

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ MathCAD ПРИ РАСЧЕТАХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

С целью ускорения процесса расчета рассмотрим основные возможности и приемы работы в математической программной среде MathCAD при расчете режимов работы трехфазных цепей синусоидального тока.

Задача 1

К трехфазному генератору с фазными ЭДС $E_{\phi} = 220$ В подключена симметричная нагрузка, соединенная звездой (рис. 1). Определить комплексы действующих значений токов в фазах нагрузки, если комплексные сопротивления фаз нагрузки $Z_a = Z_b = Z_c = 30 - j30$ Ом, сопротивления линии $Z_{л} = 5 + j5$ Ом. Рассчитать мощность, доставляемую генератором и расходуемую в нагрузке, потери мощности в линии.

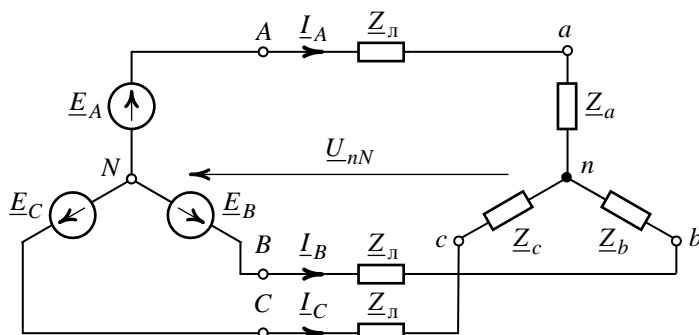


Рис.1

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$ Фазная ЭДС генератора, В: $E_{\phi} := 220$

Комплексные сопротивления, Ом: $Z_{л} := 5 + j \cdot 5$

$Z_a := 30 - j \cdot 30$ $Z_b := 30 - j \cdot 30$ $Z_c := 30 - j \cdot 30$ 2. Комплексные ЭДС фаз генератора, В:

$E_A := E_{\phi} \cdot e^{j \cdot 0 \text{deg}}$ $E_B := a^2 \cdot E_A$ $E_C := a \cdot E_A$

$E_A = 220$ $E_B = -110 - 190.5j$ $E_C = -110 + 190.5j$ 3. Сопротивления фаз, Ом:

$Z_A := Z_{л} + Z_a$ $Z_B := Z_{л} + Z_b$ $Z_C := Z_{л} + Z_c$

$Z_A = 35 - 25j$ $Z_B = 35 - 25j$ $Z_C = 35 - 25j$

4. Комплексы действующих значений линейных (фазных) токов, А:

$U_{nN} := 0$ $I_A := \frac{E_A}{Z_A}$ $I_B := a^2 \cdot I_A$ $I_C := a \cdot I_A$

$I_A = 4.16 + 2.97j$ $I_B = 0.49 - 5.09j$ $I_C = -4.66 + 2.12j$

модуль, А: $|I_A| = 5.11$ $|I_B| = 5.11$ $|I_C| = 5.11$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(I_A)}{\text{deg}} = 35.5 \quad \frac{\arg(I_B)}{\text{deg}} = -84.5 \quad \frac{\arg(I_C)}{\text{deg}} = 155.5$$

5. Мощность, доставляемая трехфазным генератором:

$$\text{активная мощность, Вт: } P_{\Gamma} := 3 \cdot \text{Re}(E_A \cdot \bar{I}_A)$$

$$P_{\Gamma} = 2.75 \times 10^3$$

$$\text{реактивная мощность, ВАр: } Q_{\Gamma} := 3 \cdot \text{Im}(E_A \cdot \bar{I}_A)$$

$$Q_{\Gamma} = -1.96 \times 10^3$$

$$\text{полная мощность генератора, ВА: } S_{\Gamma} := \sqrt{P_{\Gamma}^2 + Q_{\Gamma}^2}$$

$$S_{\Gamma} = 3.38 \times 10^3$$

$$6. \text{ Мощность, расходуемая в нагрузке, Вт: } P_{\text{H}} := \text{Re}[3 \cdot (|I_A|)^2 \cdot Z_a]$$

$$P_{\text{H}} = 2.35 \times 10^3$$

$$7. \text{ Мощность потерь в линии, Вт: } P_{\text{л}} := \text{Re}[3 \cdot (|I_A|)^2 \cdot Z_{\text{л}}]$$

$$P_{\text{л}} = 392.432$$

Задача 2

К симметричному трехфазному генератору с фазной ЭДС $E_{\phi} = 120 \text{ В}$ подключена несимметричная нагрузка, соединенная звездой с нейтральным проводом (рис. 2). Определить показания приборов электромагнитной системы, установленных в цепи, мощность, доставляемую генератором, и активную мощность, расходуемую в нагрузке, если сопротивления линейных проводников $x_L = 15 \text{ Ом}$, нейтрали $r_0 = 20 \text{ Ом}$ и комплексные сопротивления фаз нагрузки $Z_a = 250 + j150 \text{ Ом}$, $Z_b = 100 - j60 \text{ Ом}$, $Z_c = 50 - j30 \text{ Ом}$. Выполнить проверку расчета составлением баланса мощностей.

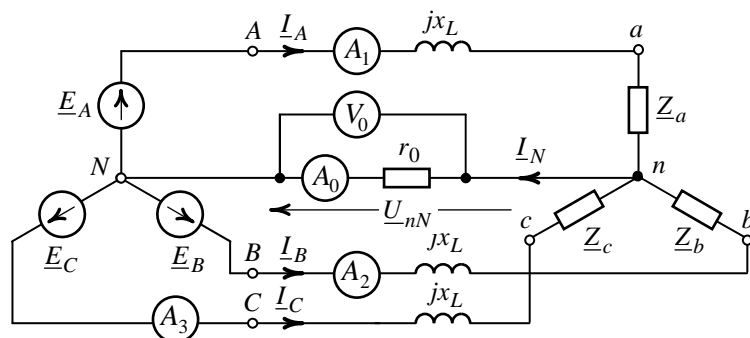


Рис. 2

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

$$1. \text{ Ввод исходных данных: } j := \sqrt{-1} \quad a := e^{j \cdot 120 \text{ deg}} \quad \text{Фазная ЭДС генератора, В: } E_{\phi} := 120$$

$$\text{Комплексные сопротивления, Ом: } X_L := j \cdot 15 \quad r_0 := 20$$

$$Z_a := 250 + j \cdot 150 \quad Z_b := 100 - j \cdot 60 \quad Z_c := 50 - j \cdot 30 \quad 2. \text{ Комплексные ЭДС фаз генератора, В:}$$

$$E_A := E_\phi \cdot e^{j \cdot 0 \text{deg}} \quad E_B := a^2 \cdot E_A \quad E_C := a \cdot E_A$$

$$E_A = 120 \quad E_B = -60 - 103.9j \quad E_C = -60 + 103.9j$$

3. Сопротивления фаз, Ом:

$$Z_A := X_L + Z_a \quad Z_B := X_L + Z_b \quad Z_C := X_L + Z_c$$

$$Z_A = 250 + 165j \quad Z_B = 100 - 45j \quad Z_C = 50 - 15j$$

$$U_{nN} := \frac{\frac{E_A}{Z_A} + \frac{E_B}{Z_B} + \frac{E_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{r_0}} \quad U_{nN} = -17.77 + 5.02j$$

4. Напряжение смещения нейтрали, В:

5. Комплексные действующих значений линейных (фазных) токов, А:

$$I_A := \frac{E_A - U_{nN}}{Z_A} \quad I_B := \frac{E_B - U_{nN}}{Z_B} \quad I_C := \frac{E_C - U_{nN}}{Z_C}$$

$$I_A = 0.37 - 0.27j \quad I_B = 0.06 - 1.06j \quad I_C = -1.32 + 1.58j$$

6. Ток в нейтральном проводе, А: $I_N := \frac{U_{nN}}{r_0} \quad I_N = -0.888 + 0.251j$

амперметров, А:

$$A_1 := |I_A| \quad A_2 := |I_B| \quad A_3 := |I_C| \quad A_0 := |I_N|$$

7. Показания приборов: $A_1 = 0.46 \quad A_2 = 1.07 \quad A_3 = 2.06 \quad A_0 = 0.92$

вольтметра, В: $V := |U_{nN}|$
 $V = 18.46$

8. Мощность, доставляемая трехфазным генератором:

активная мощность, Вт: $P_r := \text{Re}(E_A \cdot \bar{I}_A + E_B \cdot \bar{I}_B + E_C \cdot \bar{I}_C)$
 $P_r = 395.74$

реактивная мощность, ВАр: $Q_r := \text{Im}(E_A \cdot \bar{I}_A + E_B \cdot \bar{I}_B + E_C \cdot \bar{I}_C)$
 $Q_r = -79.81$

полная мощность генератора, ВА: $S_r := \sqrt{P_r^2 + Q_r^2}$
 $S_r = 403.71$

9. Активная мощность, расходуемая в нагрузке, Вт:

$$P_H := \text{Re}[(|I_A|)^2 \cdot Z_a + (|I_B|)^2 \cdot Z_b + (|I_C|)^2 \cdot Z_c]$$

$$P_H = 378.7$$

10. Проверка расчета составлением баланса мощностей

мощность, доставляемая в систему, ВА: $S_r := E_A \cdot \bar{I}_A + E_B \cdot \bar{I}_B + E_C \cdot \bar{I}_C$
 $S_r = 395.74 - 79.81j$

мощность, потребляемая в системе, ВА:

$$S_{\text{пот}} := (|I_A|)^2 \cdot Z_A + (|I_B|)^2 \cdot Z_B + (|I_C|)^2 \cdot Z_C + (|I_N|)^2 \cdot r_0$$

$$S_{\text{пот}} = 395.74 - 79.81j$$

Задача 3

Несимметричная нагрузка, соединенная звездой с нейтральным проводом, подключена к зажимам трехфазного источника с фазным напряжением $U_{\phi} = 240$ В (рис. 3). Определить показания амперметров электромагнитной системы в каждой фазе нагрузки и нейтральном проводе, если $r = 100$ Ом, $x_L = 150$ Ом, $x_C = 50$ Ом.

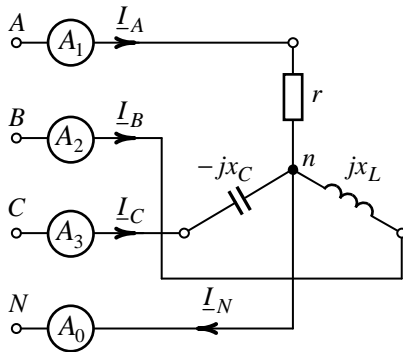


Рис. 3

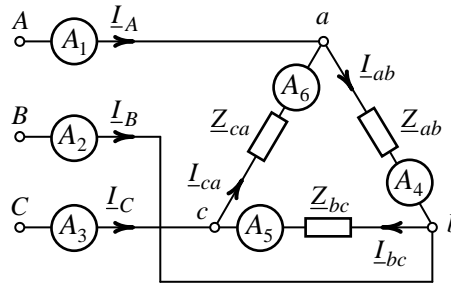


Рис. 4

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

Фазное напряжение источника, В: $U_{\phi} := 240$

Сопrotивления фаз, Ом: $r := 100$ $X_L := 150$ $X_C := 50$

2. Комплексные напряжения фаз источника, В:

$$U_A := U_{\phi} \cdot e^{j \cdot 0 \text{deg}} \quad U_B := a^2 \cdot U_A \quad U_C := a \cdot U_A$$

$$U_A = 240 \quad U_B = -120 - 207.8j \quad U_C = -120 + 207.8j$$

3. Комплексы действующих значений линейных (фазных) токов, А:

$$I_A := \frac{U_A}{r} \quad I_B := \frac{U_B}{j \cdot X_L} \quad I_C := \frac{U_C}{-j \cdot X_C}$$

$$I_A = 2.4 \quad I_B = -1.39 + 0.8j \quad I_C = -4.16 - 2.4j$$

модуль, А: $|I_A| = 2.4 \quad |I_B| = 1.6 \quad |I_C| = 4.8$

аргумент, град: $\frac{\arg(I_A)}{\text{deg}} = 0 \quad \frac{\arg(I_B)}{\text{deg}} = 150 \quad \frac{\arg(I_C)}{\text{deg}} = -150$

4. Ток в нейтральном проводе, А: $I_N := I_A + I_B + I_C \quad I_N = -3.14 - 1.6j$

модуль, А: $|I_N| = 3.5$

аргумент, град: $\frac{\arg(I_N)}{\text{deg}} = -153$

Проверка: $I_A + I_B + I_C - I_N = 0$

5. Показания амперметров, А:

$$\begin{array}{llll} A_1 := |I_A| & A_2 := |I_B| & A_3 := |I_C| & A_0 := |I_N| \\ A_1 = 2.4 & A_2 = 1.6 & A_3 = 4.8 & A_0 = 3.5 \end{array}$$

Задача 4

К выводам симметричного трехфазного генератора подключена несимметричная нагрузка, соединенная треугольником (рис. 4). Определить показания амперметров электромагнитной системы, если напряжение фазы А генератора $\underline{U}_A = 220e^{j0^\circ}$ В, сопротивления фаз нагрузки $\underline{Z}_{ab} = 90 + j120$ Ом, $\underline{Z}_{bc} = 150 + j240$ Ом, $\underline{Z}_{ca} = 40 - j20$ Ом.

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

Напряжение фазы "А" источника, В: $U_A := 220 \cdot e^{j \cdot 0 \text{deg}}$

Сопротивления фаз, Ом:

$$Z_{ab} := 90 + j \cdot 120 \quad Z_{bc} := 150 + j \cdot 240 \quad Z_{ca} := 40 - j \cdot 20$$

2. Комплексы линейных напряжений источника, В:

$$U_{AB} := \sqrt{3} \cdot U_A \cdot e^{j \cdot 30 \text{deg}} \quad U_{BC} := a^2 \cdot U_{AB} \quad U_{CA} := a \cdot U_{AB}$$

$$U_{AB} = 330 + 190.5j \quad U_{BC} = -381.1j \quad U_{CA} = -330 + 190.5j$$

3. Комплексы действующих значений фазных токов, А:

$$I_{ab} := \frac{U_{AB}}{Z_{ab}} \quad I_{bc} := \frac{U_{BC}}{Z_{bc}} \quad I_{ca} := \frac{U_{CA}}{Z_{ca}}$$

$$I_{ab} = 2.34 - j \quad I_{bc} = -1.14 - 0.71j \quad I_{ca} = -8.51 + 0.51j$$

модуль, А: $|I_{ab}| = 2.54 \quad |I_{bc}| = 1.35 \quad |I_{ca}| = 8.52$

аргумент, град: $\frac{\arg(I_{ab})}{\text{deg}} = -23.1 \quad \frac{\arg(I_{bc})}{\text{deg}} = -148 \quad \frac{\arg(I_{ca})}{\text{deg}} = 176.6$

4. Комплексы действующих значений линейных токов, А:

$$I_A := I_{ab} - I_{ca} \quad I_B := I_{bc} - I_{ab} \quad I_C := I_{ca} - I_{bc}$$

модуль, А: $|I_A| = 10.95 \quad |I_B| = 3.49 \quad |I_C| = 7.46$

аргумент, град: $\frac{\arg(I_A)}{\text{deg}} = -7.9 \quad \frac{\arg(I_B)}{\text{deg}} = 175.3 \quad \frac{\arg(I_C)}{\text{deg}} = 170.6$

Проверка: $I_A + I_B + I_C = 0$

5. Показания амперметров, А:

$$A_1 := |I_A| \quad A_2 := |I_B| \quad A_3 := |I_C| \quad A_4 := |I_{ab}| \quad A_5 := |I_{bc}| \quad A_6 := |I_{ca}|$$

$$A_1 = 10.95 \quad A_2 = 3.49 \quad A_3 = 7.46 \quad A_4 = 2.54 \quad A_5 = 1.35 \quad A_6 = 8.52$$

Задача 5

Цепь (рис. 5) получает питание от симметричного трехфазного генератора с линейным напряжением источника $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Найти показания ваттметров и активную мощность генератора, если $r_{\text{л}} = 10 \text{ Ом}$, $Z_a = 150 \text{ Ом}$, $Z_b = 110 + j30 \text{ Ом}$, $Z_c = -j270 \text{ Ом}$.

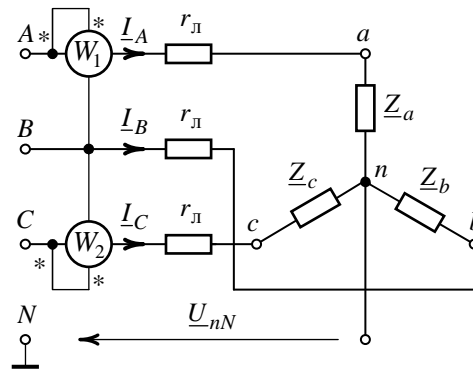


Рис. 5

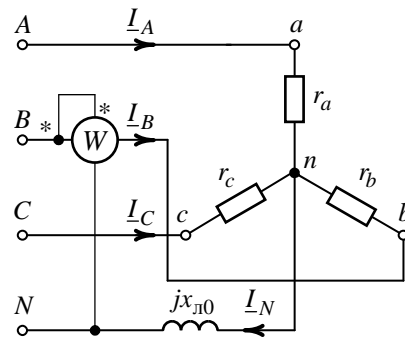


Рис. 6

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{ deg}}$

Линейное напряжение источника, В: $U_{\text{л}} := 380$

Сопrotивления, Ом: $r_{\text{л}} := 10$ $Z_a := 150$ $Z_b := 110 + j \cdot 30$ $Z_c := -j \cdot 270$

2. Комплексы фазных напряжений трехфазного источника, В:

$$U_A := \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j \cdot 0 \text{ deg}} \quad U_B := a^2 \cdot U_A \quad U_C := a \cdot U_A$$

$$U_A = 219.4 \quad U_B = -109.7 - 190j \quad U_C = -109.7 + 190j$$

3. Сопrotивления фаз, Ом:

$$Z_A := r_{\text{л}} + Z_a \quad Z_B := r_{\text{л}} + Z_b \quad Z_C := r_{\text{л}} + Z_c$$

$$Z_A = 160 \quad Z_B = 120 + 30j \quad Z_C = 10 - 270j$$

4. Напряжение смещения нейтрали, В:

$$U_{nN} := \frac{\frac{U_A}{Z_A} + \frac{U_B}{Z_B} + \frac{U_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} \quad U_{nN} = -54.12 - 109.68j$$

5. Комплексы действующих значений линейных (фазных) токов, А:

$$I_A := \frac{U_A - U_{nN}}{Z_A} \quad I_B := \frac{U_B - U_{nN}}{Z_B} \quad I_C := \frac{U_C - U_{nN}}{Z_C}$$

$$I_A = 1.71 + 0.69j \quad I_B = -0.59 - 0.52j \quad I_C = -1.12 - 0.16j$$

$$\text{Проверка: } I_A + I_B + I_C = 0$$

6. Расчет показаний ваттметров:

напряжения на обмотках ваттметров, В:

$$U_{W1} := U_A - U_B \quad U_{W2} := U_C - U_B$$

$$U_{W1} = 329.09 + 190j \quad U_{W2} = 380j$$

показания ваттметров, Вт :

$$P_{W1} := \operatorname{Re}(U_{W1} \cdot \bar{I}_A) \quad P_{W2} := \operatorname{Re}(U_{W2} \cdot \bar{I}_C)$$

$$P_{W1} = 692.8 \quad P_{W2} = -62.5$$

7. Активная мощность генератора, Вт: $P_\Gamma := P_{W1} + P_{W2}$

$$P_\Gamma = 630.3$$

Задача 6

Найти показания ваттметра, включенного по схеме (рис. 6), если фазное напряжение симметричного трехфазного источника $U_\phi = 110 \text{ В}$, сопротивления фаз нагрузки $r_a = 20 \text{ Ом}$, $r_b = 60 \text{ Ом}$, $r_c = 40 \text{ Ом}$, сопротивление нейтрального провода $x_{L0} = 10 \text{ Ом}$.

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

Фазное напряжение источника, В: $U_\phi := 110$

Сопротивления, Ом: $r_a := 20$ $r_b := 60$ $r_c := 40$ $X_{L0} := 10$

2. Комплексные напряжения фаз источника, В:

$$U_A := U_\phi \cdot e^{j \cdot 0 \text{deg}} \quad U_B := a^2 \cdot U_A \quad U_C := a \cdot U_A$$

$$U_A = 110 \quad U_B = -55 - 95.3j \quad U_C = -55 + 95.3j$$

3. Напряжение смещения нейтрали, В :

$$U_{nN} := \frac{\frac{U_A}{r_a} + \frac{U_B}{r_b} + \frac{U_C}{r_c}}{\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c} + \frac{1}{j \cdot X_{L0}}} \quad U_{nN} = 11.67 + 21.39j$$

4. Комплекс линейного тока в фазе "В", А :

$$I_B := \frac{U_B - U_{nN}}{r_b} \quad I_B = -1.11 - 1.94j$$

5. Показания ваттметра, Вт: $P_W := \operatorname{Re}(U_B \cdot \bar{I}_B)$

$$P_W = 246.32$$

Задача 7

Разложить несимметричную систему фазных напряжений, заданных на рис. 7, на симметричные составляющие. Найти симметричные составляющие линейных напряжений, если модули фазных напряжений $U_A = U_B = 110 \text{ В}$, $U_C = 200 \text{ В}$.

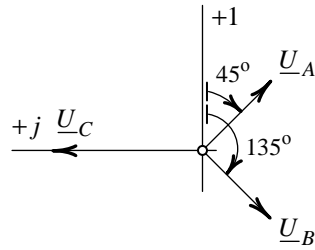


Рис. 7

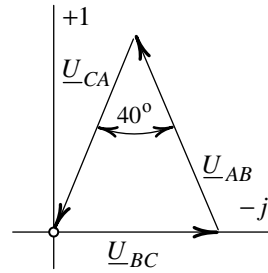


Рис. 8

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

$$U_A := 110 \cdot e^{-j \cdot 45 \text{deg}} \quad U_B := 110 \cdot e^{-j \cdot 135 \text{deg}} \quad U_C := 200 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}}$$

2. Симметричные составляющие напряжений прямой последовательности чередования фаз, В:

$$U_{A1} := \frac{1}{3} \cdot (U_A + a \cdot U_B + a^2 \cdot U_C) \quad U_{B1} := a^2 \cdot U_{A1} \quad U_{C1} := a \cdot U_{A1}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{A1}| = 137.5 \quad |U_{B1}| = 137.5 \quad |U_{C1}| = 137.5$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{A1})}{\text{deg}} = -30 \quad \frac{\arg(U_{B1})}{\text{deg}} = -150 \quad \frac{\arg(U_{C1})}{\text{deg}} = 90$$

3. Симметричные составляющие напряжений обратной последовательности чередования фаз, В:

$$U_{A2} := \frac{1}{3} \cdot (U_A + a^2 \cdot U_B + a \cdot U_C) \quad U_{B2} := a \cdot U_{A2} \quad U_{C2} := a^2 \cdot U_{A2}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{A2}| = 47.7 \quad |U_{B2}| = 47.7 \quad |U_{C2}| = 47.7$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{A2})}{\text{deg}} = -150 \quad \frac{\arg(U_{B2})}{\text{deg}} = -30 \quad \frac{\arg(U_{C2})}{\text{deg}} = 90$$

4. Симметричные составляющие напряжений нулевой последовательности чередования фаз, В:

$$U_{A0} := \frac{1}{3} \cdot (U_A + U_B + U_C) \quad U_{B0} := U_{A0} \quad U_{C0} := U_{A0}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{A0}| = 14.8 \quad |U_{B0}| = 14.8 \quad |U_{C0}| = 14.8$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{A0})}{\text{deg}} = 90 \quad \frac{\arg(U_{B0})}{\text{deg}} = 90 \quad \frac{\arg(U_{C0})}{\text{deg}} = 90$$

5. Симметричные составляющие линейных напряжений.

Прямой последовательности чередования фаз, В:

$$U_{AB1} := U_{A1} - U_{B1} \quad U_{BC1} := a^2 \cdot U_{AB1} \quad U_{CA1} := a \cdot U_{AB1}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{AB1}| = 238.2 \quad |U_{BC1}| = 238.2 \quad |U_{CA1}| = 238.2$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{AB1})}{\text{deg}} = 0 \quad \frac{\arg(U_{BC1})}{\text{deg}} = -120 \quad \frac{\arg(U_{CA1})}{\text{deg}} = 120$$

Обратной последовательности чередования фаз, В :

$$U_{AB2} := U_{A2} - U_{B2} \quad U_{BC2} := a \cdot U_{AB2} \quad U_{CA2} := a^2 \cdot U_{AB2}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{AB2}| = 82.6 \quad |U_{BC2}| = 82.6 \quad |U_{CA2}| = 82.6$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{AB2})}{\text{deg}} = -180 \quad \frac{\arg(U_{BC2})}{\text{deg}} = -60 \quad \frac{\arg(U_{CA2})}{\text{deg}} = 60$$

Нулевой последовательности чередования фаз, В :

$$U_{AB0} := U_{A0} - U_{B0} \quad U_{BC0} := U_{AB0} \quad U_{CA0} := U_{AB0}$$

$$|U_{AB0}| = 0 \quad |U_{BC0}| = 0 \quad |U_{CA0}| = 0$$

Задача 8

Разложить несимметричную систему линейных напряжений, заданных на рис. 8, на симметричные составляющие, если модули линейных напряжений $U_{AB} = U_{CA} = 380 \text{ В}$, $U_{BC} = 260 \text{ В}$.

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

$$U_{AB} := 380 \cdot e^{j \cdot 20 \text{deg}} \quad U_{BC} := 260 \cdot e^{-j \cdot 90 \text{deg}} \quad U_{CA} := 380 \cdot e^{j \cdot 160 \text{deg}}$$

2. Симметричные составляющие линейных напряжений прямой последовательности чередования фаз, В :

$$U_{AB1} := \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + a \cdot U_{BC} + a^2 \cdot U_{CA}) \quad U_{BC1} := a^2 \cdot U_{AB1} \quad U_{CA1} := a \cdot U_{AB1}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{AB1}| = 336.2 \quad |U_{BC1}| = 336.2 \quad |U_{CA1}| = 336.2$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{AB1})}{\text{deg}} = 30 \quad \frac{\arg(U_{BC1})}{\text{deg}} = -90 \quad \frac{\arg(U_{CA1})}{\text{deg}} = 150$$

3. Симметричные составляющие линейных напряжений обратной последовательности чередования фаз, В :

$$U_{AB2} := \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + a^2 \cdot U_{BC} + a \cdot U_{CA}) \quad U_{BC2} := a \cdot U_{AB2} \quad U_{CA2} := a^2 \cdot U_{AB2}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{AB2}| = 76.2 \quad |U_{BC2}| = 76.2 \quad |U_{CA2}| = 76.2$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{AB2})}{\text{deg}} = -30 \quad \frac{\arg(U_{BC2})}{\text{deg}} = 90 \quad \frac{\arg(U_{CA2})}{\text{deg}} = -150$$

4. Симметричные составляющие линейных напряжений нулевой последовательности чередования фаз, В :

$$U_{A0} := \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) \quad U_{B0} := U_{A0} \quad U_{C0} := U_{A0}$$

$$\text{модуль, В: } |U_{A0}| = 0 \quad |U_{B0}| = 0 \quad |U_{C0}| = 0$$

Задача 9

К источнику с несимметричной системой фазных напряжений, заданных на рис. 9, а, подключен трехфазный электрический двигатель по схеме (рис. 9, б). Методом симметричных составляющих рассчитать токи в фазах и нейтральном проводе, если модули фазных напряжений $U_A = 240$ В, $U_B = 200$ В, $U_C = 120$ В; сопротивления обмоток двигателя токам прямой, обратной и нулевой последовательностей $Z_1 = 6 + j4$ Ом, $Z_2 = 2 + j0,8$ Ом, $Z_0 = 1 + j0,5$ Ом; сопротивление нейтрального провода $Z_N = 2 + j2$ Ом.

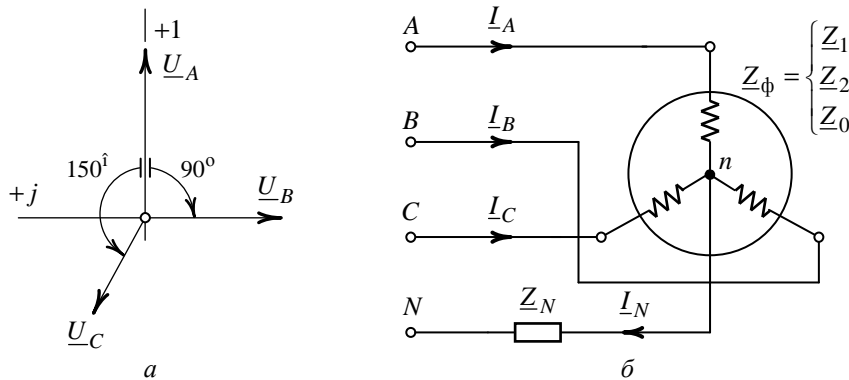


Рис. 9

Решение

Пример вычислительного блока, реализованного в среде MathCAD:

1. Ввод исходных данных: $j := \sqrt{-1}$ $a := e^{j \cdot 120 \text{deg}}$

сопротивления токам прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$Z_1 := 6 + j \cdot 4 \quad Z_2 := 2 + j \cdot 0.8 \quad Z_0 := 1 + j \cdot 0.5$$

сопротивление нейтрали: $Z_N := 2 + j \cdot 2$

2. Комплексные значения фазных напряжений (рис. 7.13, а) В:

$$U_A := 240 \cdot e^{j \cdot 0 \text{deg}} \quad U_B := 200 \cdot e^{-j \cdot 90 \text{deg}} \quad U_C := 120 \cdot e^{j \cdot 150 \text{deg}}$$

3. Разложение напряжений источника на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей для фазы "А", В:

$$U_{A1} := \frac{1}{3} \cdot (U_A + a \cdot U_B + a^2 \cdot U_C)$$

$$\text{модуль, В: } |U_{A1}| = 180.4$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{A1})}{\text{deg}} = 17.2$$

$$U_{A2} := \frac{1}{3} \cdot (U_A + a^2 \cdot U_B + a \cdot U_C)$$

$$\text{модуль, В: } |U_{A2}| = 23.2$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{A2})}{\text{deg}} = -16.7$$

$$U_{A0} := \frac{1}{3} \cdot (U_A + U_B + U_C)$$

$$\text{модуль, В: } |U_{A0}| = 65.1$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(U_{A0})}{\text{deg}} = -45.8$$

4. Расчет симметричных составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы "А", А :

$$I_{A1} := \frac{U_{A1}}{Z_1} \quad I_{A2} := \frac{U_{A2}}{Z_2} \quad I_{A0} := \frac{U_{A0}}{Z_0 + 3 \cdot Z_N}$$

$$\text{модуль, А: } |I_{A1}| = 25 \quad |I_{A2}| = 10.8 \quad |I_{A0}| = 6.81$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(I_{A1})}{\text{deg}} = -16.5 \quad \frac{\arg(I_{A2})}{\text{deg}} = -38.5 \quad \frac{\arg(I_{A0})}{\text{deg}} = -88.7$$

5. Фазные токи, А :

$$I_A := I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} \quad I_B := a^2 \cdot I_{A1} + a \cdot I_{A2} + I_{A0} \quad I_C := a \cdot I_{A1} + a^2 \cdot I_{A2} + I_{A0}$$

$$\text{модуль, А: } |I_A| = 38.6 \quad |I_B| = 21.2 \quad |I_C| = 20.8$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(I_A)}{\text{deg}} = -32.3 \quad \frac{\arg(I_B)}{\text{deg}} = -140.8 \quad \frac{\arg(I_C)}{\text{deg}} = 139.2$$

6. Ток в нейтральном проводе, А : $I_N := 3 \cdot I_{A0}$

$$\text{модуль, А: } |I_N| = 20.44$$

$$\text{аргумент, град: } \frac{\arg(I_N)}{\text{deg}} = -88.7$$

$$\text{Проверка: } I_A + I_B + I_C - I_N = 2 \times 10^{-15} - j \times 10^{-14}$$