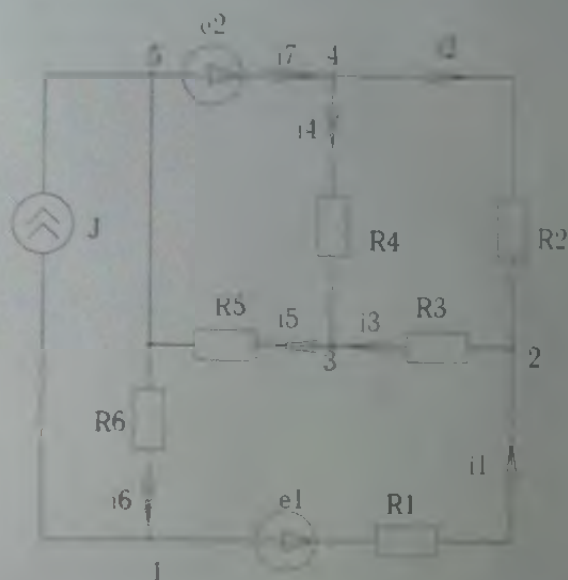


Исходные данные:

Вариант № 373

$$e_1 = 100(\text{В}) \quad e_2 = 150(\text{В}) \quad J = 10(\text{А})$$

$$R_1 = 50(\text{Ом}) \quad R_2 = 45(\text{Ом}) \quad R_3 = 40(\text{Ом}) \quad R_4 = 30(\text{Ом}) \quad R_5 = 35(\text{Ом}) \quad R_6 = 20(\text{Ом})$$



1. Определение токов в ветвях цепи методом узловых потенциалов:

1.1 В заданной цепи пять узлов. Приравняем нулю потенциал узла 5.

Тогда: $\Phi_5 = 0$ $\Phi_4 = \Phi_5 + e_2$ $\Phi_4 = 150$

1.2 Составим расчетную систему уравнений для узлов потенциалы которых подлежат определению:

$$g_{11}\Phi_1 - g_{12}\Phi_2 - g_{13}\Phi_3 - g_{14}\Phi_4 = J_1$$

$$-g_{21}\Phi_1 + g_{22}\Phi_2 - g_{23}\Phi_3 - g_{24}\Phi_4 = J_2$$

$$-g_{31}\Phi_1 - g_{32}\Phi_2 + g_{33}\Phi_3 - g_{34}\Phi_4 = J_3$$

Для узлов 4 и 5 уравнения не составляются, так как потенциалы этих узлов известны.

1.3. Определим узловые и межузловые проводимости

$$g_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_6} \quad g_{11} = 0.07$$

$$g_{22} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad g_{22} = 0.06722$$

$$g_{33} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \quad g_{33} = 0.0869$$

$$g_{12} = \frac{1}{R_1} \quad g_{21} = g_{12} \quad g_{12} = 0.02$$

$$g_{13} = 0 \quad g_{31} = g_{13}$$

$$g_{32} = \frac{1}{R_3} \quad g_{23} = g_{32} \quad g_{32} = 0.025$$

$$g_{14} = 0 \quad g_{41} = g_{14}$$

$$g_{24} = \frac{1}{R_2} \quad g_{42} = g_{24} \quad g_{24} = 0.02222$$

$$g_{34} = \frac{1}{R_4} \quad g_{43} = g_{34} \quad g_{34} = 0.03333$$

1.4. Определим узловые токи:

$$J_1 = -e_1 g_{12} - J \quad J_1 = -12$$

$$J_2 = e_1 g_{12} \quad J_2 = 2$$

$$J_3 = 0$$

1.5. Для решения системы перенесем в правую часть слагаемые с известным потенциалом

$$g_{11} \phi_1 - g_{12} \phi_2 - g_{13} \phi_3 = J_1 + g_{14} \phi_4$$

$$-g_{21} \phi_1 + g_{22} \phi_2 - g_{23} \phi_3 = J_2 + g_{24} \phi_4$$

$$-g_{31} \phi_1 - g_{32} \phi_2 + g_{33} \phi_3 = J_3 + g_{34} \phi_4$$

1.5.1. Данную систему запишем в матричном виде, где:

$$A = \begin{pmatrix} g_{11} & -g_{12} & -g_{13} \\ -g_{21} & g_{22} & -g_{23} \\ -g_{31} & -g_{32} & g_{33} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} J_1 + g_{14} \phi_4 \\ J_2 + g_{24} \phi_4 \\ J_3 + g_{34} \phi_4 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0.07 & -0.02 & 0 \\ -0.02 & 0.06722 & -0.025 \\ 0 & -0.025 & 0.0869 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} -12 \\ 5.33333 \\ 5 \end{pmatrix}$$

вычислим детерминант

$$\Delta = g_{11} g_{22} g_{33} - g_{11} g_{23} g_{32} - g_{21} g_{12} g_{33} - g_{21} g_{13} g_{32} - g_{31} g_{12} g_{23} - g_{31} g_{13} g_{22} \quad \Delta = 3.30423 \times 10^{-4}$$

Поскольку $\Delta \neq 0$ то матрица A невырожденная, значит имеет обратную и поэтому

решение системы можно записать в виде $\phi = A^{-1} B$

Составим матрицу A' , элементами которой являются алгебраические дополнения элементов матрицы A

$$A' = \begin{pmatrix} g_{22} g_{33} - g_{23} g_{32} & g_{21} g_{33} + g_{23} g_{31} & g_{21} g_{32} + g_{22} g_{31} \\ g_{12} g_{33} + g_{13} g_{32} & g_{11} g_{33} - g_{13} g_{31} & g_{11} g_{32} + g_{12} g_{31} \\ g_{12} g_{23} + g_{13} g_{22} & g_{11} g_{23} + g_{13} g_{21} & g_{11} g_{22} - g_{12} g_{21} \end{pmatrix}$$

Транспонируем матрицу A'

$$A'^T = \begin{pmatrix} g_{22} g_{33} - g_{23} g_{32} & g_{12} g_{33} + g_{13} g_{32} & g_{12} g_{23} + g_{13} g_{22} \\ g_{21} g_{33} + g_{23} g_{31} & g_{11} g_{33} - g_{13} g_{31} & g_{11} g_{23} + g_{13} g_{21} \\ g_{21} g_{32} + g_{22} g_{31} & g_{11} g_{32} + g_{12} g_{31} & g_{11} g_{22} - g_{12} g_{21} \end{pmatrix}$$

$$A'^T = \begin{pmatrix} 5.21693 \times 10^{-3} & 1.7381 \times 10^{-3} & 5 \times 10^{-4} \\ 1.7381 \times 10^{-3} & 6.08333 \times 10^{-3} & 1.75 \times 10^{-3} \\ 5 \times 10^{-4} & 1.75 \times 10^{-3} & 4.30556 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

1.5.2. Обратная матрица равна $A^{-1} = \frac{1}{\Delta} A'^T$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 15.78863 & 5.26021 & 1.51321 \\ 5.26021 & 18.41073 & 5.29624 \\ 1.51321 & 5.29624 & 13.03042 \end{pmatrix}$$

1.5.3 По формуле вычислим неизвестные потенциалы:

$$\Phi = A^{-1}B \quad \Phi = \begin{pmatrix} -153.84307 \\ 61.54924 \\ 75.24019 \end{pmatrix}$$

1.6. Составим выражения для напряжений между узлами

$$\begin{array}{lll} \Phi_1 = -153.84307 & U_{12} = \Phi_1 - \Phi_2 & U_{12} = -215.39231 \\ \Phi_2 = 61.54924 & U_{51} = \Phi_5 - \Phi_1 & U_{51} = 153.84307 \\ \Phi_3 = 75.24019 & U_{23} = \Phi_2 - \Phi_3 & U_{23} = -13.69095 \\ \Phi_4 = 150 & U_{43} = \Phi_4 - \Phi_3 & U_{43} = 74.75981 \\ \Phi_5 = 0 & U_{42} = \Phi_4 - \Phi_2 & U_{42} = 88.45076 \\ & U_{35} = \Phi_3 - \Phi_5 & U_{35} = 75.24019 \end{array}$$

1.7. Используя закон Ома, определим токи в ветвях цепи. Направления токов выбраны произвольно и указаны на схеме.

$$i_1 = \frac{U_{12} - e_1}{R_1} \quad i_1 = -2.30785$$

$$i_2 = \frac{U_{42}}{R_2} \quad i_2 = 1.96557$$

$$i_3 = \frac{U_{23}}{R_3} \quad i_3 = -0.34227$$

$$i_4 = \frac{U_{43}}{R_4} \quad i_4 = 2.49199$$

$$i_5 = \frac{U_{35}}{R_5} \quad i_5 = 2.14972$$

$$i_6 = \frac{U_{51}}{R_6} \quad i_6 = 7.69215$$

Отрицательные значения токов свидетельствуют о том, их направления в ветвях противоположны выбранным. Ток в ветви с идеальной ЭДС e_2 определяется по первому закону Кирхгофа.

$$i_7 = i_2 + i_4 \quad i_7 = 4.45757$$

1.8 Проверка расчета цепи выполняется по законам Кирхгофа и уравнению энергетического баланса

1.8.1. По первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю

$$\text{для узла -1} \quad i_6 - i_1 - i_1 = 0$$

$$\text{для узла -2} \quad i_1 - i_3 + i_2 = 0$$

$$\text{для узла -3} \quad i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

1.8.2. По второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме ЭДС действующих в этом контуре. Проверим выполнение этого закона для всех независимых контуров заданной цепи:

$$\text{Для контура -1} \quad i_1 R_1 + i_6 R_6 + i_5 R_5 + i_3 R_3 - e_1 = 0$$

$$\text{Для контура -2} \quad i_3 R_3 - i_4 R_4 + i_2 R_2 = 0$$

$$\text{Для контура -3} \quad i_5 R_5 + i_4 R_4 - e_2 = 0$$

1.8.3. Для любой электрической цепи мощность, потребляемая резисторами этой цепи должна равняться мощности источников энергии. Уравнение энергетического баланса (баланса мощностей) в общем виде записывается следующим образом:

$$\sum_k (E_k I_k) + \sum_k (J_k U_k) = \sum_k (I_k^2 R_k)$$

Для заданной электрической цепи уравнения баланса мощностей имеет вид:

Мощность источников энергии:

$$P_{\text{ист}} = J U_{31} + e_1 i_1 + e_2 i_7$$

$$P_{\text{ист}} = 1.97628 \times 10^3$$

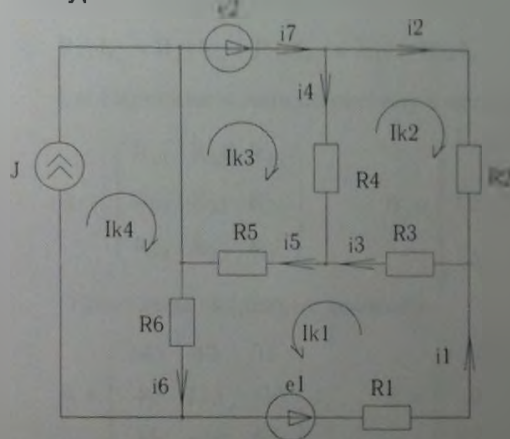
Мощность потребляемая резисторами:

$$P_r = (i_1)^2 R_1 + (i_2)^2 R_2 + (i_3)^2 R_3 + (i_4)^2 R_4 + (i_5)^2 R_5 + (i_6)^2 R_6 \quad P_r = 1.97628 \times 10^3$$

погрешность расчета равна:

$$\eta = \frac{P_{\text{ист}} - P_r}{P_{\text{ист}}} 100\% \quad \eta = 0$$

2. Определение токов в ветвях цепи методом контурных токов



2.1. В заданной цепи четыре независимых контура, однако расчетных уравнений будет три, так как в одной из ветвей включен идеальный источник тока. Выбираем независимые контуры и направляем в них токи. Составим расчетную систему уравнений для искомых контурных токов:

$$R_{11} I_{k1} + R_{12} I_{k2} + R_{13} I_{k3} + R_{14} I_{k4} = E_{11}$$

$$R_{21} I_{k1} + R_{22} I_{k2} + R_{23} I_{k3} + R_{24} I_{k4} = E_{22}$$

$$R_{31} I_{k1} + R_{32} I_{k2} + R_{33} I_{k3} + R_{34} I_{k4} = E_{33}$$

для контура 4 уравнения не составляются, так как его контурный ток известен

$$I_{k4} = J \quad I_{k4} = 10$$

2.2. Определим собственные сопротивления контуров:

$$R_{11} = R_1 + R_3 + R_5 + R_6$$

$$R_{11} = 145$$

$$R_{22} = R_3 + R_4 + R_2$$

$$R_{22} = 115$$

$$R_{33} = R_4 + R_5$$

$$R_{33} = 65$$

2.3 Определим взаимные сопротивления контуров

$$R_{12} = R_3 \quad R_{21} = R_{12} \quad R_{12} = 40$$

$$R_{13} = R_5 \quad R_{31} = R_{13} \quad R_{13} = 35$$

$$R_{14} = R_6 \quad R_{41} = R_{14} \quad R_{14} = 20$$

$$R_{23} = -R_4 \quad R_{32} = R_{23} \quad R_{23} = -30$$

Контур 4:3 и 4:2 общих ветвей не имеют, поэтому:

$$R_{42} = 0 \quad R_{24} = R_{42} \quad R_{24} = 0$$

$$R_{43} = 0 \quad R_{34} = R_{43} \quad R_{34} = 0$$

2.4. Определение контурных ЭДС

$$E_{11} = e_1 \quad E_{11} = 100$$

$$E_{22} = 0$$

$$E_{33} = e_2 \quad E_{33} = 150$$

2.5. Перенесем известные слагаемые в правую часть системы:

$$R_{11} I_{k_1} + R_{12} I_{k_2} + R_{13} I_{k_3} = E_{11} - R_{14} I_{k_4}$$

$$R_{21} I_{k_1} + R_{22} I_{k_2} + R_{23} I_{k_3} = E_{22} - R_{24} I_{k_4}$$

$$R_{31} I_{k_1} + R_{32} I_{k_2} + R_{33} I_{k_3} = E_{33} - R_{34} I_{k_4}$$

2.6. Перепишем данную систему в матричном виде, где:

$$A = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} E_{11} - R_{14} I_{k_4} \\ E_{22} - R_{24} I_{k_4} \\ E_{33} - R_{34} I_{k_4} \end{pmatrix}$$

Подставим численные значения

$$A = \begin{pmatrix} 145 & 40 & 35 \\ 40 & 115 & -30 \\ 35 & -30 & 65 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} -100 \\ 0 \\ 150 \end{pmatrix}$$

вычислим детерминант

$$\Delta = R_{11} R_{22} R_{33} - R_{11} R_{23} R_{32} - R_{21} R_{12} R_{33} + R_{21} R_{13} R_{32} + R_{31} R_{12} R_{23} - R_{31} R_{13} R_{22} \quad \Delta = 6.245 \times 10^4$$

Составим матрицу A' , элементами которой являются алгебраические дополнения элементов матрицы A

$$A' = \begin{bmatrix} (R_{22} R_{33} - R_{23} R_{32}) & -(R_{12} R_{33} - R_{13} R_{32}) & R_{12} R_{23} - R_{13} R_{22} \\ -(R_{21} R_{33} - R_{23} R_{31}) & (R_{11} R_{33} - R_{13} R_{31}) & -(R_{11} R_{23} - R_{13} R_{21}) \\ -(-R_{21} R_{32} + R_{22} R_{31}) & -(R_{11} R_{32} - R_{12} R_{31}) & (R_{11} R_{22} - R_{12} R_{21}) \end{bmatrix}$$

Транспонируем матрицу A'

$$A'^T = \begin{pmatrix} R_{22} R_{33} - R_{23} R_{32} & -R_{21} R_{33} + R_{23} R_{31} & R_{21} R_{32} - R_{22} R_{31} \\ R_{12} R_{33} + R_{13} R_{32} & R_{11} R_{33} - R_{13} R_{31} & -R_{11} R_{32} + R_{12} R_{31} \\ R_{12} R_{23} - R_{13} R_{22} & -R_{11} R_{23} + R_{13} R_{21} & R_{11} R_{22} - R_{12} R_{21} \end{pmatrix}$$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 6.575 \times 10^3 & -3.65 \times 10^3 & -5.225 \times 10^3 \\ -3.65 \times 10^3 & 8.2 \times 10^3 & 5.75 \times 10^3 \\ -5.225 \times 10^3 & 5.75 \times 10^3 & 1.5075 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

2.7. Обратная матрица равна

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0.01053 & -5.84468 \times 10^{-3} & -8.36669 \times 10^{-3} \\ -5.84468 \times 10^{-3} & 0.01313 & 9.20737 \times 10^{-3} \\ -8.36669 \times 10^{-3} & 9.20737 \times 10^{-3} & 0.02414 \end{pmatrix}$$

2.8. По формуле вычислим неизвестные контурные токи

$$I_k = A^{-1}B \quad I_k = \begin{pmatrix} -2.30785 \\ 1.96557 \\ 4.45757 \end{pmatrix}$$

$$I_{k_1} = -2.30785$$

$$I_{k_2} = 1.96557$$

$$I_{k_3} = 4.45757$$

2.9. Определим токи в ветвях заданной схемы, рассматривая ток в каждой ветви как алгебраическую сумму контурных токов, протекающих в этой ветви.

$$i_1 = I_{k_1} \quad i_1 = -2.30785$$

$$i_2 = I_{k_2} \quad i_2 = 1.96557$$

$$i_3 = I_{k_1} + I_{k_2} \quad i_3 = -0.34227$$

$$i_4 = I_{k_3} - I_{k_1} \quad i_4 = 6.76541$$

$$i_5 = I_{k_1} + I_{k_3} \quad i_5 = 2.14972$$

$$i_6 = I_{k_1} + I_{k_2} \quad i_6 = -0.34227$$

$$i_7 = I_{k_3} \quad i_7 = 4.45757$$

3. По результатам расчета строим потенциальную диаграмму для контура включающего две ЭДС.

3.1. приравняем потенциал точки 1 к нулю.

$$\phi_1 = 0$$

$$\phi_2 = i_6 R_6 + \phi_1$$

$$\phi_2 = 153.84307$$

$$\phi_3 = \phi_2 + e_2$$

$$\phi_3 = 303.84307$$

$$\phi_4 = \phi_3 - i_2 R_2$$

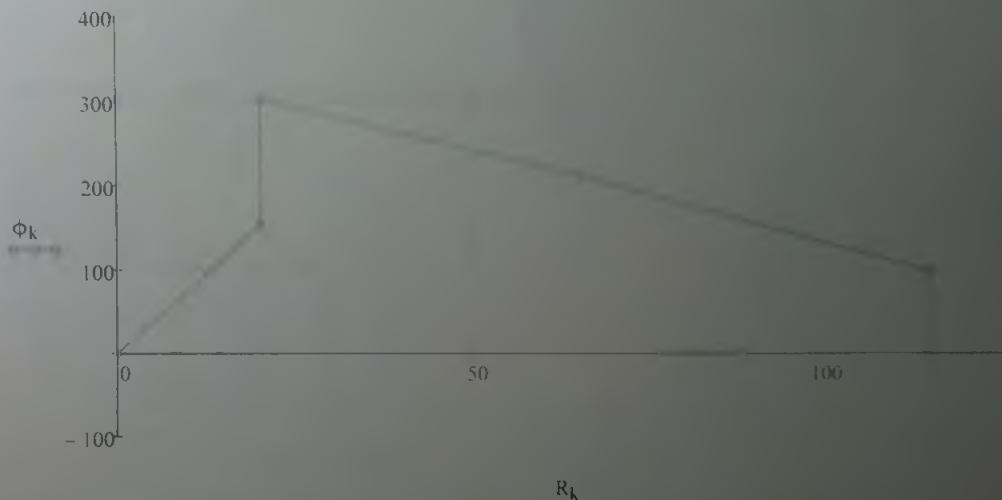
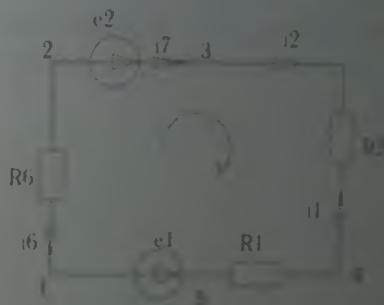
$$\phi_4 = 215.39231$$

$$\phi_5 = i_1 R_1 + \phi_4$$

$$\phi_5 = 100$$

$$\phi_1 = \phi_5 - e_1$$

$$\phi_1 = 0$$



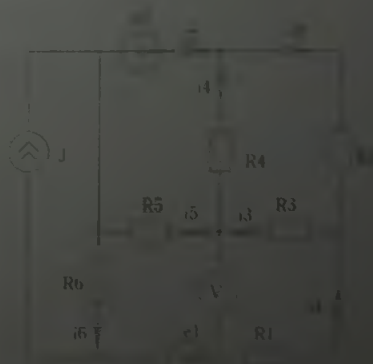
Убедиться, что показания вольтметра не зависят от пути по какому определяется напряжения между клеммами вольтметра

$$U_v = e_1 - i_5 R_5 - i_6 R_6$$

$$U_v = -129.08327$$

$$U_v = i_1 R_1 + i_3 R_3$$

$$U_v = -129.08327$$



4. Расчет токов в электрической цепи методом

4.1.2. По условию из схемы источник тока J и ЭДС E_2 . В цепи действует источник ЭДС E_1 .

В месте подключения идеального источника ЭДС E_2 необходимо поставить коротко замкнутую перемычку, в месте подключения идеального источника тока должен быть разрыв



сопротивление параллельно соединенных ветвей



$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \quad R_{45} = 16.15385$$

Эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов источника ЭДС E_1

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_6 + \frac{R_2(R_{45} + R_3)}{R_2 + R_{45} + R_3} \quad R_{\Sigma} = 94.98099$$

4.1.3. Ток в ветви с источником ЭДС определим по закону Ома, токи в параллельных ветвях определим по правилу "чужого сопротивления"

$$i_{11} = \frac{e_1}{R_{\Sigma}} \quad i_{11} = 1.05284 \quad i_{61} = i_{11}$$

$$i_{31} = i_{11} \frac{R_2}{R_2 + R_{45} + R_3} \quad i_{31} = 0.46837$$

$$i_{21} = i_{11} \frac{R_{45} + R_3}{R_2 + R_{45} + R_3} \quad i_{21} = 0.58447$$

$$i_{51} = i_{31} \frac{R_4}{R_4 + R_5} \quad i_{51} = 0.21617$$

$$i_{41} = i_{31} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad i_{41} = 0.2522$$

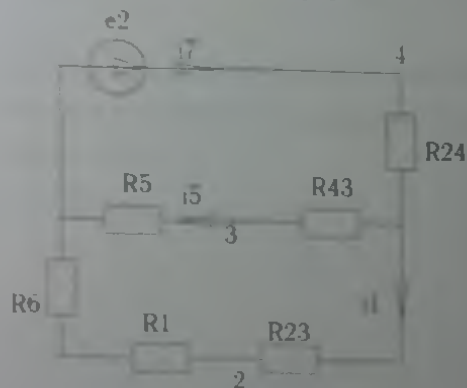
$$i_{71} = i_{61} = i_{11} \quad i_{71} = 0.83667$$

4.2. Исключим из схемы источник тока J и ЭДС E_1 . В цепи действует источник ЭДС E_2 .

В месте подключения идеального источника ЭДС E_1 необходимо поставить коротко замкнутую перемычку. В месте подключения идеального источника тока должен быть разрыв



4.2.1. Преобразуем треугольник сопротивлений R_2, R_3, R_4 в звезду



$$R_{24} = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4 + R_3} \quad R_{24} = 11.73913$$

$$R_{43} = \frac{R_3 R_4}{R_2 + R_4 + R_3} \quad R_{43} = 10.43478$$

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_4 + R_3} \quad R_{23} = 15.65217$$

4.2.2. Эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов источника ЭДС E_2

$$R_{\Sigma} = R_{24} + \frac{(R_{23} + R_6 + R_1)(R_{43} + R_5)}{R_{23} + R_1 + R_{43} + R_5 + R_6} \quad R_{\Sigma} = 41.4262$$

4.2.3. Ток в ветви с источником ЭДС E_2 определим по закону Ома, токи в параллельных ветвях определим по правилу "чужого сопротивления"

$$i_{72} = \frac{E_2}{R_{\Sigma}} \quad i_{72} = 3.6209$$

$$i_{12} = i_{72} \frac{R_{43} + R_5}{R_{23} + R_1 + R_{43} + R_5 + R_6} \quad i_{12} = 1.255$$

$$i_{52} = i_{72} \frac{R_{23} + R_6 + R_1}{R_{23} + R_1 + R_{43} + R_5 + R_6} \quad i_{52} = 2.36589$$

$$i_{6_2} = i_{1_2} \quad i_{6_2} = 1.255$$

4.2.4. Для расчета токов в треугольнике сопротивлений определим напряжение на его зажимах:

$$U_{23_2} = i_{5_2} R_{43} - i_{1_2} R_{23} \quad U_{23_2} = 5.04404$$

$$U_{43_2} = i_{7_2} R_{24} + i_{5_2} R_{43} \quad U_{43_2} = 67.19376$$

$$U_{42_2} = i_{7_2} R_{24} + i_{1_2} R_{23} \quad U_{42_2} = 62.14972$$

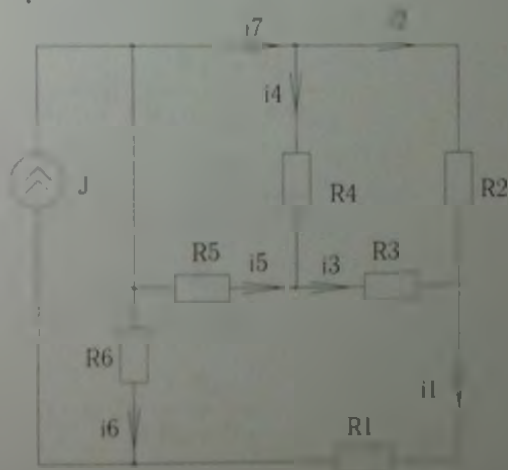
$$i_{3_2} = \frac{U_{23_2}}{R_3} \quad i_{3_2} = 0.1261$$

$$i_{4_2} = \frac{U_{43_2}}{R_4} \quad i_{4_2} = 2.23979$$

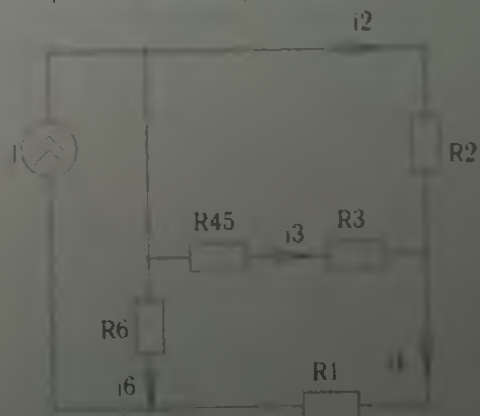
$$i_{2_2} = \frac{U_{42_2}}{R_2} \quad i_{2_2} = 1.3811$$

4.3. Исключим из схемы источники ЭДС E_1 и E_2 . В цепи действует источник тока J

В месте подключения идеальных источников ЭДС E_1 и E_2 необходимо поставить коротко замкнутые перемычки.

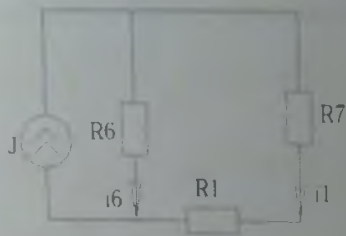


сопротивление параллельно соединенных ветвей



$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \quad R_{45} = 16.15385$$

сопротивление параллельно соединенных ветвей



$$R_7 = \frac{R_2(R_{45} + R_3)}{R_2 + R_{45} + R_3} \quad R_7 = 24.98099$$

4.3.1. Токи во всех ветвях определим по правилу "чужого сопротивления" и первому закону Кирхгофа.

$$i_{6_3} = J \frac{R_7 + R_1}{R_7 + R_1 + R_6} \quad i_{6_3} = 7.89432$$

$$i_{1_3} = J \frac{R_6}{R_7 + R_1 + R_6} \quad i_{1_3} = 2.10568$$

$$i_{2_3} = i_{1_3} \frac{R_{45} + R_3}{R_2 + R_{45} + R_3} \quad i_{2_3} = 1.16894$$

$$i_{3_3} = i_{1_3} \frac{R_2}{R_2 + R_{45} + R_3} \quad i_{3_3} = 0.93675$$

$$i_{4_3} = i_{3_3} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad i_{4_3} = 0.5044$$

$$i_{5_3} = i_{3_3} \frac{R_4}{R_4 + R_5} \quad i_{5_3} = 0.43235$$

$$i_{7_3} = i_{2_3} + i_{4_3} \quad i_{7_3} = 1.67334$$

4.4 результирующие токи в ветвях исходной схемы определяются алгебраическим сложением частных токов

$$i_1 = i_{1_1} - i_{1_2} - i_{1_3} \quad i_1 = -2.30785$$

$$i_2 = -i_{2_1} + i_{2_2} + i_{2_3} \quad i_2 = 1.96557$$

$$i_3 = i_{3_1} + i_{3_2} - i_{3_3} \quad i_3 = -0.34227$$

$$i_4 = -i_{4_1} + i_{4_2} + i_{4_3} \quad i_4 = 2.49199$$

$$i_5 = i_{5_1} + i_{5_2} - i_{5_3} \quad i_5 = 2.14972$$

$$i_6 = i_{6_1} - i_{6_2} + i_{6_3} \quad i_6 = 7.69215$$

$$i_7 = -i_{7_1} + i_{7_2} + i_{7_3} \quad i_7 = 4.45757$$

5. Для определения входных и взаимных проводимостей, а так же коэффициента передачи по току воспользуемся определенными в предыдущем методе частичными токами

$$g_{11} = \frac{i_{11}}{e_1} \quad g_{11} = 0.01053$$

$$g_{14} = \frac{i_{41}}{e_1} \quad g_{14} = 2.52202 \times 10^{-3}$$

$$g_{12} = \frac{i_{21}}{e_1} \quad g_{12} = 5.84468 \times 10^{-5}$$

$$g_{15} = \frac{i_{51}}{e_1} \quad g_{15} = 2.16173 \times 10^{-3}$$

$$g_{13} = \frac{i_{31}}{e_1} \quad g_{13} = 4.68375 \times 10^{-3}$$

$$g_{16} = \frac{i_{61}}{e_1} \quad g_{16} = 0.01053$$

$$g_{21} = \frac{i_{12}}{e_2} \quad g_{21} = 8.36669 \times 10^{-3}$$

$$g_{24} = \frac{i_{42}}{e_2} \quad g_{24} = 0.01493$$

$$g_{22} = \frac{i_{22}}{e_2} \quad g_{22} = 9.20737 \times 10^{-3}$$

$$g_{25} = \frac{i_{52}}{e_2} \quad g_{25} = 0.01577$$

$$g_{23} = \frac{i_{32}}{e_2} \quad g_{23} = 8.40673 \times 10^{-4}$$

$$g_{26} = \frac{i_{62}}{e_2} \quad g_{26} = 8.36669 \times 10^{-3}$$

$$h_{j1} = \frac{i_{13}}{j} \quad h_{j1} = 0.21057$$

$$h_{j4} = \frac{i_{43}}{j} \quad h_{j4} = 0.05044$$

$$h_{j2} = \frac{i_{23}}{j} \quad h_{j2} = 0.11689$$

$$h_{j5} = \frac{i_{53}}{j} \quad h_{j5} = 0.04323$$

$$h_{j3} = \frac{i_{33}}{j} \quad h_{j3} = 0.09367$$

$$h_{j6} = \frac{i_{6j}}{j} \quad h_{j6} = 0.78943$$

определим ЭДС E_1 для того чтобы ток в пятой ветви был равен 5 ампер

$$E_1 = \frac{5 - g_{24}e_2 + h_{j5}J}{g_{15}} \quad E_1 = 1.41852 \times 10^3$$

5. Определение тока в ветви с источником ЭДС E_1 методом эквивалентного генератора.

5.1. Размыкаем в исходной схеме ветвь с резистором R_1 и ЭДС E_1



сопротивление параллельно соединенных ветвей

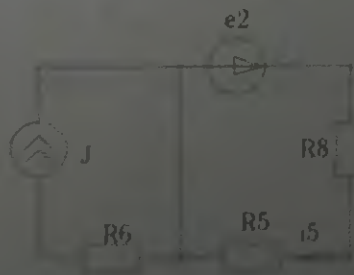


$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \quad R_{45} = 16.15385$$

5.2. Эквивалентное сопротивление цепи относительно ветви с источником ЭДС E_1 и резистором R_1

$$R_s = R_6 + \frac{(R_{45} + R_3)R_2}{R_{45} + R_3 + R_2} \quad R_s = 44.98099$$

сопротивление параллельно соединенных ветвей



$$R_2 = \frac{(R_2 + R_3)R_4}{R_2 + R_3 + R_4} \quad R_2 = 22.17391$$

5.3.1. Выразим общий ток холостого хода

$$i_s = \frac{e_2}{R_8 + R_5} \quad i_s = 2.62357$$

5.3.2. По правилу "узкого сопротивления" найдем ток холостого хода в сопротивлении R_4

$$i_2 = i_s \frac{R_4}{R_2 + R_1 + R_4} \quad i_2 = 0.68441$$

5.3.3. найдем напряжение холостого хода

$$U_{xx} = i_1 R_3 + i_2 R_5 + j R_6 \quad U_{xx} = 319.20152$$

5.4. Ток в ветви с источником ЭДС E_1 равен:

$$i_1 = \frac{-U_{xx} + e_1}{R_1 + R_2} \quad i_1 = -2.30785$$

а) Найти ЭДС E_1 при которой ток i_1 изменит свое направление и увеличится в 5 раз

$$-5i_1 = \frac{U_{xx} + e'_1}{R_1 + R_2}$$

$$e'_1 = -5i_1 R_1 - 5i_1 (R_2 + U_{xx}) \quad e'_1 = 776.80608$$

$$i'_1 = \frac{U_{xx} + e'_1}{R_1 + R_2} \quad i'_1 = 11.53923$$

б) Определить зависимость между током в первой ветви i_1 сопротивлением в третьей ветви R_3 $i_1(R_3)$ при неизменности всех остальных параметров

Размыкаем в исходной схеме ветвь с резистором R_3



Эквивалентное сопротивление цепи относительно ветви с резистором R_3

$$R_3 = R_{45} + \frac{(R_5 + R_1)R_2}{R_6 + R_1 + R_2} \quad R_3 = 43.54515$$

Выразим токи холостого хода

$$i_{4x} = \frac{e_2}{R_4 + R_5} \quad i_{4x} = 2.30769$$

$$i_{1x} = \frac{e_1 - j R_6 - e_2}{R_2 + R_1 + R_6} \quad i_{1x} = -2.17391$$

$$i_{2x} = -i_{1x} \quad i_{2x} = 2.17391$$

найдем напряжение холостого хода

$$U_{xx} = i_{4x} R_4 - i_{2x} R_2 \quad U_{xx} = -28.59532$$

Ток в ветви с резистором R_3 равен:

$$i_3 = \frac{U_{xx}}{R_3 + R_5} \quad i_3 = -0.34227$$

$$a = i_{1x} \quad a = -2.173913$$

$$b = \frac{i_1 - a}{i_3} \quad b = 0.3913$$

$$i_1(r_3) = a + b \frac{U_{xx}}{r_3 + R_5}$$

$$i_1(r_3) = -\frac{76950.0}{6877.0r_3 + 299460.0} - 2.174$$

Ток i_2 при сопротивлении $R_3 = 5(\text{Ом})$

$$i_1(R_3) = -2.40441$$

График зависимости тока i_1 от сопротивления R_3

