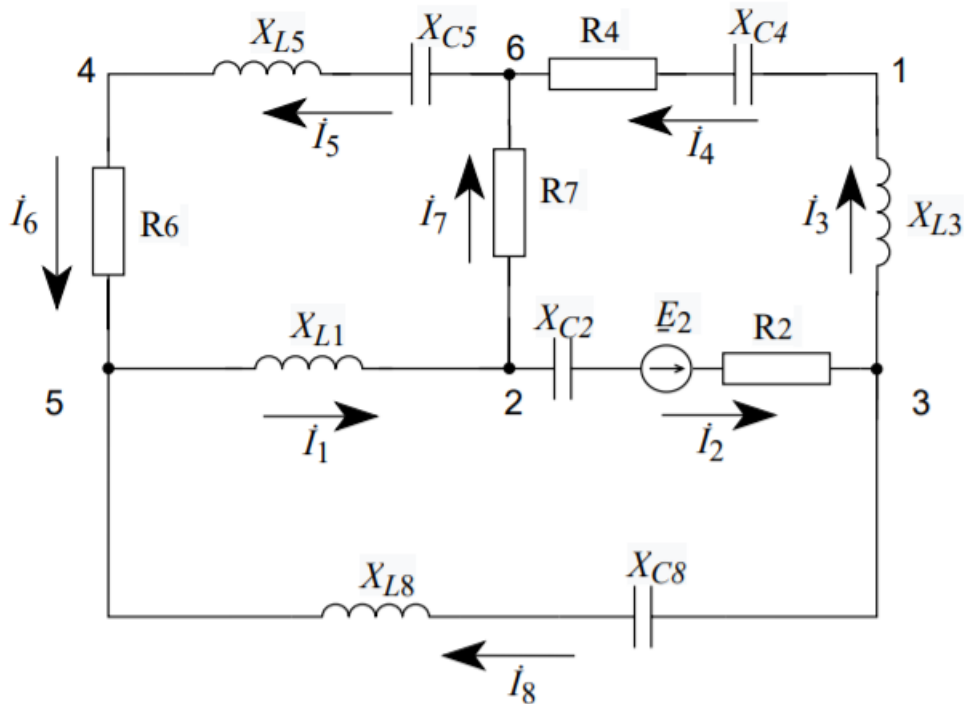


Рис. 1 – Исходная схема

2. Рассчитаем методом эквивалентных преобразований токи во всех ветвях заданной цепи

Определим комплексные сопротивления ветвей Z_N , а также объединим последовательно включенные сопротивления ветвей 3-4, 5-6:

$$Z_1 = j \cdot X_{L1} = j39 \text{ (Ом)},$$

$$Z_2 = R_2 - j \cdot X_{C2} = 42 - j57 \text{ (Ом)},$$

$$Z_3 = j \cdot X_{L3} = j44 \text{ (Ом)},$$

$$Z_4 = R_4 - j \cdot X_{C4} = 67 - j16 \text{ (Ом)},$$

$$Z_5 = j \cdot X_{L5} - j \cdot X_{C5} = -j3 \text{ (Ом)},$$

$$Z_8 = j \cdot X_{L8} - j \cdot X_{C8} = j10 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{56} = Z_5 + R_6 = 66 - j3 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{34} = Z_3 + Z_4 = j \cdot 44 + 67 - j \cdot 16 = 67 - j28 \text{ (Ом)}.$$

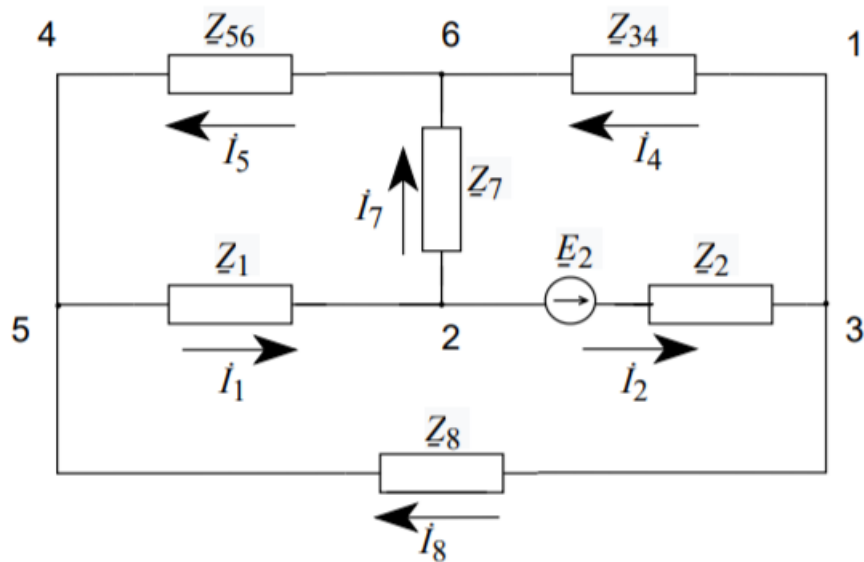


Рис. 2

Преобразуем заданную цепь. Треугольник 6 – 2 – 5 преобразуем в звезду (рис. 3).

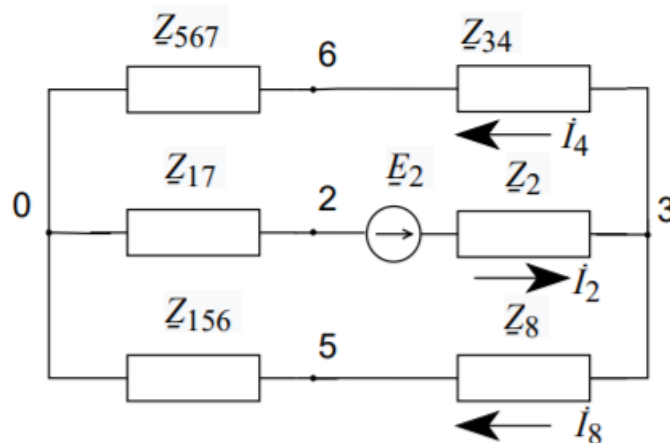


Рис.3 – Схема после преобразования

Определим комплексные сопротивления Z_{17} , Z_{156} , Z_{567} :

$$Z_{17} = \frac{Z_1 \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 4,738 - j15,134 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{156} = \frac{Z_1 \cdot Z_{56}}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 7,308 + j20,095 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{567} = \frac{Z_{56} \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 25,247 - j9,182 \text{ (Ом)}.$$

Определим эквивалентное входное сопротивление относительно источника E_2 , как сумму параллельно соединенных Z_{34567} , Z_{1568} с последовательно соединенными Z_{17} , Z_2 .

$$Z_{\text{экв}} = \frac{(Z_{34} + Z_{567}) \cdot (Z_{156} + Z_8)}{Z_{34} + Z_{567} + Z_{156} + Z_8} + Z_2 + Z_{17} = 59,193 - j18,718 \text{ (Ом)}.$$

Находим ток \dot{I}_2 :

$$\dot{I}_2 = \frac{E_2}{Z_{\text{экв}}} = \frac{-14,311 - j73,622}{59,193 - j18,718} = 0,138 - j1,2 \text{ (А)}.$$

По схеме (рис. 3), пользуясь правилом плеч, найдем токи $\dot{I}_3 = \dot{I}_4$, \dot{I}_8 :

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_4 = \dot{I}_2 \cdot \frac{Z_8 + Z_{156}}{Z_8 + Z_{156} + Z_{34} + Z_{567}} = 0,282 - j0,185 \text{ (А)},$$

$$\dot{I}_8 = \dot{I}_2 \cdot \frac{Z_{34} + Z_{567}}{Z_8 + Z_{156} + Z_{34} + Z_{567}} = -0,144 - j1,015 \text{ (А)}.$$

Найдем напряжение между узлами 5-2 — \dot{U}_{52} (рис.3), а затем ток \dot{I}_1 (рис.2):

$$\dot{U}_{52} = \dot{I}_2 \cdot Z_{17} + \dot{I}_8 \cdot Z_{156} = 38,162 - j13,919 \text{ (В)},$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{52}}{Z_1} = \frac{38,162 - j13,91}{j39} = -0,357 - j0,979 \text{ (А)}.$$

Определяем токи \dot{I}_7 , $\dot{I}_5 = \dot{I}_6$ по первому закону Кирхгофа (рис. 2):

$$\dot{I}_7 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = -0,357 - j0,979 - 0,138 + j1,2 = -0,495 + j0,222 \text{ (А)},$$

$$\dot{I}_5 = \dot{I}_6 = \dot{I}_4 + \dot{I}_7 = 0,282 - j0,185 - 0,495 + j0,222 = -0,213 + j0,037 \text{ (А)}.$$

3. Составим баланс мощностей

Мощность источника равна:

$$\tilde{S} = \underline{E}_2 \cdot \dot{I}_2 = (-14,311 - j73,622) \cdot (0,138 - j1,2) = 86,372 - j27,333 \text{ (Вт)}.$$

Мощность, потребляемая в цепи, равна сумме активной (P) и реактивной (Q) мощностей:

$$P = |\dot{I}_2|^2 \cdot R_2 + |\dot{I}_4|^2 \cdot R_4 + |\dot{I}_6|^2 \cdot R_6 + |\dot{I}_7|^2 \cdot R_7 = 86,389 \text{ (Вт)},$$

$$Q = |\dot{I}_1|^2 \cdot X_{L1} + |\dot{I}_2|^2 \cdot (-X_{C2}) + |\dot{I}_3|^2 \cdot X_{L3} + |\dot{I}_4|^2 \cdot (-X_{C4}) + \\ + |\dot{I}_5|^2 \cdot (X_{L5} - X_{C5}) + |\dot{I}_8|^2 \cdot (X_{L8} - X_{C8}) = -27,318 \text{ (ВАр)},$$

$$\hat{S} = P + jQ = 86,389 - j27,318 \text{ (ВА)},$$

$$\underline{\tilde{S}} = \underline{\hat{S}}$$

4. Построение векторных диаграмм

Найденные токи:

$$\dot{I}_1 = -0,357 - j0,979 = 1,042e^{-j110.038^\circ} (\text{A}),$$

$$\dot{I}_2 = 0,138 - j1,2 = 1,208e^{-j83.452^\circ} (\text{A}),$$

$$\dot{I}_3 = 0,282 - j0,185 = 0,337e^{-j33.266^\circ} (\text{A}),$$

$$\dot{I}_4 = 0,282 - j0,185 = 0,337e^{-j33.266^\circ} (\text{A}),$$

$$\dot{I}_5 = -0,213 + j0,037 = 0,216e^{j170.22^\circ} (\text{A}),$$

$$\dot{I}_6 = -0,213 + j0,037 = 0,216e^{j170.22^\circ} (\text{A}),$$

$$\dot{I}_7 = -0,495 + j0,222 = 0,542e^{j155.862^\circ} (\text{A}),$$

$$\dot{I}_8 = -0,144 - j1,015 = 1,025e^{-j98.088^\circ} (\text{A}).$$

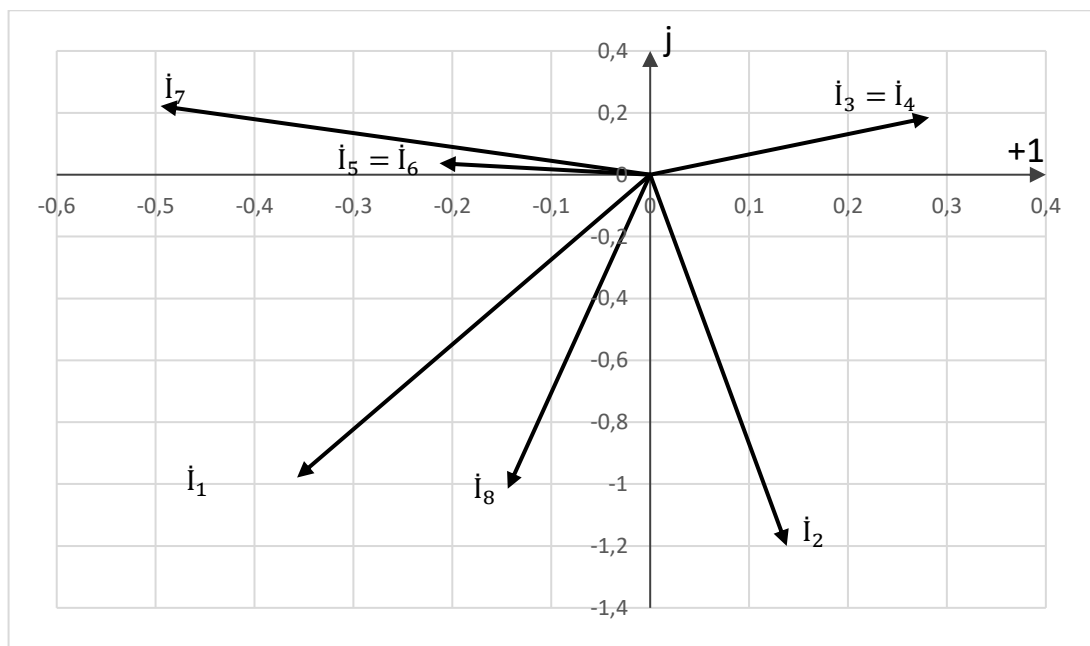


Рис. 4 – Векторная диаграмма токов

По схеме (рис. 5) рассчитаем потенциалы:

$$\dot{U}_5 = 0 (\text{В}),$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_5 - \dot{I}_1 \cdot X_{L1} = -38,162 + j13,919 (\text{В}),$$

$$\dot{U}_8 = \dot{U}_2 - \dot{I}_2 \cdot jX_{C2} = 30,249 + j21,771 (\text{В}),$$

$$\dot{U}_7 = \dot{U}_8 + \underline{E}_2 = 15,938 - j51,85 (\text{В}),$$

$$\begin{aligned}
\dot{U}_3 &= \dot{U}_7 - \dot{I}_2 \cdot R_2 = 10,152 - j1,443 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_1 &= \dot{U}_3 + \dot{I}_3 \cdot jX_{L3} = 2,011 - j13,85 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_9 &= \dot{U}_1 + \dot{I}_4 \cdot X_{C4} = 4,971 - j9,339 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_6 &= \dot{U}_9 - \dot{I}_4 \cdot R_4 = -13,924 + j3,057 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_{10} &= \dot{U}_6 + \dot{I}_5 \cdot jX_{C5} = -14,474 - j0,133 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_4 &= \dot{U}_{10} - \dot{I}_5 \cdot jX_{C5} = -13,924 + j3,057 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_5 &= \dot{U}_4 - \dot{I}_6 \cdot R_6 = 0 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_6 &= \dot{U}_2 - \dot{I}_7 \cdot R_7 = -13,924 - j3,057 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_{11} &= \dot{U}_3 + \dot{I}_8 \cdot jX_{C8} = 41,622 - j5,914 \text{ (B)}, \\
\dot{U}_5 &= \dot{U}_{11} - \dot{I}_8 \cdot jX_{L8} = 0 \text{ (B)}.
\end{aligned}$$

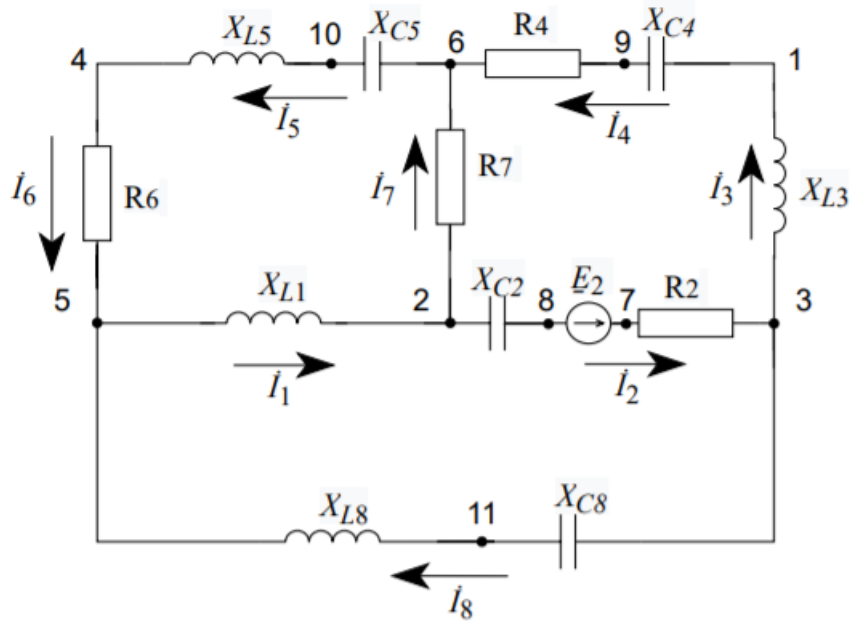


Рис. 5 – схема для построения векторной диаграммы

Построим потенциальную векторную диаграмму напряжений (рис. 6):

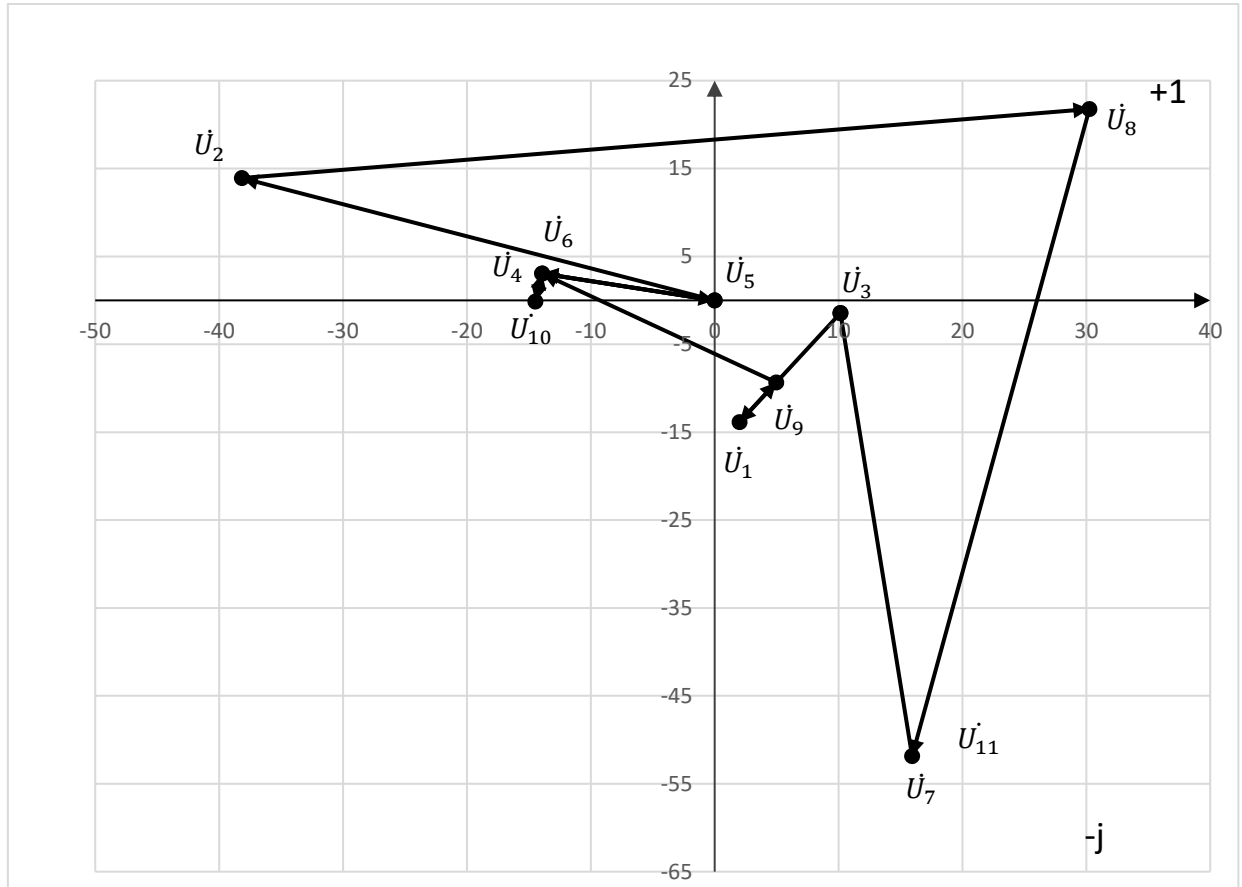


Рис 6. – Векторная диаграмма напряжений

5. Определим токи в ветвях исходной схемы методом законов Кирхгофа

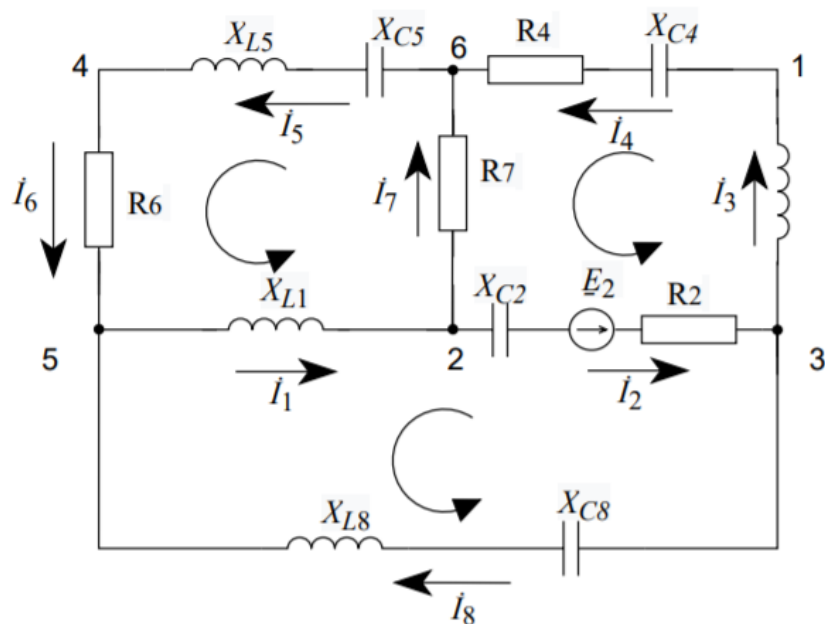


Рис. 6 – Схема для метода законов Кирхгофа

Количество уравнений по первому закону Кирхгофа:

$$N_{\text{yp}} = 4 - 1 = 3$$

Запишем уравнения:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_5 + \dot{I}_7,$$

$$\dot{I}_5 = \dot{I}_4 + \dot{I}_8,$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_3 + \dot{I}_7,$$

Количество уравнений по второму закону Кирхгофа:

$$N_{\text{yp}} = 10 - 4 + 1 - 4 = 3$$

Запишем уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 \cdot jX_{L1} + \dot{I}_7 \cdot R_7 + \dot{I}_5 \cdot (jX_{L5} - jX_{C5}) + \dot{I}_6 \cdot R_6 &= 0, \\ -\dot{I}_1 \cdot jX_{L1} + \dot{I}_2 \cdot (R_2 - jX_{C2}) - \dot{I}_8 \cdot (jX_{L8} - jX_{C8}) &= 0, \\ \dot{I}_4 \cdot (-jX_{C7}) + \dot{I}_1 \cdot jX_{L1} + \dot{I}_2 \cdot (jX_{L2} - jX_{C2}) &= E_7. \end{aligned}$$

Для нахождения токов в ветвях необходимо решить данную систему уравнений. Решение данной системы уравнений представлено в приложении 3.

6. Определим токи в ветвях исходной схемы методом контурных токов

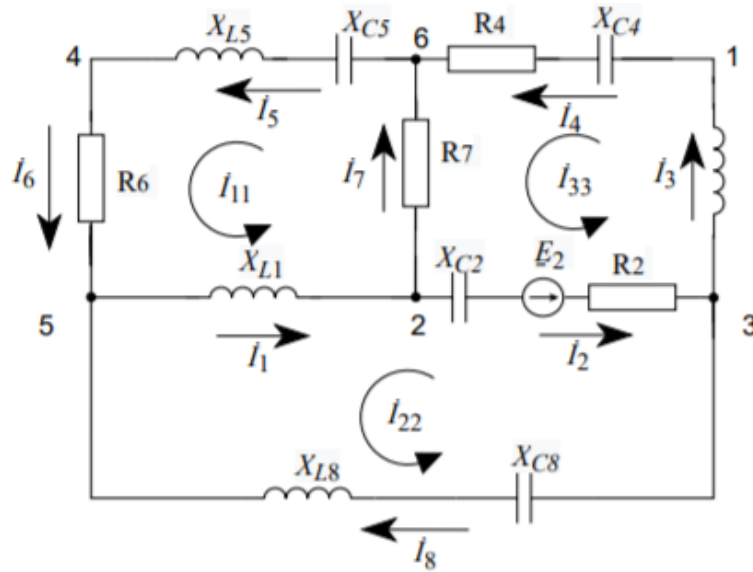


Рис 10. – Схема для метода контурных токов

Запишем уравнения для определения контурных токов и токов в ветвях исходной схемы:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{11} \cdot (R_6 + R_7 + jX_{L1} + jX_{L5} - jX_{C5}) - \dot{I}_{33} \cdot R_7 - \dot{I}_{22} \cdot jX_{L1} &= 0, \\ \dot{I}_{22}(R_2 + jX_{L1} + jX_{L8} - jX_{C8} - jX_{C2}) - \dot{I}_{11} \cdot jX_{L1} + \dot{I}_{33} \cdot -(R_2 + jX_{C2}) &= -E_2, \\ \dot{I}_{33} \cdot (jX_{L3} + R_4 - jX_{C4} - jX_{C2} + R_7) - \dot{I}_{11} \cdot R_7 + \dot{I}_{33} \cdot (jX_{C2} - R_2) &= E_2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= -\dot{I}_{22} + \dot{I}_{11}, \\ \dot{I}_2 &= -\dot{I}_{22} + \dot{I}_{33}, \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_{33}, \\ \dot{I}_4 &= \dot{I}_{33}, \\ \dot{I}_5 &= \dot{I}_{11}, \\ \dot{I}_6 &= \dot{I}_{11}, \\ \dot{I}_7 &= \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22}, \\ \dot{I}_8 &= -\dot{I}_{22}. \end{aligned}$$

Определение токов в ветвях исходной схемы (рис. 10) методом контурных токов представлено в приложении 2.

7. Определим токи в ветвях исходной схемы методом узловых напряжений

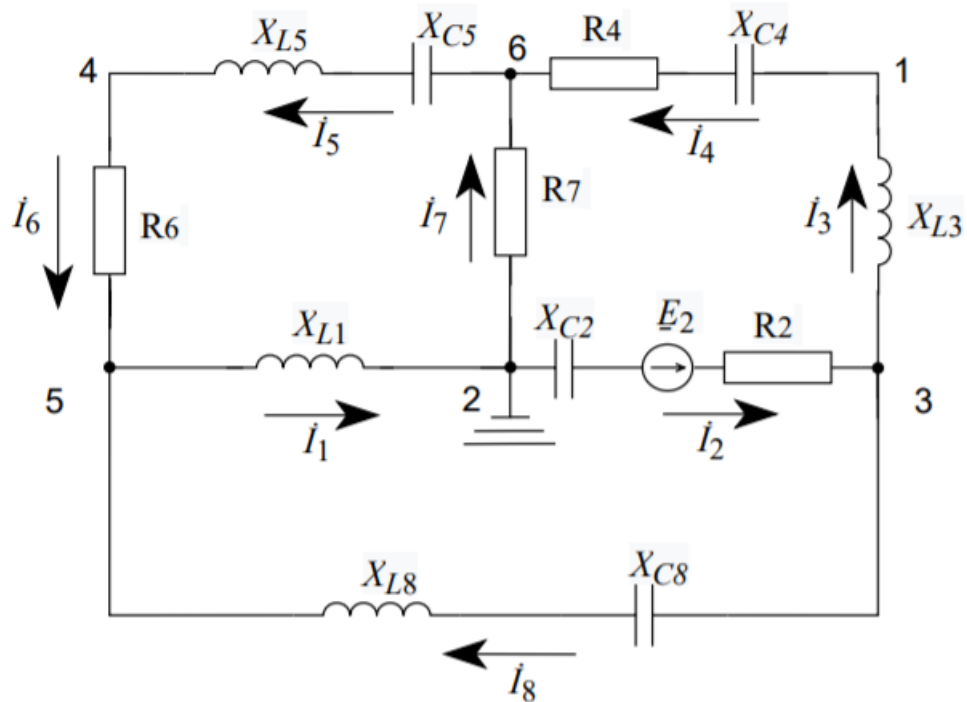


Рис 11. – Схема для метода узловых напряжений

Примем потенциал 2-го узла равным нулю, тогда получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_{33} = \dot{\varphi}_1 \dot{Y}_{11} - \dot{\varphi}_6 \dot{Y}_{16} - \dot{\varphi}_2 \dot{Y}_{12}, \\ 0 = \dot{\varphi}_6 \dot{Y}_{66} - \dot{\varphi}_1 \dot{Y}_{61} - \dot{\varphi}_2 \dot{Y}_{62}, \\ \dot{I}_{55} = \dot{\varphi}_2 \dot{Y}_{22} - \dot{\varphi}_1 \dot{Y}_{21} - \dot{\varphi}_6 \dot{Y}_{26}. \end{cases}$$

Запишем уравнения для определения узловых токов:

$$\dot{I}_{33} = \frac{E_2}{-jX_{C2} + R_2},$$

$$\dot{I}_{55} = -\dot{I}_{33}.$$

Запишем уравнения для определения проводимостей:

$$\begin{aligned}
\dot{Y}_{11} &= \frac{1}{-jX_{C8} + jX_{L8}} + \frac{1}{jX_{L1}} + \frac{1}{jX_{L6} + R_5}, \\
\dot{Y}_{22} &= \frac{1}{-jX_{C8} + jX_{L8}} + \frac{1}{jX_{L2} - jX_{C2}} + \frac{1}{-jX_{C4} + R_4 + R_3}, \\
\dot{Y}_{66} &= \frac{1}{jX_{L6} + R_5} + \frac{1}{-jX_{C4} + R_4 + R_3} + \frac{1}{-jX_{C7} + R_7}, \\
\dot{Y}_{16} &= \dot{Y}_{61} = \frac{1}{jX_{L6} + R_5}, \\
\dot{Y}_{12} &= \dot{Y}_{21} = \frac{1}{-jX_{C8} + jX_{L8}}, \\
\dot{Y}_{62} &= \dot{Y}_{26} = \frac{1}{-jX_{C4} + R_4 + R_3}.
\end{aligned}$$

Запишем уравнения для определения токов:

$$\begin{aligned}
i_1 &= \frac{\dot{\varphi}_1}{jX_{L1}}, \\
i_2 &= \frac{0 - \dot{\varphi}_2}{jX_{L2} - jX_{C2}}, \\
i_3 &= \frac{\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_6}{-jX_{C4} + R_4 + R_3}, \\
i_4 &= i_3, \\
i_5 &= \frac{\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_1}{jX_{L6} + R_5},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_6 &= \dot{I}_5, \\ \dot{I}_7 &= \frac{0 - \varphi_6}{-jX_{C7} + R_7}, \\ \dot{I}_8 &= \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_8}{-jX_{C8} + jX_{L8}}. \end{aligned}$$

Определение токов в ветвях исходной схемы (рис. 11) методом узловых потенциалов представлено в приложении 3.

8. Рассчитаем ток в ветви 4 исходной цепи (рис. 12) методом эквивалентного генератора

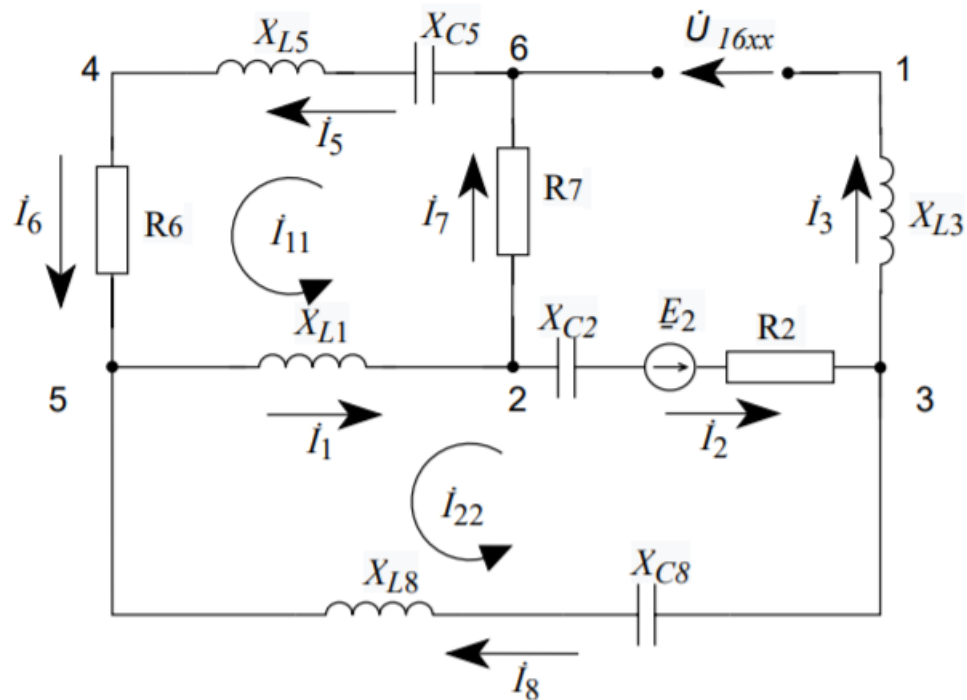


Рис. 12 – Схема для метода эквивалентного генератора напряжения

Составим уравнения для нахождения токов в ветвях схемы методом контурных токов (рис. 13):

$$\begin{cases} \dot{I}_{11}(Z_1 + Z_5 + Z_6 + Z_7) + \dot{I}_{22}Z_1 = 0 \\ \dot{I}_{22}(Z_1 + Z_2 + Z_8) + \dot{I}_{11}Z_1 = E_2 \end{cases}$$

Отсюда получаем значения:

$$\dot{I}_{11} = -0,422 + j0,122 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{22} = 0,03 - j1,356 \text{ (A)}.$$

Напряжение холостого хода равно:

$$U_{16xx} = -\dot{I}_{11} \cdot Z_7 + \dot{I}_{22} \cdot Z_2 - E_2 = 41,019 - j8,99 \text{ (В)}.$$

Закоротив источники ЭДС, определим эквивалентное сопротивление схемы (рис.13):

$$Z_1 = j \cdot X_{L1} = j39 \text{ (Ом)},$$

$$Z_2 = R_2 - j \cdot X_{C2} = 42 - j57 \text{ (Ом)},$$

$$Z_3 = j \cdot X_{L3} = j44 \text{ (Ом)},$$

$$Z_5 = j \cdot X_{L5} - j \cdot X_{C5} = -j3 \text{ (Ом)},$$

$$Z_8 = j \cdot X_{L8} - j \cdot X_{C8} = j10 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{56} = Z_5 + R_6 = 66 - j3 \text{ (Ом)},$$

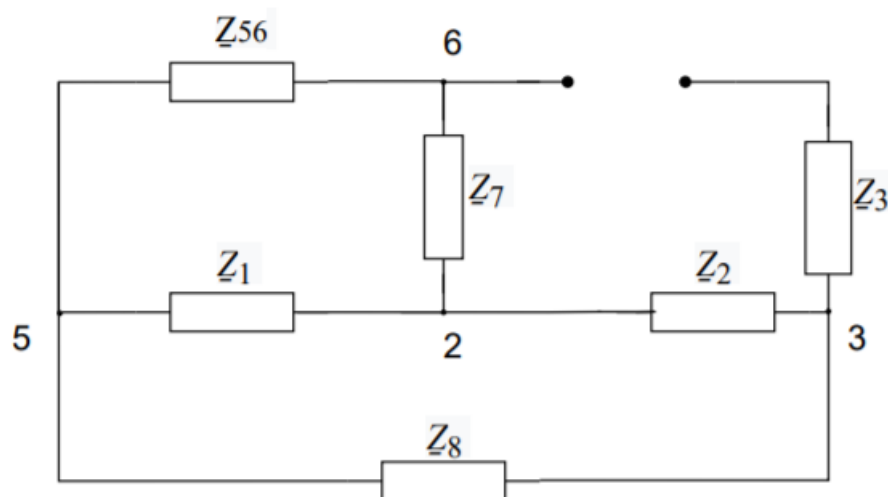


Рис. 13

Треугольник с сопротивлениями Z_{56} , Z_1 , Z_7 преобразуем в эквивалентную звезду:

$$Z_{17} = \frac{Z_1 \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 4,738 - j15,134 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{156} = \frac{Z_1 \cdot Z_{56}}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 7,308 + j20,095 \text{ (Ом)},$$

$$Z_{567} = \frac{Z_{56} \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 25,247 - j9,182 \text{ (Ом)}.$$

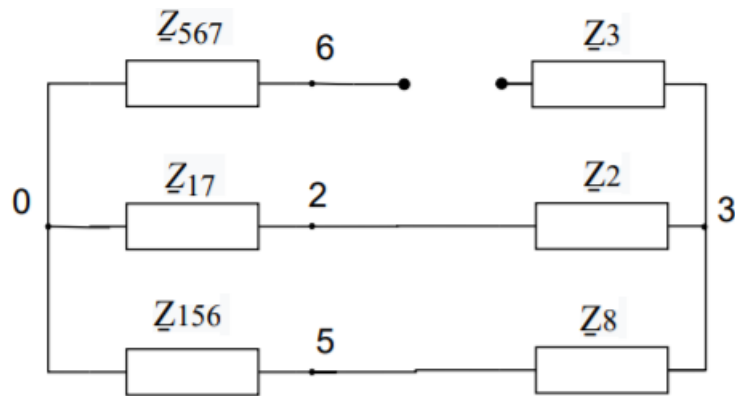


Рис. 14

Тогда эквивалентное сопротивление цепи равно:

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{(Z_{17} + Z_2) \cdot (Z_{156} + Z_8)}{Z_{17} + Z_2 + Z_{156} + Z_8} + Z_{567} + Z_3 = 49,303 + j60,422 \text{ (Ом)}.$$

Находим ток \dot{I}_4 :

$$\dot{I}_4 = \frac{U_{16\text{xx}}}{Z_{\text{ЭКВ}}} = \frac{41,019 - j8,99}{49,303 + j60,422} = 0,282 - 0,185 \text{ (А)}.$$

Таблица 10 – Полученные результаты

	Алгебраическая форма		Показательная форма	
	Re	Im	Модуль	ϕ , град
ток \dot{I}_1	-0,357	-0,979	1,042	-110,038
ток \dot{I}_2	0,138	-1,2	1,208	-83,452
ток \dot{I}_3	0,282	-0,185	0,337	-33,266
ток \dot{I}_4	0,282	-0,185	0,337	-33,266
ток \dot{I}_5	-0,213	0,037	0,216	170,22
ток \dot{I}_6	-0,213	0,037	0,216	170,22
ток \dot{I}_7	-0,495	0,222	0,542	155,862
ток \dot{I}_8	-0,144	-1,015	1,025	-98,088
Мощность $S_{\text{ист}}$	86,372	-27,333	90,593	-17,56
Мощность $S_{\text{потр}}$	86,389	-27,318	90,605	-17,548
\dot{U}_{xx}	41,019	-8,99	41,992	-12,362
$Z_{\text{ГЕН}}$	49,303	60,422	77,985	50,786

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Определение токов методом эквивалентных преобразований, баланс мощностей, векторная диаграмма

(расчеты MATHCAD)

R2 := 42	XL1 := 39	XC2 := 57	E2 := 75·e ^{i·259deg}
R4 := 67	XL3 := 44	XC4 := 16	
R6 := 66	XL5 := 12	XC5 := 15	E2 = -14.311 - 73.622i
R7 := 49	XL8 := 41	XC8 := 31	
z1 := i·XL1	z1 = 39i		
z2 := R2 - i·XC2	z2 = 42 - 57i		
z3 := i·XL3	z3 = 44i		
z4 := R4 - i·XC4	z4 = 67 - 16i		
z5 := XL5i - XC5i	z5 = -3i		
z6 := R6	z6 = 66		
z7 := R7	z7 = 49		
z8 := XL8i - XC8i	z8 = 10i		
z34 := z3 + z4	z34 = 67 + 28i		
z56 := z5 + z6	z56 = 66 - 3i		
z17 := $\frac{z1 \cdot z7}{z1 + z56 + z7}$	z17 = 4.738 + 15.134i		
z156 := $\frac{z1 \cdot z56}{z1 + z56 + z7}$	z156 = 7.308 + 20.095i		
z567 := $\frac{z56 \cdot z7}{z1 + z56 + z7}$	z567 = 25.247 - 9.182i		
Zvx := $\frac{(z34 + z567) \cdot (z156 + z8)}{z34 + z567 + z156 + z8} + z2 + z17$	Zvx = 59.193 - 18.718i		
I2 := $\frac{E2}{Zvx}$	I2 = 0.138 - 1.2i	I2 = 1.208	$\frac{\arg(I2)}{\deg} = -83.452$
I3 := I2 · $\frac{z8 + z156}{z8 + z156 + z34 + z567}$	I3 = 0.282 - 0.185i	I3 = 0.337	$\frac{\arg(I3)}{\deg} = -33.266$
I4 := I3	I4 = 0.282 - 0.185i	I4 = 0.337	$\frac{\arg(I4)}{\deg} = -33.266$
I8 := I2 · $\frac{z34 + z567}{z8 + z156 + z34 + z567}$	I8 = -0.144 - 1.015i	I8 = 1.025	$\frac{\arg(I8)}{\deg} = -98.088$
U52 := I2·z17 + I8·z156	U52 = 38.162 - 13.919i		
I1 := $\frac{U52}{z1}$	I1 = -0.357 - 0.979i	I1 = 1.042	$\frac{\arg(I1)}{\deg} = -110.038$

$$\begin{aligned}
\underline{I1} &:= \frac{U52}{z1} & I1 &= -0.357 - 0.979i & |I1| &= 1.042 & \frac{\arg(I1)}{\deg} &= -110.038 \\
I7 &:= I1 - I2 & I7 &= -0.495 + 0.222i & |I7| &= 0.542 & \frac{\arg(I7)}{\deg} &= 155.862 \\
I5 &:= I4 + I7 & I5 &= -0.213 + 0.037i & |I5| &= 0.216 & \frac{\arg(I5)}{\deg} &= 170.22 \\
I6 &:= I5 & I6 &= -0.213 + 0.037i & |I6| &= 0.216 & \frac{\arg(I6)}{\deg} &= 170.22 \\
P &:= (|I2|)^2 \cdot R2 + (|I4|)^2 \cdot R4 + (|I6|)^2 \cdot R6 + (|I7|)^2 \cdot R7 \\
Q &:= (|I1|)^2 \cdot XL1 + (|I2|)^2 \cdot (-XC2) + (|I3|)^2 \cdot XL3 + (|I4|)^2 \cdot (-XC4) + (|I5|)^2 \cdot (XL5 - XC5) + (|I8|)^2 \cdot (XL8 - XC8) \\
\underline{I2} &:= 0.138 + i \cdot 1.2 \\
\underline{S} &:= E2 \cdot \underline{I2} \\
P &= 86.389 \quad Q = -27.318 \\
S &= 86.372 - 27.333i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U5 &:= 0 \\
U2 &:= U5 - I1 \cdot iXL1 & U2 &= -38.162 + 13.919i \\
U8 &:= U2 + I2 \cdot iXC2 & U8 &= 30.249 + 21.771i \\
U7 &:= U8 + E2 & U7 &= 15.938 - 51.851i \\
U3 &:= U7 - I2 \cdot R2 & U3 &= 10.152 - 1.443i \\
U1 &:= U3 - I3 \cdot i(XL3) & U1 &= 2.011 - 13.851i \\
U9 &:= U1 + I4 \cdot iXC4 & U9 &= 4.971 - 9.339i \\
U6 &:= U9 - I4 \cdot R4 & U6 &= -13.924 + 3.057i \\
U10 &:= U6 + I5 \cdot iXC5 & U10 &= -14.474 - 0.133i \\
U4 &:= U10 - I5 \cdot iXC5 & U4 &= -13.924 + 3.057i \\
U5 &:= 0 \\
U6 &:= U2 - I7 \cdot R7 & U6 &= -13.924 + 3.057i \\
U11 &:= U3 + I8 \cdot iXC8 & U11 &= 41.622 - 5.914i \\
U5 &= 0
\end{aligned}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчет исходной схемы методом контурных токов

(расчеты MATHCAD)

Given

$$\Gamma_{11} \cdot (R_6 + i \cdot XL_1 + R_7 + i \cdot XL_5 - i \cdot XC_5) - \Gamma_{33} \cdot R_7 - \Gamma_{22} \cdot i \cdot XL_1 = 0$$

$$\Gamma_{22} \cdot (i \cdot XL_1 + R_2 + i \cdot XL_8 - i \cdot XC_8 - i \cdot XC_2) - \Gamma_{11} \cdot i \cdot XL_1 - \Gamma_{33} \cdot R_2 + \Gamma_{33} \cdot i \cdot XC_2 = 0$$

$$\Gamma_{33} \cdot (i \cdot XL_3 - i \cdot XC_4 + R_4 + R_7 - i \cdot XC_2) - \Gamma_{11} \cdot R_7 + \Gamma_{33} \cdot i \cdot XC_2 - \Gamma_{33} \cdot R_2 = E_2$$

$$I_1 = -\Gamma_{22} + \Gamma_{11}$$

$$I_2 = -\Gamma_{22} + \Gamma_{33}$$

$$I_3 = \Gamma_{33}$$

$$I_4 = \Gamma_{33}$$

$$I_5 = \Gamma_{11}$$

$$I_6 = \Gamma_{11}$$

$$I_7 = \Gamma_{11} - \Gamma_{22}$$

$$I_8 = -\Gamma_{22}$$

$$\text{Find}(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8) = \begin{pmatrix} -0,354 - 0,976i \\ 0,140 - 1,250i \\ 0,285 - 0,188i \\ 0,285 - 0,188i \\ -0,213 + 0,037i \\ -0,213 + 0,037i \\ -0,512 + 0,212i \\ -0,144 - 1,010i \end{pmatrix} +$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Расчет исходной схемы методом законов Кирхгофа (расчеты MATHCAD)

$$\begin{array}{llll} I1 := 0 & I3 := 0 & I5 := 0 & I7 := 0 \\ I2 := 0 & I4 := 0 & I6 := 0 & I8 := 0 \end{array}$$

Given

$$I1 = I2 + I7$$

$$I5 = I4 + I7$$

$$I2 = I4 + I8$$

$$I1 \cdot j \cdot XL1 + I7 \cdot (R7) + I5 \cdot (j \cdot XL5 - j \cdot XC5) + I5 \cdot R6 = 0$$

$$-I1 \cdot (j \cdot XL1) - I2 \cdot (R2 - j \cdot XC2) - I8 \cdot (j \cdot XL8 - j \cdot XC8) = 0$$

$$I4 \cdot (R4 - j \cdot XC4) - I7 \cdot R7 + I2 \cdot (R2 - XC2) + I4 \cdot (j \cdot XL3) = E2$$

$$I3 = I4$$

$$I5 = I6$$

$$\text{Find}(I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8) = \begin{pmatrix} -0,357 - 0,979i \\ 0,138 - 1,195i \\ 0,288 - 0,179i \\ 0,288 - 0,179 \\ -0,213 + 0,04i \\ -0,213 + 0,04 \\ -0,495 + 0,222i \\ -0,144 - 1,015i \end{pmatrix}$$

+