

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет компьютерных систем и сетей

Кафедра теоретических основ электротехники

Типовой расчет №1 по курсу: «Теория электрических цепей»

Студента №950503-21

Проверил:

Батюков С.В.

Выполнил:

Ст. гр. №950503
Полховский А.Ф.

Минск 2020

1. Начертим схему согласно заданному варианту (рис. 1).

с

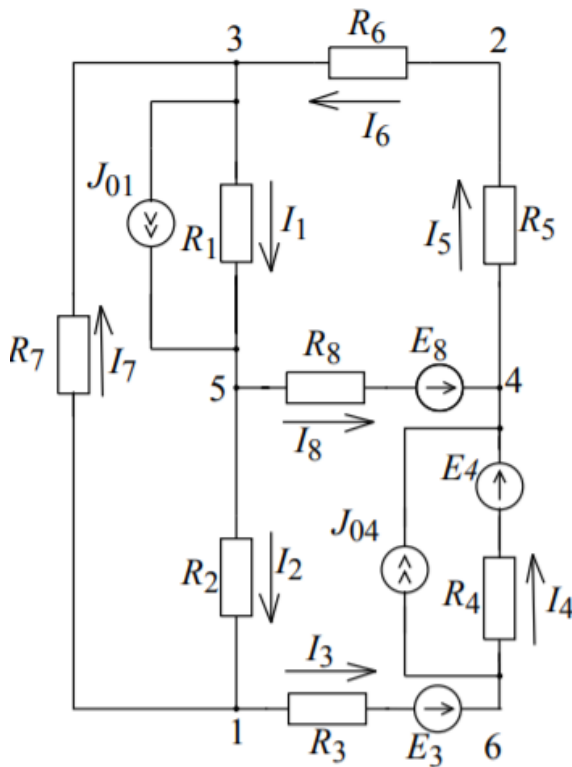


Рис. 1

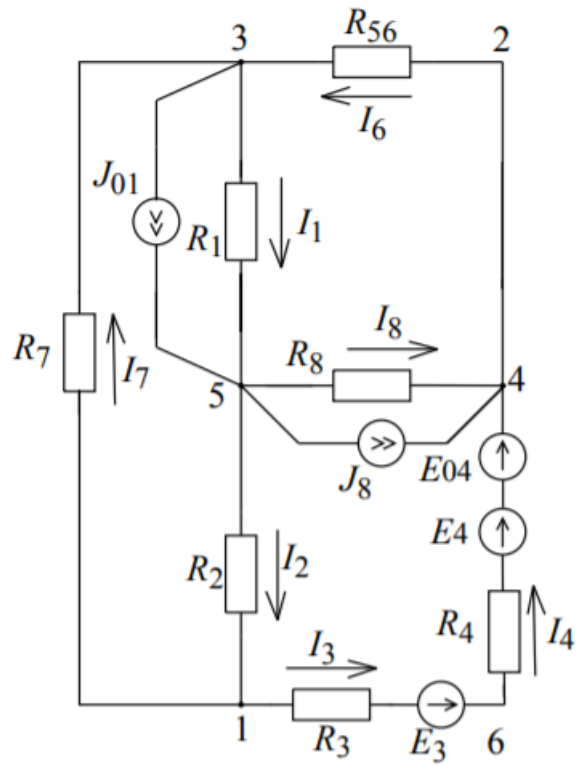


Рис.2

2. Преобразуем схему к двухконтурной.

Для этого преобразуем источник тока J_{04} в источник напряжения E_{04} и источник напряжения E_8 в источник тока J_8 . Также объединим последовательно включенные сопротивления R_3 , R_4 и R_5 , R_6 .

Преобразуем источник напряжения E_8 в источник тока J_8

$$J_8 = \frac{E_8}{R_8} = \frac{400}{380} = 1.053 \text{ (A)},$$

$$E_{04} = J_{04} \cdot R_4 = 3 \cdot 410 = 1230 \text{ (В)},$$

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 720 + 410 = 1130 \text{ (Ом)},$$

$$R_{56} = R_5 + R_6 = 220 + 360 = 580 \text{ (Ом)}.$$

Полученная схема показана на рис. 2. На этой схеме также объединим источники напряжения E_4 , E_{04} и E_3 :

$$E'_{34} = E_{04} + E_4 + E_3 = 1230 + 500 + 200 = 1930 \text{ (В)}.$$

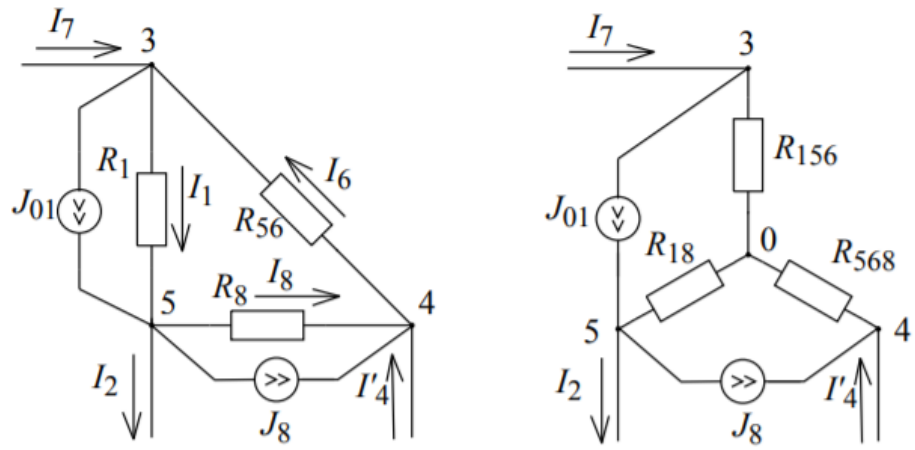


Рис. 3

На этой схеме (рис. 3) преобразуем треугольник 3 – 5 – 4 в звезду, а также преобразуем источники тока J_{01} , J_8 в источники ЭДС E_{156} , E_{568} , и E_{18} .

$$R_{156} = \frac{R_1 \cdot R_{56}}{R_1 + R_{56} + R_8} = \frac{170 \cdot 580}{170 + 580 + 380} = 87.257(\text{Ом}),$$

$$R_{568} = \frac{R_{56} \cdot R_8}{R_1 + R_{56} + R_8} = \frac{580 \cdot 380}{170 + 580 + 380} = 195.044(\text{Ом}),$$

$$R_{18} = \frac{R_1 \cdot R_8}{R_1 + R_{56} + R_8} = \frac{170 \cdot 380}{170 + 580 + 380} = 57.168(\text{Ом}),$$

$$E_{156} = J_{01} \cdot R_{156} = 1 \cdot 87.257 = 87.257(\text{В}),$$

$$E_{568} = J_8 \cdot R_{568} = 1.053 \cdot 195.044 = 205.31(\text{В}),$$

$$E_{18} = (J_8 - J_{01}) \cdot R_{18} = (1.053 - 1) \cdot 57.168 = 3.009(\text{В}).$$

Полученная схема показана на рис. 4.

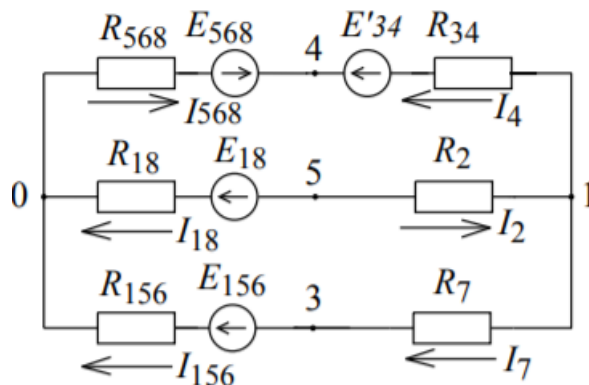


Рис. 4

На этой схеме объединяем источники ЭДС и последовательно соединенные резисторы:

$$\begin{aligned}
E_{34568} &= E'_{34} - E_{568} = 1930 - 205.31 = 1724.69(\text{В}), \\
R_{34568} &= R_{34} + R_{568} = 1130 + 205.31 = 1325.31(\text{Ом}), \\
R_{182} &= R_{18} + R_2 = 57.168 + 530 = 587.168 (\text{Ом}), \\
R_{1567} &= R_{156} + R_7 = 87.257 + 930 = 1017.257 (\text{Ом}).
\end{aligned}$$

Схема примет следующий вид (рис. 5).

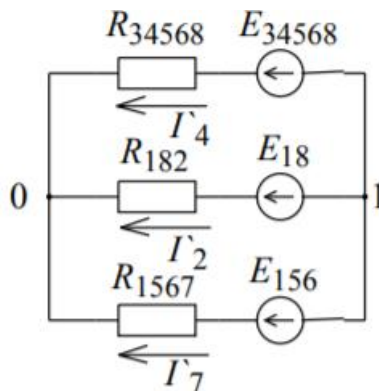


Рис. 5

3. Определим токи в схеме (рис. 6) методом двух узлов.

Примем потенциал узла 0 равным нулю, тогда:

$$I_{y1} = \varphi_1 g_{11}.$$

Определив узловой ток I_{y1} и проводимость g_{11} , определим потенциал φ_1 методом двух узлов:

$$\begin{aligned}
I_{y1} &= -\frac{E_{34568}}{R_{34568}} - \frac{E_{18}}{R_{182}} - \frac{E_{156}}{R_{1567}} = -\frac{1725}{1325} - \frac{3.009}{587} - \frac{87.257}{1017} = -1.393 (\text{А}), \\
g_{11} &= \frac{1}{R_{34568}} + \frac{1}{R_{182}} + \frac{1}{R_{1567}} = \frac{1}{1325} + \frac{1}{587} + \frac{1}{1017} = 0.003441 (\text{См}), \\
\varphi_1 &= \frac{I_{y1}}{g_{11}} = \frac{-1.393}{0.003441} = -404.703 (\text{В}).
\end{aligned}$$

Определяем токи в ветвях:

$$\begin{aligned}
I'_2 &= \frac{\varphi_1 - \varphi_0 + E_{18}}{R_{182}} = \frac{-404.703 - 0 + 3.009}{587} = -0.684 (\text{А}), \\
I'_4 &= \frac{\varphi_1 - \varphi_0 + E_{34568}}{R_{34568}} = \frac{-404.703 - 0 + 188.835}{1325} = 0.996 (\text{А}), \\
I'_7 &= \frac{\varphi_1 - \varphi_0 + E_{156}}{R_{1567}} = \frac{-404.703 - 0 + 87.257}{1017} = -0.312 (\text{А}).
\end{aligned}$$

4. Разворачивая схему в обратном направлении, находим токи:

$$\begin{aligned} I_2 &= -I'_2 = 0.684 \text{ (A)}, \\ I_3 &= I'_4 = 0.996 \text{ (A)}, \\ I_7 &= I'_7 = -0.312 \text{ (A)}, \\ I_4 &= I_3 - J_4 = -2.004 \text{ (A)}. \end{aligned}$$

Находим напряжение U_{34} , U_{45} и U_{54} , а затем по закону Ома найдём токи I_1 , I_5 , I_8 и по первому закону Кирхгофа ток I_6 :

$$\begin{aligned} U_{43} &= -I'_4 R_{34} + E'_{34} + I_7 R_7 = -1125 + 1930 - 290.16 = 514.096 \text{ (В)}, \\ U_{54} &= I'_4 R_{34} - E'_{34} + I_2 R_2 = -1125 + 1930 - 362 = 441.728 \text{ (В)}, \\ U_{35} &= -I_2 R_2 - I_7 R_7 = -362 + 290 = -72.367 \text{ (В)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_5 &= I_6 = \frac{-U_{34}}{R_{56}} = \frac{514.096}{580} = 0.886 \text{ (A)}, \\ I_8 &= \frac{-U_{54} + E_8}{R_8} = \frac{-441 + 400}{380} = -0.11 \text{ (A)}, \\ I_1 &= I_8 + I_2 - J_{01} = -0.11 + 0.684 - 1 = -0.427 \text{ (A)}. \end{aligned}$$

5. Найдём U_{25} (согласно варианту) по схеме рис.1

$$U_{25} = I_6 R_6 + I_1 R_1 = 318 - 72.42 = 246.727 \text{ (В)}.$$

6. Составление баланса мощностей для схемы рис. 1.

$$U_{64} = I_4 R_4 - E_4 = -1322 \text{ (В)},$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ист}} &= I_8 E_8 + I_4 E_4 + I_3 E_3 - U_{64} J_{04} - U_{35} J_{01}, \\ P_{\text{пр}} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 + I_7^2 R_7 + I_8^2 R_8. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ист}} &= 3190 \text{ (Вт)}, \\ P_{\text{пр}} &= 3190 \text{ (Вт)}. \end{aligned}$$

Равенство $P_{\text{ист}}$ и $P_{\text{пр}}$ говорит о правильности нахождения токов.

Определение токов в ветвях исходной схемы методом наложения (Mathcad) представлено в приложении 1.

7. Определение токов в ветвях исходной схемы методом законов Кирхгофа.

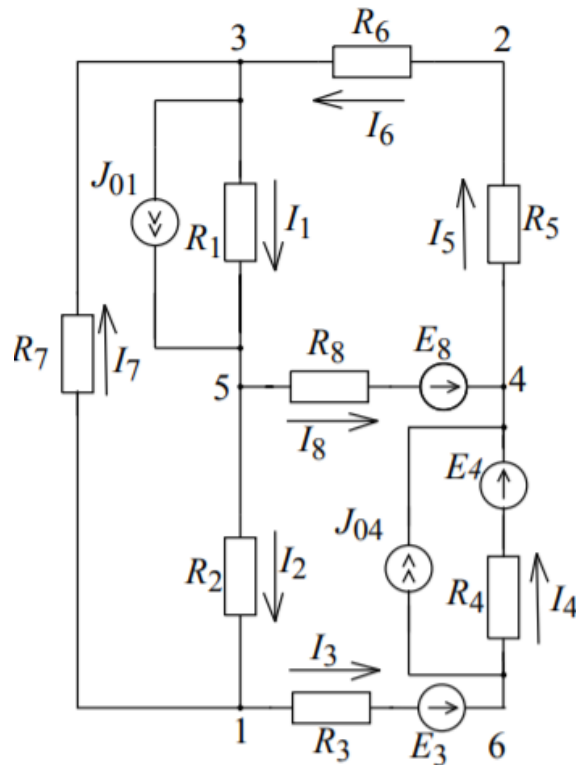


Рис.7 – Решение схемы методом законов Кирхгофа

Составляем систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_6 + I_7 = I_1 + J_{01}, \\ I_8 + I_2 = I_1 + J_{01}, \\ I_3 + I_7 = I_2, \\ I_3 = I_4 + J_{04}, \\ I_8 + J_{04} + I_4 = I_5, \\ I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 + I_1 \cdot R_1 + I_8 \cdot R_8 = E_8, \\ I_3 \cdot R_3 - I_8 \cdot R_8 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 = E_3 + E_4 - E_8. \end{array} \right.$$

Решая систему уравнений, получаем токи:

$$\begin{aligned} I_1 &= -0.426(\text{A}), \\ I_2 &= 0.684(\text{A}), \\ I_3 &= 0.996(\text{A}), \\ I_4 &= -2.004(\text{A}), \\ I_5 &= 0.886(\text{A}), \\ I_6 &= 0.886(\text{A}), \\ I_7 &= -0.312(\text{A}), \\ I_8 &= -0.11(\text{A}). \end{aligned}$$

8. Определение токов в ветвях исходной схемы методом контурных токов.

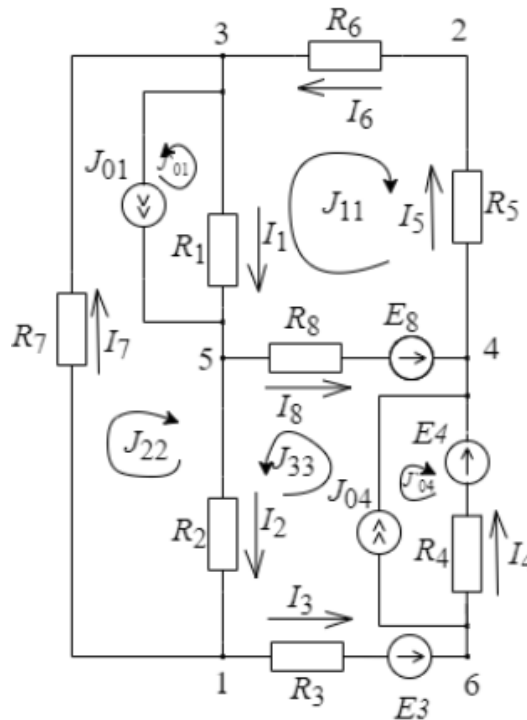


Рис.8 – Метод контурных токов

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

$$\begin{aligned} I_{11}(R_1 + R_8 + R_5 + R_6) - I_{22}R_1 + J_{01}R_1 + I_{33}R_8 &= -E_8, \\ I_{22}(R_1 + R_2 + R_7) - I_{11}R_1 + I_{33}R_2 &= 0, \\ I_{33}(R_2 + R_8 + R_4 + R_3) - J_{04}R_4 + I_{22}R_2 + I_{11}R_8 &= E_3 + E_4 - E_8. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений, находим контурные токи I_{11}, I_{22}, I_{33}

$$\begin{aligned} I_{11} &= -0.917 \text{ (A)}, \\ I_{22} &= -0.431 \text{ (A)}, \\ I_{33} &= 1.033 \text{ (A)}, \end{aligned}$$

Находим неизвестные токи $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8$

$$\begin{aligned} I_1 &= -I_{11} + I_{22} - J_{01} = -0.514 \text{ (A)}, \\ I_2 &= I_{22} + I_{33} = -0.602 \text{ (A)}, \\ I_3 &= I_{33} = 1.033 \text{ (A)}, \\ I_4 &= -J_{04} + I_{33} = -1.967 \text{ (A)}, \\ I_5 &= -I_{11} = 0.917 \text{ (A)}, \\ I_6 &= I_5 = 0.917 \text{ (A)}, \end{aligned}$$

$$I_7 = I_{22} = -0.431 \text{ (A)},$$
$$I_8 = -I_{11} - I_{33} = -0.116 \text{ (A)}.$$

Определение токов в ветвях исходной схемы (рис. 8) методом контурных токов (Mathcad) представлено в приложении 2.

9. Определение токов в ветвях исходной схемы методов узловых потенциалов.

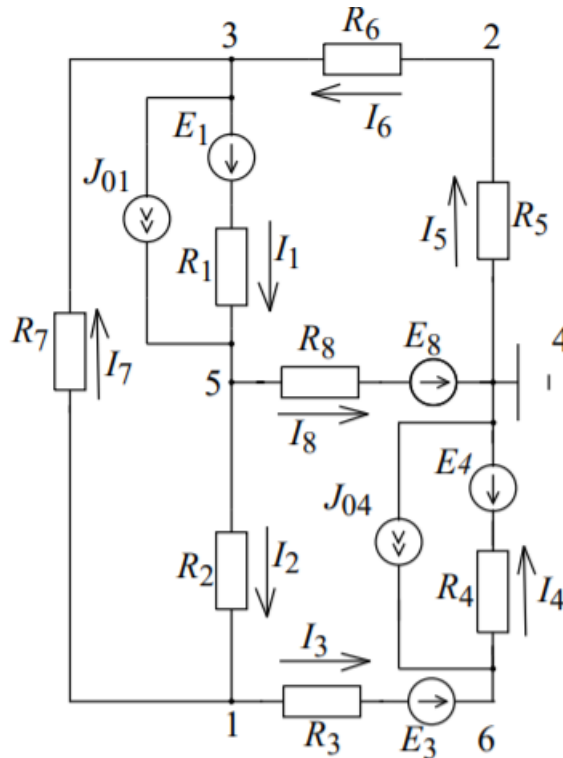


Рис. 9 – Узловые потенциалы

Для нахождения потенциалов определяем узловые токи:

$$I_{55} = J_{01} - \frac{E_8}{R_8} = -0.053 \text{ (A)},$$

$$I_{66} = \frac{E_3}{R_3} - \frac{E_4}{R_4} - J_{04} = -3.942 \text{ (A)},$$

$$I_{11} = -\frac{E_3}{R_3} = -0.278 \text{ (A)},$$

$$I_{33} = -J_{01} = -1 \text{ (A)}.$$

Определяем собственные проводимости и проводимости ветвей:

$$g_{11} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_7} = 4.351 \text{ (мСм)},$$

$$g_{55} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8} = 10 \text{ (мСм)},$$

$$g_{33} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_6 + R_5} = 8.682 \text{ (мСм)},$$

$$g_{66} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = 3.828 \text{ (мСм)},$$

$$g_{13} = g_{31} = \frac{1}{R_7} = 1.075 \text{ (мСм)},$$

$$g_{15} = g_{51} = \frac{1}{R_2} = 1.887 \text{ (мСм)},$$

$$g_{16} = g_{61} = \frac{1}{R_3} = 1.389 \text{ (См)},$$

$$g_{35} = g_{53} = \frac{1}{R_1} = 5.882 \text{ (мСм)},$$

$$g_{36} = g_{63} = 0 \text{ (мСм)},$$

$$g_{56} = g_{65} = 0 \text{ (См)}.$$

Составляем систему уравнений для нахождения потенциалов в узлах, учитывая потенциал узла 4 равным нулю (см. рис. 9):

$$\begin{cases} \varphi_4 = 0 \text{ (В)}, \\ I_{11} = \varphi_1 g_{11} - \varphi_3 g_{13} - \varphi_5 g_{15} - \varphi_6 g_{16}, \\ I_{33} = -\varphi_1 g_{31} + \varphi_3 g_{33} - \varphi_5 g_{35} - \varphi_6 g_{36}, \\ I_{55} = -\varphi_1 g_{51} - \varphi_3 g_{53} + \varphi_5 g_{55} - \varphi_6 g_{56}, \\ I_{66} = -\varphi_1 g_{61} - \varphi_3 g_{63} - \varphi_5 g_{65} + \varphi_6 g_{66}. \end{cases}$$

Решаем систему уравнений и получаем узловые потенциалы:

$$\varphi_1 = -804.313 \text{ (В)},$$

$$\varphi_3 = -514.096 \text{ (В)},$$

$$\varphi_5 = -441.729 \text{ (В)},$$

$$\varphi_6 = -1322 \text{ (В)}.$$

Запишем уравнения для определения токов:

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_5}{R_1} = 0.684 \text{ (А)},$$

$$I_2 = \frac{\varphi_3 - \varphi_5}{R_2} = -0.426 \text{ (А)},$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_6 + E_3}{R_3} = 0.997 \text{ (А)},$$

$$I_4 = \frac{\varphi_6 - \varphi_4 + E_4}{R_4} = -2.005 \text{ (А)},$$

$$I_5 = \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_5 + R_6} = 0.886 \text{ (А)},$$

$$I_6 = I_5 = 0.886 \text{ (А)},$$

$$I_8 = \frac{\varphi_5 - \varphi_4 + E_8}{R_8} = -0.11(\text{A}).$$

Определение токов в ветвях исходной схемы (рис. 9) методом узловых потенциалов представлено в приложении 3.

10. Определение тока в заданной ветви методом эквивалентного генератора напряжения.

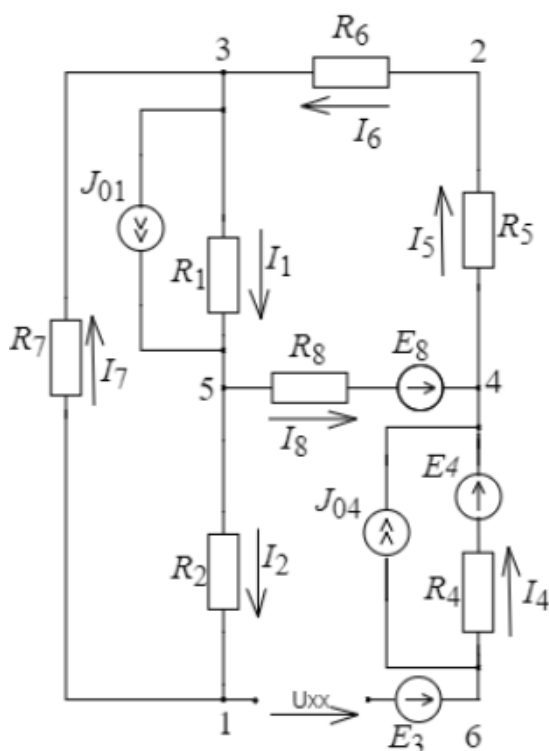


Рис. 10

Составляем систему уравнений для метода контурных токов на схеме (рис. 10)

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_8 + R_5 + R_6) + I_{22}R_1 = J_{01}R_1 + E_8, \\ I_{22}(R_1 + R_2 + R_7) + I_{11}R_1 = J_{01}R_1. \end{cases}$$

Решаем систему уравнений и получаем токи:

$$\begin{aligned} I_{11} &= 0.497 \text{ (A)}, \\ I_{22} &= 0.053 \text{ (A)}. \end{aligned}$$

Определяем напряжение холостого хода:

$$\begin{aligned}
 U_{xx} &= I_{11}R_8 - I_{22}R_2 + E_3 + E_4 + J_{04}R_4 = \\
 &= 0,497 * 380 - 0.053 * 530 + 200 + 500 + 3 * 410 - 400 = \\
 &= 1691 (B).
 \end{aligned}$$

Определим эквивалентное сопротивление генератора. Соединив последовательно соединенные резисторы, и преобразовав треугольник в звезду получим схему представленную на рис.11:

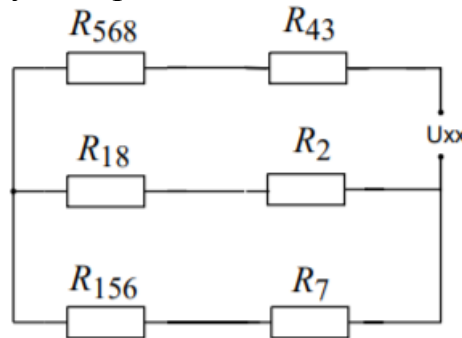


Рис. 11

$$R_{156} = \frac{R_1 \cdot R_{56}}{R_1 + R_{56} + R_8} = \frac{170 \cdot 580}{170 + 580 + 380} = 87.257(\text{Ом}),$$

$$R_{568} = \frac{R_{56} \cdot R_8}{R_1 + R_{56} + R_8} = \frac{580 \cdot 380}{170 + 580 + 380} = 195.044(\text{Ом}),$$

$$R_{18} = \frac{R_1 \cdot R_8}{R_1 + R_{56} + R_8} = \frac{170 \cdot 380}{170 + 580 + 380} = 57.168(\text{Ом}).$$

Находим $R_{\text{ЭКВ}}$:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{(R_{156} + R_7) \cdot (R_{18} + R_2)}{R_7 + R_{156} + R_{18} + R_2} + R_{568} + R_4 = 997.328 (\text{Ом}).$$

Находим ток I_3 :

$$I_3 = \frac{U_{xx}}{R_{\text{ЭКВ}} + R_3} = \frac{1691}{997.328 + 720} = 0.996(A).$$

Расчёт схемы методом эквивалентного генератора (Mathcad) представлен в приложении 4.

11. Построение потенциальной диаграммы по контуру а – b – c – d – e – f – g – a.

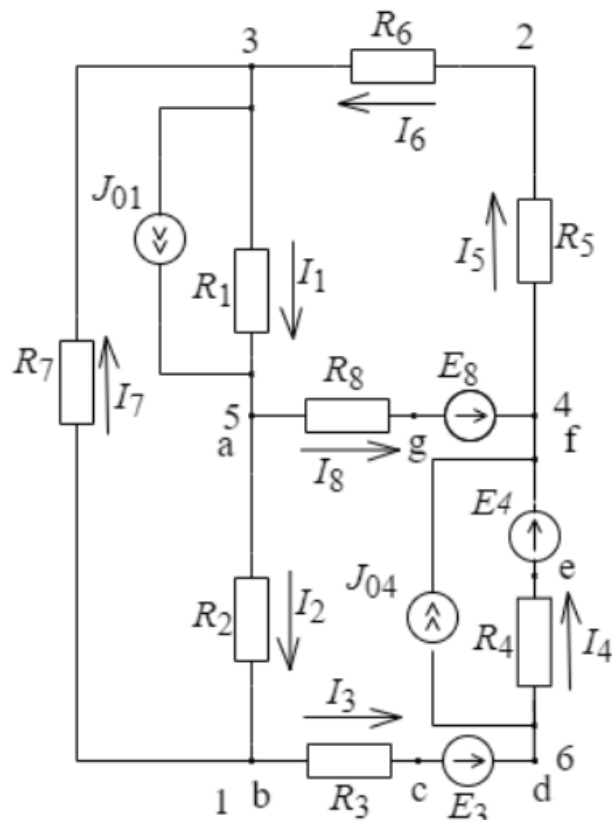


Рис. 13

Определим узловые потенциалы для схемы (рис.13):

$$\begin{aligned}
 \varphi_a &= 0 \text{ (В)}, \\
 \varphi_b &= \varphi_a + I_2 R_2 = -362.585 \text{ (В)}, \\
 \varphi_c &= \varphi_b - I_3 R_3 = -1079.836 \text{ (В)}, \\
 \varphi_d &= \varphi_c + E_3 = -879.836 \text{ (В)}, \\
 \varphi_e &= \varphi_d - I_4 R_4 = -58.272 \text{ (В)}, \\
 \varphi_f &= \varphi_e + E_4 = 441.728 \text{ (В)}, \\
 \varphi_g &= \varphi_f + I_8 R_8 = 400 \text{ (В)}, \\
 \varphi_a &= \varphi_g - E_8 = 0 \text{ (В)},
 \end{aligned}$$

Потенциальная диаграмма представлена на рис. 14.

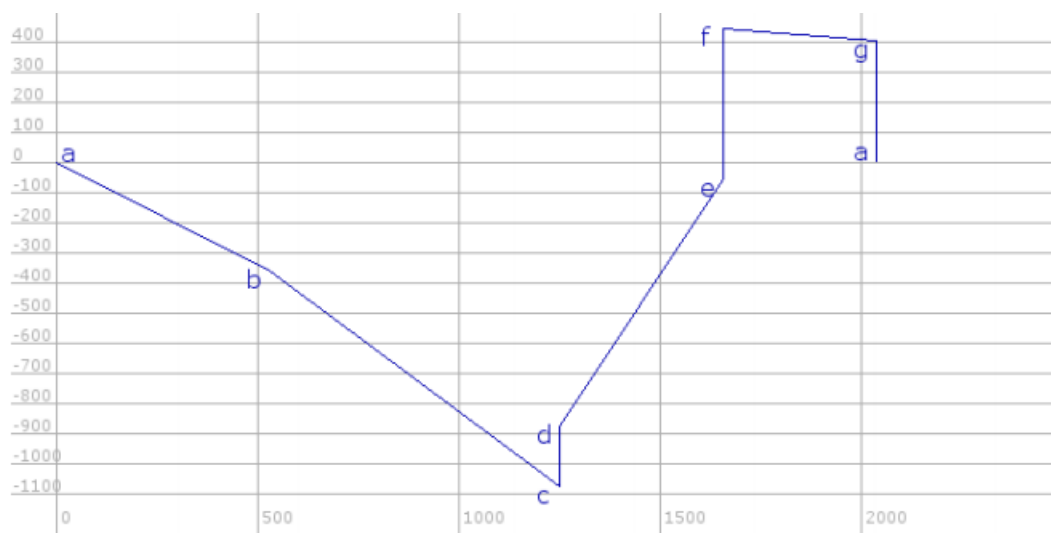


Рис. 14 – Потенциальная диаграмма

Результаты расчетов представлены в таблице.

I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	U_{25}	U_{xx}	$R_{ген}$	P
-0.426	0.684	0.996	-2.005	0.886	0.886	-0.312	-0.11	246.727	1691	997.328	3190

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Определение токов методом наложения (расчеты MATHCAD)

$R1 := 170$ $R5 := 220$ $E3 := 200$ $J01 := 1$
 $R2 := 530$ $R6 := 360$ $E4 := 500$ $J04 := 3$
 $R3 := 720$ $R7 := 930$ $E8 := 400$
 $R4 := 410$ $R8 := 380$

$R34 := R3 + R4$ $R34 = 1.13 \times 10^3$
 $R56 := R5 + R6$ $R56 = 580$

$E04 := J04 \cdot R4$ $E04 = 1.23 \times 10^3$

$E34 := E04 + E3 + E4$ $E34 = 1.93 \times 10^3$

$J8 := \frac{E8}{R8}$ $J8 = 1.053$

$R156 := \frac{R1 \cdot R56}{R1 + R56 + R8}$ $R156 = 87.257$

$R568 := \frac{R56 \cdot R8}{R1 + R56 + R8}$ $R568 = 195.044$

$R18 := \frac{R1 \cdot R8}{R1 + R56 + R8}$ $R18 = 57.168$

$E156 := J01 \cdot R156$ $E156 = 87.257$

$E568 := J8 \cdot R568$ $E568 = 205.31$

$E18 := (J8 - J01) \cdot R18$ $E18 = 3.009$

$E34568 := E34 - E568$ $E34568 = 1.725 \times 10^3$

$R34568 := R34 + R568$ $R34568 = 1.325 \times 10^3$

$R182 := R18 + R2$ $R182 = 587.168$

$R1567 := R156 + R7$ $R1567 = 1.017 \times 10^3$

$Iy1 := -\left(\frac{E156}{R1567} + \frac{E18}{R182} + \frac{E34568}{R34568} \right)$ $Iy1 = -1.393$

$g11 := \frac{1}{R34568} + \frac{1}{R182} + \frac{1}{R1567}$ $g11 = 3.441 \times 10^{-3}$

$fi1 := \frac{Iy1}{g11}$ $fi1 = -404.703$ $fi0 := 0$

$$f1 := \frac{Iy1}{g11} \quad f1 = -404.703 \quad f10 := 0$$

$$I2' := \frac{f1 - f10 + E18}{R182} \quad I2' = -0.684$$

$$I4' := \frac{f1 - f10 + E34568}{R34568} \quad I4' = 0.996$$

$$I7' := \frac{f1 - f10 + E156}{R1567} \quad I7' = -0.312$$

$$I2 := -I2' \quad I2 = 0.684$$

$$I7 := I7' \quad I7 = -0.312$$

$$I3 := I4' \quad I3 = 0.996$$

$$I4 := I3 - J04 \quad I4 = -2.004$$

$$U43 := -I4' \cdot R34 + E34 + I7 \cdot R7 \quad U43 = 514.096$$

$$U54 := I4' \cdot R34 - E34 + I2 \cdot R2 \quad U54 = -441.728$$

$$U35 := -I2 \cdot R2 - I7 \cdot R7 \quad U35 = -72.367$$

$$I5 := \frac{U43}{R56} \quad I6 := I5 \quad I5 = 0.886$$

$$I8 := \frac{U54 + E8}{R8} \quad I8 = -0.11$$

+

$$I1 := I8 + I2 - J01 \quad I1 = -0.426$$

$$U25 := I6 \cdot R6 + I1 \cdot R1 \quad U25 = 246.727$$

$$Ppr := I1^2 \cdot R1 + I2^2 \cdot R2 + I3^2 \cdot R3 + I4^2 \cdot R4 + I5^2 \cdot R5 + I6^2 \cdot R6 + (I7^2 \cdot R7) + I8^2 \cdot R8$$

$$U64 := I4 \cdot R4 - E4 \quad U64 = -1.322 \times 10^3$$

$$Pist := I8 \cdot E8 + I4 \cdot E4 + I3 \cdot E3 - U64 \cdot J04 - U35 \cdot J01$$

$$Pist = 3.19 \times 10^3$$

$$Ppr = 3.19 \times 10^3$$

$$U25 := I6 \cdot R6 + I1 \cdot R1 \quad U25 = 246.727$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Определение токов методом контурных токов (расчеты MATHCAD)

```

R1 := 170  R5 := 220  E3 := 200  J01 := 1
R2 := 530  R6 := 360  E4 := 500  J04 := 3
R3 := 720  R7 := 930  E8 := 400
R4 := 410  R8 := 380
I11 := 0   I22 := 0   I33 := 0

```

Given

$$I_{11} \cdot (R_1 + R_6 + R_5 + R_8) + I_{33} \cdot R_8 - I_{22} \cdot R_1 + J_{01} \cdot R_1 = -E_8$$

$$I_{22} \cdot (R_2 + R_7 + R_1) + I_{33} \cdot R_2 - I_{11} \cdot R_1 = 0$$

$$I_{33} \cdot (R_2 + R_8 + R_4 + R_3) - J_{04} \cdot R_4 + I_{11} \cdot R_8 + I_{22} \cdot R_2 = E_3 + E_4 - E_8$$

$$\text{Find}(I_{11}, I_{22}, I_{33}) = \begin{pmatrix} -0.917 \\ -0.431 \\ 1.033 \end{pmatrix} \quad +$$

$$I_{11} := -0.917$$

$$I_{22} := -0.431$$

$$I_{33} := 1.033$$

$$I_1 := -I_{11} - J_{01} + I_{22} \quad I_1 = -0.514$$

$$I_2 := I_{33} + I_{22} \quad I_2 = 0.602$$

$$I_3 := I_{33} \quad I_3 = 1.033$$

$$I_4 := -J_{04} + I_{33} \quad I_4 = -1.967$$

$$I_5 := -I_{11} \quad I_5 = 0.917$$

$$I_6 := I_5 \quad I_6 = 0.917$$

$$I_7 := I_{22} \quad I_7 = -0.431$$

$$I_8 := -I_{11} - I_{33} \quad I_8 = -0.116$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Определение токов методом узловых потенциалов (расчеты MATHCAD)

$$\begin{aligned} R1 &:= 170 & R5 &:= 220 & E3 &:= 200 & J01 &:= 1 \\ R2 &:= 530 & R6 &:= 360 & E4 &:= 500 & J04 &:= 3 \\ R3 &:= 720 & R7 &:= 930 & E8 &:= 400 \\ R4 &:= 410 & R8 &:= 380 \end{aligned}$$

$$I55 := J01 - \frac{E8}{R8} \quad I55 = -0.053$$

$$I11 := \frac{-E3}{R3} \quad I11 = -0.278$$

$$I66 := \frac{E3}{R3} - \frac{E4}{R4} - J04 \quad I66 = -3.942$$

$$I33 := -J01 \quad I33 = -1$$

$$fi4 := 0 \quad fi1 := 0 \quad fi3 := 0 \quad fi5 := 0 \quad fi6 := 0$$

$$g11 := \left(\frac{1}{R3} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R7} \right) \quad g11 = 4.351 \times 10^{-3}$$

$$g66 := \left(\frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \right) \quad g66 = 3.828 \times 10^{-3}$$

$$g33 := \left(\frac{1}{R6 + R5} + \frac{1}{R1} + \frac{1}{R7} \right) \quad g33 = 8.682 \times 10^{-3}$$

$$g55 := \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R8} \right) \quad g55 = 0.01$$

$$g13 := \frac{1}{R7} \quad g13 = 1.075 \times 10^{-3} \quad g31 := g13$$

$$g15 := \frac{1}{R2} \quad g15 = 1.887 \times 10^{-3} \quad g51 := g15$$

$$g16 := \frac{1}{R3} \quad g16 = 1.389 \times 10^{-3} \quad g61 := g16$$

$$g35 := \frac{1}{R1} \quad g35 = 5.882 \times 10^{-3} \quad g53 := g35$$

R1
 $g_{36} := 0$ $g_{63} := g_{36}$
 $g_{65} := 0$ $g_{56} := g_{65}$

Given
 $f_{i4} = 0$

$I_{11} = f_{i1} \cdot g_{11} - f_{i3} \cdot g_{13} - f_{i5} \cdot g_{15} - f_{i6} \cdot g_{16}$
 $I_{33} = -f_{i1} \cdot g_{31} + f_{i3} \cdot g_{33} - f_{i5} \cdot g_{35} - f_{i6} \cdot g_{36}$
 $I_{55} = -f_{i1} \cdot g_{51} - f_{i3} \cdot g_{53} + f_{i5} \cdot g_{55} - f_{i6} \cdot g_{65}$
 $I_{66} = -f_{i1} \cdot g_{61} - f_{i3} \cdot g_{63} - f_{i5} \cdot g_{65} + f_{i6} \cdot g_{66}$

$\text{Find}(f_{i1}, f_{i3}, f_{i5}, f_{i6}) = \begin{pmatrix} -804.313 \\ -514.096 \\ -441.729 \\ -1.322 \times 10^3 \end{pmatrix}$

$f_{i1} := -804.313$ $f_{i3} := -514.096$
 $f_{i5} := -441.729$ $f_{i6} := -1322$

$I_2 := f_{i5} \cdot g_{15} - f_{i1} \cdot g_{15}$ $I_2 = 0.684$
 $I_1 := (f_{i3} - f_{i5}) \cdot g_{35}$ $I_1 = -0.426$
 $I_3 := (f_{i1} - f_{i6} + E_3) \cdot g_{16}$ $I_3 = 0.997$
 $I_4 := \frac{(f_{i6} - f_{i4} + E_4)}{R_4}$ $I_4 = -2.005$

$I_5 := \frac{(f_{i4} - f_{i3})}{R_5 + R_6}$ $I_5 = 0.886$

$I_6 := I_5$ $I_6 = 0.886$

$I_7 := \frac{(f_{i1} - f_{i3})}{R_7}$ $I_7 = -0.312$

$I_8 := \frac{(f_{i5} - f_{i4} + E_8)}{R_8}$ $I_8 = -0.11$

+

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Определение тока в R_3 методом эквивалентного генератора
(расчеты MATHCAD)

$$I_{11} := 0$$

$$I_{22} := 0$$

+

Given

$$I_{11} \cdot (R_1 + R_8 + R_5 + R_6) + I_{22} \cdot R_1 = J_{01} \cdot R_1 + E_8$$

$$I_{22} \cdot (R_1 + R_2 + R_7) + I_{11} \cdot R_1 = J_{01} \cdot R_1$$

$$\text{Find}(I_{11}, I_{22}) = \begin{pmatrix} 0.497 \\ 0.053 \end{pmatrix}$$

$$\underline{I_{11}} := 0.497 \quad \underline{I_{22}} := 0.053$$

$$U_{xx} := I_{11} \cdot R_8 - I_{22} \cdot R_2 + E_3 + E_4 + J_{04} \cdot R_4 - E_8 \quad U_{xx} = 1.691 \times 10^3$$

$$R_{18} := \frac{R_1 \cdot R_8}{R_1 + R_5 + R_6 + R_8} \quad R_{18} = 57.168$$

$$R_{156} := \frac{R_1 \cdot (R_5 + R_6)}{R_1 + R_5 + R_6 + R_8} \quad R_{156} = 87.257$$

$$R_{568} := \frac{R_8 \cdot (R_5 + R_6)}{R_1 + R_5 + R_6 + R_8} \quad R_{568} = 195.044$$

$$R_a := \frac{(R_7 + R_{156}) \cdot (R_{18} + R_2)}{R_7 + R_{156} + R_{18} + R_2} + R_{568} + R_4 \quad R_a = 977.328$$

$$\underline{I_3} := \frac{U_{xx}}{R_a + R_3} \quad I_3 = 0.996$$