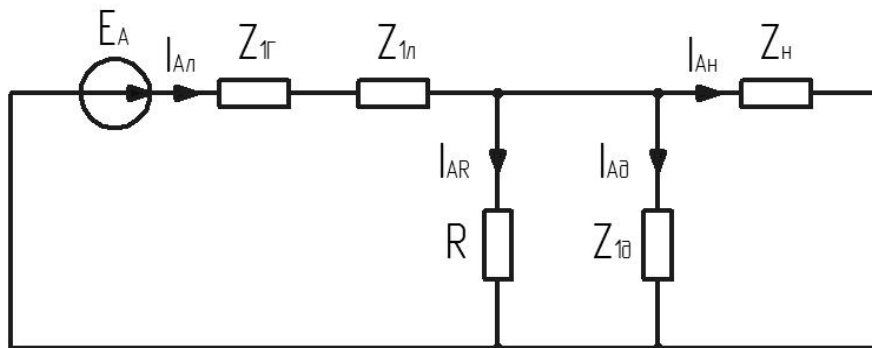


$E_A = 400$	V	$Z_{1л} = 0.7j$	Ом
$Z_{1r} = 2.5j$	Ом	$Z_{2л} = 0.7j$	Ом
$Z_{2r} = j$	Ом	$Z_{0л} = 1.3j$	Ом
$Z_{0r} = 0.5j$	Ом	$Z_{1д} = 4j$	Ом
$Z_{3r} = 2j$	Ом	$Z_{2д} = 2.5j$	Ом
$R = 7$	Ом	$Z_H = 11.4$	Ом

Решение

1.1 Расчетная схема для фазы А



Рассчитаем токи

$$Z_{\text{экв}} = Z_{1Г} + Z_{1Л} + \frac{Z_H \cdot Z_{1д} \cdot R}{Z_H \cdot Z_{1д} + R \cdot Z_{1д} + Z_H \cdot R} = 2.5j + 0.7j + \frac{11.4 \cdot 4j \cdot 7}{11.4 \cdot 4j + 7 \cdot 4j + 11.4 \cdot 7} = 1.99 + 5.36j \quad \text{Ом}$$

$$I_{\text{Ал}} = \frac{E_A}{Z_{\text{экв}}} = \frac{400}{1.99 + 5.36j} = 24.37 - 65.55j \quad \text{А} \quad I_{\text{Ал}} = 69.93 \cdot e^{-j \cdot 69.6} \quad \text{А}$$

$$I_{\text{Ад}} = I_{\text{Ал}} \cdot \frac{Z_H \cdot R}{Z_H \cdot Z_{1д} + R \cdot Z_{1д} + Z_H \cdot R} = (24.37 - 65.55j) \cdot \frac{11.4 \cdot 7}{11.4 \cdot 4j + 7 \cdot 4j + 11.4 \cdot 7} = -19.5 - 47.56j \quad \text{А}$$

$$I_{\text{Ад}} = 51.4 \cdot e^{-j \cdot 112.29} \quad \text{А}$$

$$I_{\text{АР}} = I_{\text{Ал}} \cdot \frac{Z_H \cdot Z_{1д}}{Z_H \cdot Z_{1д} + R \cdot Z_{1д} + Z_H \cdot R} = (24.37 - 65.55j) \cdot \frac{11.4 \cdot 4j}{11.4 \cdot 4j + 7 \cdot 4j + 11.4 \cdot 7} = 27.18 - 11.14j \quad \text{А}$$

$$I_{\text{АР}} = 29.37 \cdot e^{-j \cdot 22.29} \quad \text{А}$$

$$I_{\text{Ан}} = I_{\text{Ал}} \cdot \frac{Z_{1д} \cdot R}{Z_H \cdot Z_{1д} + R \cdot Z_{1д} + Z_H \cdot R} = (24.37 - 65.55j) \cdot \frac{4j \cdot 7}{11.4 \cdot 4j + 7 \cdot 4j + 11.4 \cdot 7} = 16.69 - 6.84j \quad \text{А}$$

$$I_{\text{Ан}} = 18.04 \cdot e^{-j \cdot 22.29} \quad \text{А}$$

ЭДС остальных фаз

$$E_B = E_A \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -200 - 346.41j \quad \text{В}$$

$$E_C = E_A \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -200 + 346.41j \quad \text{В}$$

Токи цепи

$$I_{\text{Вл}} = I_{\text{Ал}} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -68.95 + 11.67j \quad \text{А} \quad I_{\text{Вл}} = 69.93 \cdot e^{j \cdot 170.4} \quad \text{А}$$

$$I_{\text{ВР}} = I_{\text{АР}} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -23.24 - 17.97j \quad \text{А} \quad I_{\text{ВР}} = 29.37 \cdot e^{-j \cdot 142.29} \quad \text{А}$$

$$I_{\text{Вд}} = I_{\text{Ад}} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -31.44 + 40.67j \quad \text{А} \quad I_{\text{Вд}} = 51.4 \cdot e^{j \cdot 127.71} \quad \text{А}$$

$$I_{\text{Вн}} = I_{\text{Ан}} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -14.27 - 11.03j \quad \text{А} \quad I_{\text{Вн}} = 18.04 \cdot e^{-j \cdot 142.29} \quad \text{А}$$

$$\begin{aligned}
I_{CЛ} &= I_{AЛ} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = 44.58 + 53.88j & A & & I_{CЛ} &= 69.93 \cdot e^{j \cdot 50.4} & A \\
I_{CR} &= I_{AR} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -3.94 + 29.11j & A & & I_{CR} &= 29.37 \cdot e^{j \cdot 97.71} & A \\
I_{CД} &= I_{AD} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = 50.94 + 6.9j & A & & I_{CД} &= 51.4 \cdot e^{j \cdot 7.71} & A \\
I_{CH} &= I_{AH} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -2.42 + 17.87j & A & & I_{CH} &= 18.04 \cdot e^{j \cdot 97.71} & A
\end{aligned}$$

$$I_N = I_{AЛ} + I_{BЛ} + I_{CЛ} = 24.37 - 65.55j + -68.95 + 11.67j + 44.58 + 53.88j = 0 \quad A$$

Напряжения на участках цепи

$$\begin{aligned}
U_{AЛ} &= I_{AЛ} \cdot Z_{1Л} = (24.37 - 65.55j) \cdot 2.5j = 163.86 + 60.93j & B & & U_{AЛ} &= 174.82 \cdot e^{j \cdot 20.4} & B \\
U_{BЛ} &= I_{BЛ} \cdot Z_{1Л} = (-68.95 + 11.67j) \cdot 2.5j = -29.17 - 172.37j & B & & U_{BЛ} &= 174.82 \cdot e^{-j \cdot 99.6} & B \\
U_{CЛ} &= I_{CЛ} \cdot Z_{1Л} = (44.58 + 53.88j) \cdot 2.5j = -134.7 + 111.45j & B & & U_{CЛ} &= 174.82 \cdot e^{j \cdot 140.4} & B \\
U_{AД} &= I_{AД} \cdot Z_{1Д} = (24.37 - 65.55j) \cdot 0.7j = 45.88 + 17.06j & B & & U_{AД} &= 48.95 \cdot e^{j \cdot 20.4} & B \\
U_{BД} &= I_{BД} \cdot Z_{1Д} = (-68.95 + 11.67j) \cdot 0.7j = -8.17 - 48.26j & B & & U_{BД} &= 48.95 \cdot e^{-j \cdot 99.6} & B \\
U_{CД} &= I_{CД} \cdot Z_{1Д} = (44.58 + 53.88j) \cdot 0.7j = -37.72 + 31.21j & B & & U_{CД} &= 48.95 \cdot e^{j \cdot 140.4} & B \\
U_{AR} &= I_{AR} \cdot R = (27.18 - 11.14j) \cdot 7 = 190.25 - 77.99j & B & & U_{AR} &= 205.62 \cdot e^{-j \cdot 22.29} & B \\
U_{BR} &= I_{BR} \cdot R = (-23.24 - 17.97j) \cdot 7 = -162.67 - 125.77j & B & & U_{BR} &= 205.62 \cdot e^{-j \cdot 142.29} & B \\
U_{CR} &= I_{CR} \cdot R = (-3.94 + 29.11j) \cdot 7 = -27.59 + 203.76j & B & & U_{CR} &= 205.62 \cdot e^{j \cdot 97.71} & B \\
U_{AD} &= I_{AD} \cdot Z_{1Д} = (-19.5 - 47.56j) \cdot 4j = 190.25 - 77.99j & B & & U_{AD} &= 205.62 \cdot e^{-j \cdot 22.29} & B \\
U_{BD} &= I_{BD} \cdot Z_{1Д} = (-31.44 + 40.67j) \cdot 4j = -162.67 - 125.77j & B & & U_{BD} &= 205.62 \cdot e^{-j \cdot 142.29} & B \\
U_{CD} &= I_{CD} \cdot Z_{1Д} = (50.94 + 6.9j) \cdot 4j = -27.59 + 203.76j & B & & U_{CD} &= 205.62 \cdot e^{j \cdot 97.71} & B \\
U_{AH} &= I_{AH} \cdot Z_H = (16.69 - 6.84j) \cdot 11.4 = 190.25 - 77.99j & B & & U_{AH} &= 205.62 \cdot e^{-j \cdot 22.29} & B
\end{aligned}$$

$$U_{BH} = I_{BH} \cdot Z_H = (-14.27 - 11.03j) \cdot 11.4 = -162.67 - 125.77j \quad \text{В} \quad U_{BH} = 205.62 \cdot e^{-j \cdot 142.29} \quad \text{В}$$

$$U_{CH} = I_{CH} \cdot Z_H = (-2.42 + 17.87j) \cdot 11.4 = -27.59 + 203.76j \quad \text{В} \quad U_{CH} = 205.62 \cdot e^{j \cdot 97.71} \quad \text{В}$$

Показания приборов

$$I_A = |I_{Bl}| = 69.93 \quad \text{А}$$

$$U_V = |U_{BR} - U_{AR}| = |-162.67 - 125.77j - (190.25 - 77.99j)| = 356.14 \quad \text{В}$$

1.2 Определим активную и реактивную мощности симметричной нагрузки

$$P_{H1} = 3U_{AH} \cdot I_{AH}^* = (16.69 + 6.84j) \cdot 3 \cdot (190.25 - 77.99j) = 1.11 \times 10^4 \quad \text{Вт}$$

$$P_{H2} = 3U_{AR} \cdot I_{AR}^* = (27.18 + 11.14j) \cdot 3 \cdot (190.25 - 77.99j) = 1.81 \times 10^4 \quad \text{Вт}$$

$$P_{H1} + P_{H2} = 2.92 \times 10^4 \quad \text{Вт}$$

$$Q_{\Delta} = 3I_{\Delta L} \cdot I_{\Delta L}^* \cdot Z_{\Delta L} = (-19.5 + 47.56j) \cdot 3 \cdot (-19.5 - 47.56j) \cdot 4j = 3.17j \times 10^4 \quad \text{вар}$$

$$Q_{\Gamma} = 3I_{\Gamma L} \cdot I_{\Gamma L}^* \cdot Z_{\Gamma L} = (24.37 + 65.55j) \cdot 3 \cdot (24.37 - 65.55j) \cdot 2.5j = 3.67j \times 10^4 \quad \text{вар}$$

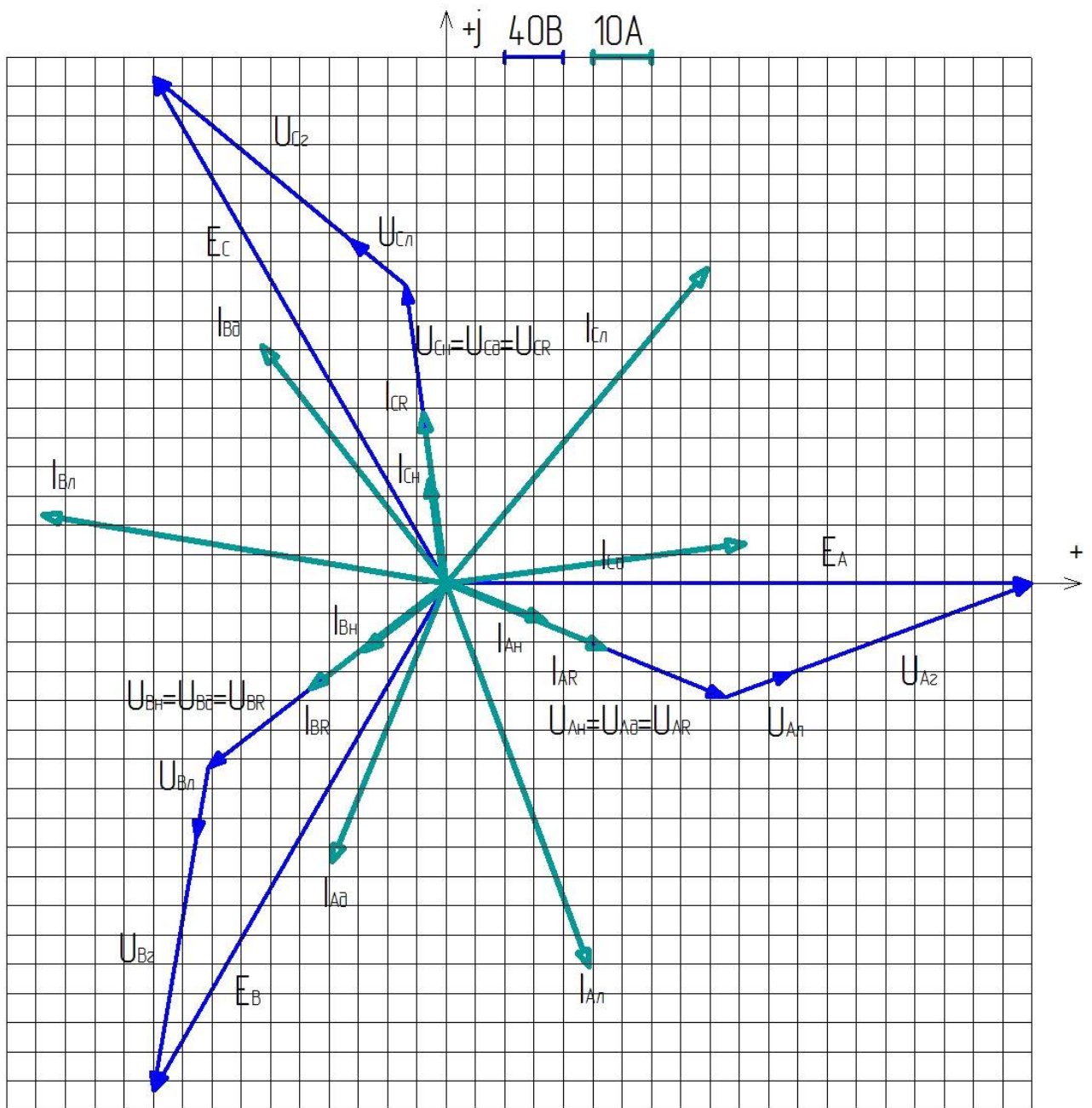
$$Q_{\Pi} = 3I_{\Pi L} \cdot I_{\Pi L}^* \cdot Z_{\Pi L} = (24.37 + 65.55j) \cdot 3 \cdot (24.37 - 65.55j) \cdot 0.7j = 1.03j \times 10^4 \quad \text{вар}$$

$$Q = Q_{\Delta} + Q_{\Gamma} + Q_{\Pi} = 3.17j \times 10^4 + 3.67j \times 10^4 + 1.03j \times 10^4 = 7.87j \times 10^4 \quad \text{вар}$$

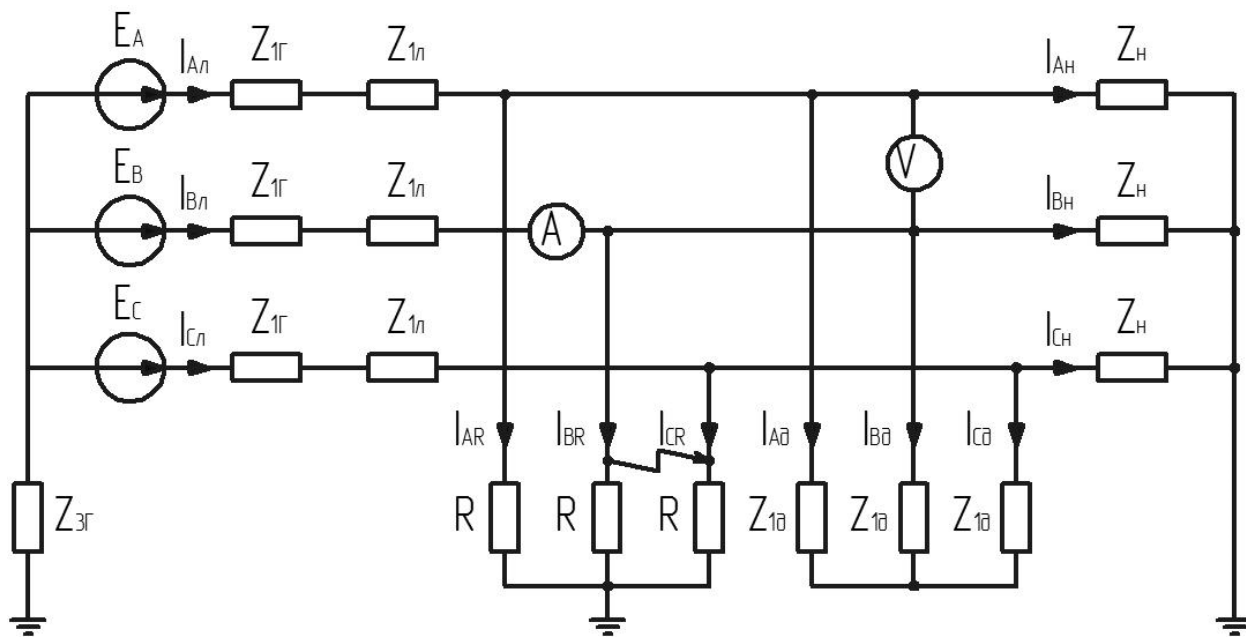
Мощность источника

$$S = 3 \cdot I_{\Delta L}^* \cdot E_A = 3 \cdot (24.37 + 65.55j) \cdot 400 = 2.92 \times 10^4 + 7.87j \times 10^4$$

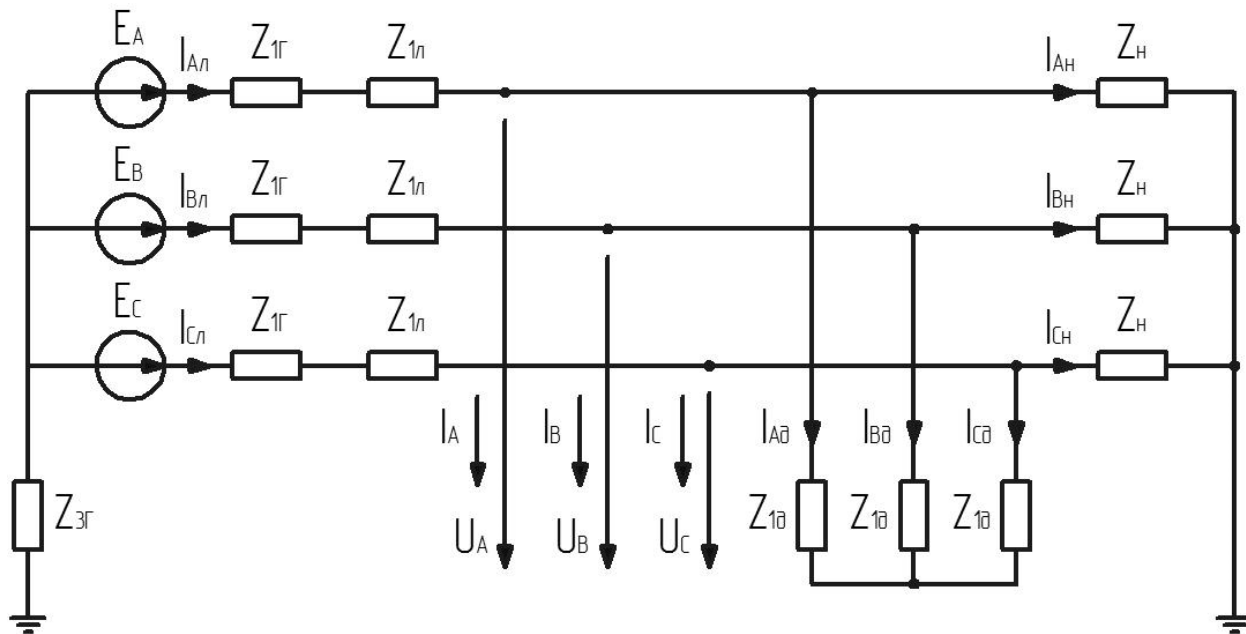
1.3 Построим векторно-топографическую диаграмму цепи



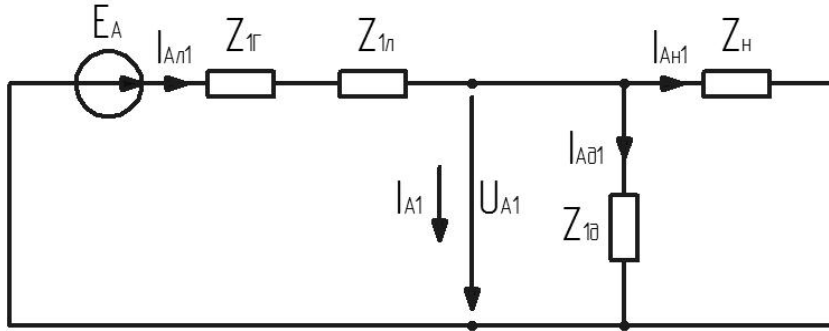
2. Несимметричная трехфазная цепь



Расчетная схема для метода симметричных составляющих



Расчетная схема фазы А для прямой последовательности



Составим уравнение для прямой последовательности

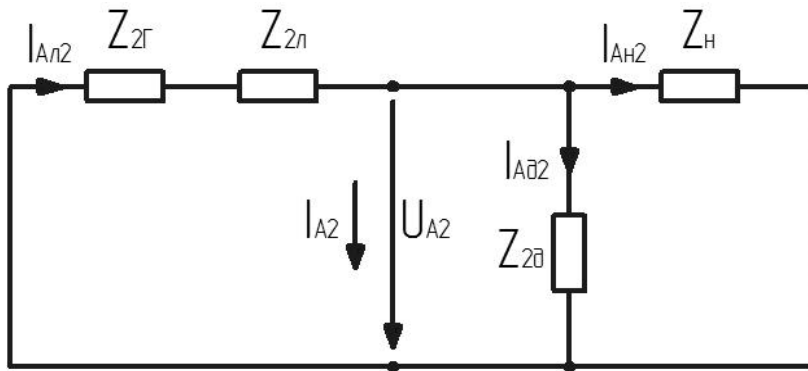
$$E_{\text{экв1}} = \frac{E_A}{\frac{1}{Z_{1Г} + Z_{1Л}} + \frac{1}{Z_{1В}} + \frac{1}{Z_{1Н}}} = \frac{400}{\frac{1}{2.5j + 0.7j} + \frac{1}{4j} + \frac{1}{11.4}} = 216.95 - 33.83j \quad \text{В}$$

$$E_{\text{экв1}} = 219.57 \cdot e^{-j \cdot 8.86} \quad \text{В}$$

$$Z_{\text{экв1}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{1Г} + Z_{1Л}} + \frac{1}{Z_{1В}} + \frac{1}{Z_{1Н}}} = \frac{1}{\frac{1}{2.5j + 0.7j} + \frac{1}{4j} + \frac{1}{11.4}} = 0.27 + 1.74j \quad \text{Ом}$$

$$E_{\text{экв1}} = I_{A1} \cdot Z_{\text{экв1}} + U_{A1}$$

Рачетная схема фазы А для обратной последовательности

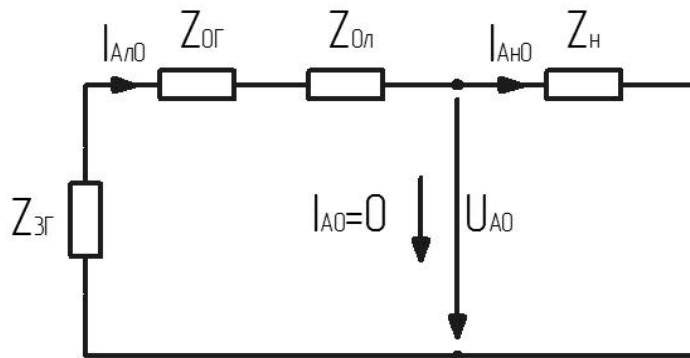


Составим уравнение для обратной последовательности

$$Z_{\text{экв2}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{2Г} + Z_{2Л}} + \frac{1}{Z_{2В}} + \frac{1}{Z_{2Н}}} = \frac{1}{\frac{1}{j + 0.7j} + \frac{1}{2.5j} + \frac{1}{11.4}} = 0.09 + j \quad \text{Ом}$$

$$0 = I_{A2} \cdot Z_{\text{экв2}} + U_{A2}$$

Рачетная схема фазы А для нулевой последовательности



Составим уравнение для нулевой последовательности

$$Z_{\text{эKB0}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{3Г} + Z_{0Г} + Z_{0Л}} + \frac{1}{Z_{Н}}} = \frac{1}{\frac{1}{2j + 0.5j + 1.3j} + \frac{1}{11.4}} = 1.14 + 3.42j \quad \text{Ом}$$

$$0 = I_{A0} \cdot Z_{\text{эKB0}} + U_{A0}$$

$$I_{A0} = 0 \quad \text{поскольку аварийный режим не предусматривает замыкание на землю}$$

$$U_{A0} = -I_{A0} \cdot Z_{\text{эKB0}} = -0 \cdot (1.14 + 3.42j) = 0$$

Составим недостающие 3 уравнения исходя из характера повреждения

$$U_C = U_B$$

$$I_C + I_B = 0$$

$$I_A = 0$$

Составим из полученных уравнений систему и приведем их к симметричным составляющим фазы А

$$I_{A1} \cdot Z_{\text{эKB1}} + U_{A1} = E_{\text{эKB1}}$$

$$I_{A2} \cdot Z_{\text{эKB2}} + U_{A2} = 0$$

$$U_C = U_B \quad a \cdot U_{A1} + a^2 \cdot U_{A2} + U_{A0} = a^2 \cdot U_{A1} + a \cdot U_{A2} + U_{A0}$$

$$I_C + I_B = 0 \quad a \cdot I_{A1} + a^2 \cdot I_{A2} + I_{A0} + a^2 \cdot I_{A1} + a \cdot I_{A2} + I_{A0} = 0$$

Решим систему методом подстановок

$$I_{A1} \cdot Z_{\text{эKB1}} + U_{A1} = E_{\text{эKB1}}$$

$$I_{A2} \cdot Z_{\text{эKB2}} + U_{A2} = 0$$

$$a \cdot U_{A1} + a^2 \cdot U_{A2} = a^2 \cdot U_{A1} + a \cdot U_{A2}$$

$$a \cdot I_{A1} + a^2 \cdot I_{A2} + a^2 \cdot I_{A1} + a \cdot I_{A2} = 0$$

$$U_{A1} = E_{\text{ЭКВ1}} - I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ1}}$$

$$U_{A2} = -I_{A2} \cdot Z_{\text{ЭКВ2}}$$

$$a \cdot (E_{\text{ЭКВ1}} - I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ1}}) + a^2 \cdot (-I_{A2} \cdot Z_{\text{ЭКВ2}}) = a^2 \cdot (E_{\text{ЭКВ1}} - I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ1}}) + a \cdot (-I_{A2} \cdot Z_{\text{ЭКВ2}})$$

$$a \cdot I_{A1} + a^2 \cdot I_{A2} + a^2 \cdot I_{A1} + a \cdot I_{A2} = 0$$

$$(a^2 - a) \cdot I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ1}} + (a - a^2) \cdot I_{A2} \cdot Z_{\text{ЭКВ2}} = (a^2 - a) \cdot E_{\text{ЭКВ1}}$$

$$(a + a^2) \cdot I_{A1} + (a + a^2) \cdot I_{A2} = 0$$

$$I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ1}} - I_{A2} \cdot Z_{\text{ЭКВ2}} = E_{\text{ЭКВ1}}$$

$$I_{A1} + I_{A2} = 0$$

$$I_{A2} = -I_{A1}$$

$$I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ1}} + I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ2}} = E_{\text{ЭКВ1}}$$

$$I_{A1} = \frac{E_{\text{ЭКВ1}}}{Z_{\text{ЭКВ1}} + Z_{\text{ЭКВ2}}} = \frac{216.95 - 33.83j}{0.27 + 1.74j + 0.09 + j} = -1.92 - 79.44j \quad \text{A}$$

$$I_{A2} = -I_{A1} = 1.92 + 79.44j \quad \text{A}$$

$$U_{A1} = E_{\text{ЭКВ1}} - I_{A1} \cdot Z_{\text{ЭКВ1}} = 216.95 - 33.83j - (0.27 + 1.74j) \cdot (-1.92 - 79.44j) = 79.59 - 9j \quad \text{B}$$

$$U_{A2} = -I_{A2} \cdot Z_{\text{ЭКВ2}} = (0.09 + j) \cdot [-(1.92 + 79.44j)] = 79.59 - 9j \quad \text{A}$$

Токи и напряжения на несимметричном участке

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = -1.92 - 79.44j + 1.92 + 79.44j + 0 = 0 \quad \text{A}$$

$$I_B = a^2 \cdot I_{A1} + a \cdot I_{A2} + I_{A0} = (-1.92 - 79.44j) \cdot (-0.5 + 0.87j)^2 + (1.92 + 79.44j) \cdot (-0.5 + 0.87j) + 0 = -137.6 + 3.3 \text{ A}$$

$$I_C = a \cdot I_{A1} + a^2 \cdot I_{A2} + I_{A0} = (-1.92 - 79.44j) \cdot (-0.5 + 0.87j) + (1.92 + 79.44j) \cdot (-0.5 + 0.87j)^2 + 0 = 137.6 - 3.32 \text{ A}$$

$$U_A = U_{A1} + U_{A2} + U_{A0} = 79.59 - 9j + 79.59 - 9j + 0 = 159.18 - 18.01j \quad \text{B}$$

$$U_B = a^2 \cdot U_{A1} + a \cdot U_{A2} + U_{A0} = (79.59 - 9j) \cdot (-0.5 + 0.87j)^2 + (79.59 - 9j) \cdot (-0.5 + 0.87j) + 0 = -79.59 + 9j \quad \text{B}$$

$$U_C = a \cdot U_{A1} + a^2 \cdot U_{A2} + U_{A0} = (79.59 - 9j) \cdot (-0.5 + 0.87j) + (79.59 - 9j) \cdot (-0.5 + 0.87j)^2 + 0 = -79.59 + 9j \quad \text{B}$$

Определим фазные токи генератора

$$I_{Aл1} \cdot (Z_{1г} + Z_{1л}) + U_{A1} = E_{A1}$$

$$I_{Aл1} = \frac{E_A - U_{A1}}{Z_{1г} + Z_{1л}} = \frac{400 - (79.59 - 9j)}{2.5j + 0.7j} = 2.81 - 100.13j \quad \text{A}$$

$$I_{Aл2} = \frac{-U_{A2}}{Z_{2г} + Z_{2л}} = \frac{-(79.59 - 9j)}{j + 0.7j} = 5.3 + 46.82j \quad \text{A}$$

$$I_{Aл0} = \frac{-U_{A0}}{Z_{0г} + Z_{0л}} = \frac{-0}{0.5j + 1.3j} = 0 \quad \text{A}$$

$$I_{Aл} = I_{Aл1} + I_{Aл2} + I_{Aл0} = 2.81 - 100.13j + 5.3 + 46.82j + 0 = 8.11 - 53.31j$$

$$I_{Bл} = a^2 \cdot I_{Aл1} + a \cdot I_{Aл2} + I_{Aл0} = (2.81 - 100.13j) \cdot (-0.5 + 0.87j)^2 + (5.3 + 46.82j) \cdot (-0.5 + 0.87j) + 0 = -131.31 + 28.81j$$

$$I_{Cл} = a \cdot I_{Aл1} + a^2 \cdot I_{Aл2} + I_{Aл0} = (2.81 - 100.13j) \cdot (-0.5 + 0.87j) + (5.3 + 46.82j) \cdot (-0.5 + 0.87j)^2 + 0 = 123.2 + 24.51j$$

Определим линейные напряжения генератора

$$U_{AB} + I_{Aл} \cdot Z_{1г} - I_{Bл} \cdot Z_{1г} = E_A - E_B$$

$$U_{AB} = E_A - E_B - I_{Aл} \cdot Z_{1г} + I_{Bл} \cdot Z_{1г} = 400 - (-200 - 346.41j) - (8.11 - 53.31j) \cdot 2.5j + (-131.31 + 28.81j) \cdot 2.5j =$$

$$U_{AB} = 394.7 - 2.15j \quad \text{B}$$

$$U_{BC} = E_B - E_C - I_{Bл} \cdot Z_{1г} + I_{Cл} \cdot Z_{1г} = -200 - 346.41j - (-200 + 346.41j) - (-131.31 + 28.81j) \cdot 2.5j + (123.2 + 24.51j) \cdot 2.5j =$$

$$U_{BC} = 10.75 - 56.53j \quad \text{B}$$

$$U_{CA} = E_C - E_A - I_{Cл} \cdot Z_{1г} + I_{Aл} \cdot Z_{1г} = -200 + 346.41j - 400 - (123.2 + 24.51j) \cdot 2.5j + (8.11 - 53.31j) \cdot 2.5j = -405.46 + 58.68j$$

$$U_{CA} = -405.46 + 58.68j \quad \text{B}$$

Проверим выполнение первого и второго закона Кирхгофа

$$I_{Aл} + I_{Bл} + I_{Cл} = 8.11 - 53.31j + -131.31 + 28.81j + 123.2 + 24.51j = 0$$

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 394.7 - 2.15j + 10.75 - 56.53j + -405.46 + 58.68j = 0$$

Законы Киргофа выполняются

3. Несинусоидальный режим в симметричной трехфазной цепи

$$e_A = E_{A1} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t) + E_{A3} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(942t + 30\text{deg}) + E_{A5} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(1570t - 60\text{deg})$$

$$E_{A1} = E_A = 400 \quad \text{В}$$

$$E_{A3} = 0.5 \cdot E_{A1} \cdot e^{j \cdot 30\text{deg}} = 173.21 + 100j \quad \text{В}$$

$$E_{A5} = 0.3 \cdot E_{A1} \cdot e^{-j \cdot 60\text{deg}} = 60 - 103.92j \quad \text{В}$$

2.1 Расчет для первой гармоники эквивалентен расчету в первом пункте

$$I_{Aл1} = I_{Aл} = 24.37 - 65.55j \quad \text{А}$$

$$I_{Aл1} = I_{Aл} = -19.5 - 47.56j \quad \text{А}$$

$$I_{AR1} = I_{AR} = 27.18 - 11.14j \quad \text{А}$$

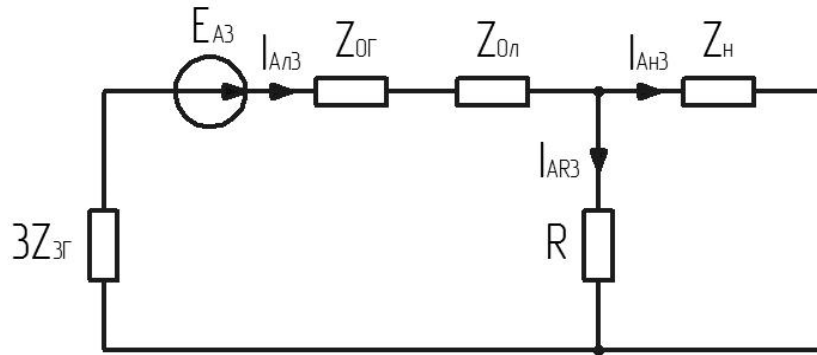
$$I_{Aн1} = I_{Aн} = 16.69 - 6.84j \quad \text{А}$$

$$I_{A1} = I_{Bл} = -68.95 + 11.67j \quad \text{А}$$

$$U_{V1} = U_{BR} - U_{CR} = -162.67 - 125.77j - (-27.59 + 203.76j) = -135.08 - 329.17j \quad \text{В}$$

Третья гармоника соответствует напряжению нулевой последовательности

Эквивалентная схема для третьей гармоники



Рассчитаем токи третьей гармоники

$$Z_{\text{эKB3}} = 3Z_{3Г} + 3Z_{0Г} + 3Z_{0Л} + \frac{Z_{Н} \cdot R}{Z_{Н} + R} = 3 \cdot 2j + 3 \cdot 0.5j + 3 \cdot 1.3j + \frac{11.4 \cdot 7}{11.4 + 7} = 4.34 + 11.4j \quad \text{Ом}$$

$$I_{Aл3} = \frac{E_{A3}}{Z_{\text{эKB3}}} = \frac{173.21 + 100j}{4.34 + 11.4j} = 12.71 - 10.36j \quad \text{А} \quad I_{Aл3} = 16.4 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{А}$$

$$I_{AR3} = I_{Aл3} \cdot \frac{Z_{Н}}{Z_{Н} + R} = (12.71 - 10.36j) \cdot \frac{11.4}{11.4 + 7} = 7.88 - 6.42j \quad \text{А}$$

$$I_{AR3} = 10.16 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{А}$$

$$I_{Aн3} = I_{Aл3} \cdot \frac{R}{Z_H + R} = (12.71 - 10.36j) \cdot \frac{7}{11.4 + 7} = 4.84 - 3.94j \quad \text{A}$$

$$I_{Aн3} = 6.24 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{A}$$

Токи цепи

$$I_{Bл3} = I_{Aл3} = 12.71 - 10.36j \quad \text{A} \quad I_{Bл3} = 16.4 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{A}$$

$$I_{BR3} = I_{AR3} = 7.88 - 6.42j \quad \text{A} \quad I_{BR3} = 10.16 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{A}$$

$$I_{Bн3} = I_{Aн3} = 4.84 - 3.94j \quad \text{A} \quad I_{Bн3} = 6.24 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{A}$$

$$I_{Cл3} = I_{Aл3} = 12.71 - 10.36j \quad \text{A} \quad I_{Cл3} = 16.4 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{A}$$

$$I_{CR3} = I_{AR3} = 7.88 - 6.42j \quad \text{A} \quad I_{CR3} = 10.16 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{A}$$

$$I_{Cн3} = I_{Aн3} = 4.84 - 3.94j \quad \text{A} \quad I_{Cн3} = 6.24 \cdot e^{-j \cdot 39.17} \quad \text{A}$$

Определим составляющие тока в амперметре и напряжения на вольтметре для третьей гармоники

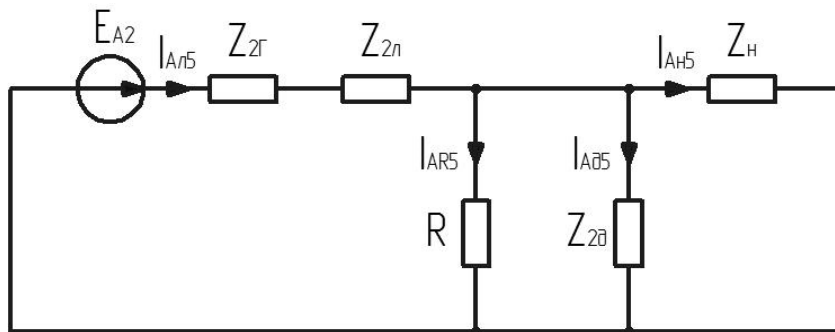
$$U_{BR3} = I_{BR3} \cdot R = (7.88 - 6.42j) \cdot 7 = 55.13 - 44.92j \quad \text{В}$$

$$U_{AR3} = I_{AR3} \cdot R = (7.88 - 6.42j) \cdot 7 = 55.13 - 44.92j \quad \text{В}$$

$$U_{V3} = U_{BR3} - U_{AR3} = 0 \quad \text{В}$$

$$I_{A3} = I_{Bл3} = 12.71 - 10.36j \quad \text{A}$$

Пятая гармоника соответствует обратной последовательности



Рассчитаем токи пятой гармоники

$$Z_{эKB5} = 5Z_{2Г} + 5Z_{2л} + \frac{Z_H \cdot 5Z_{2л} \cdot R}{Z_H \cdot 5Z_{2л} + R \cdot 5Z_{2л} + Z_H \cdot R} = 5 \cdot j + 5 \cdot 0.7j + \frac{11.4 \cdot 5 \cdot 2.5j \cdot 7}{11.4 \cdot 5 \cdot 2.5j + 7 \cdot 5 \cdot 2.5j + 11.4 \cdot 7} = 3.87 + 9.8j \text{ Ом}$$

$$I_{Aл5} = \frac{E_{A5}}{Z_{эKB5}} = \frac{60 - 103.92j}{3.87 + 9.84j} = -7.07 - 8.88j \quad \text{A} \quad I_{Aл5} = 11.35 \cdot e^{-j \cdot 128.53} \quad \text{A}$$

$$I_{Aл5} = I_{Aл5} \cdot \frac{Z_H \cdot R}{Z_H \cdot 5Z_{2д} + R \cdot 5Z_{2д} + Z_H \cdot R} = (-7.07 - 8.88j) \cdot \frac{11.4 \cdot 7}{11.4 \cdot 5 \cdot 2.5j + 7 \cdot 5 \cdot 2.5j + 11.4 \cdot 7} = -3.51 + 1.24j \quad A$$

$$I_{Aл5} = 3.72 \cdot e^{j \cdot 160.6} \quad A$$

$$I_{AR5} = I_{Aл5} \cdot \frac{Z_H \cdot 5Z_{2д}}{Z_H \cdot 5Z_{2д} + R \cdot 5Z_{2д} + Z_H \cdot R} = (-7.07 - 8.88j) \cdot \frac{11.4 \cdot 5 \cdot 2.5j}{11.4 \cdot 5 \cdot 2.5j + 7 \cdot 5 \cdot 2.5j + 11.4 \cdot 7} = -2.21 - 6.26j \quad A$$

$$I_{AR5} = 6.64 \cdot e^{-j \cdot 109.4} \quad A$$

$$I_{AH5} = I_{Aл5} \cdot \frac{5Z_{2д} \cdot R}{Z_H \cdot 5Z_{2д} + R \cdot 5Z_{2д} + Z_H \cdot R} = (-7.07 - 8.88j) \cdot \frac{5 \cdot 2.5j \cdot 7}{11.4 \cdot 5 \cdot 2.5j + 7 \cdot 5 \cdot 2.5j + 11.4 \cdot 7} = -1.35 - 3.85j \quad A$$

$$I_{AH5} = 4.08 \cdot e^{-j \cdot 109.4} \quad A$$

$$I_{Bl5} = I_{Aл5} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = 11.22 - 1.68j \quad A \quad I_{Bl5} = 11.35 \cdot e^{-j \cdot 8.53} \quad A$$

$$I_{BR5} = I_{AR5} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = 6.53 + 1.22j \quad A \quad I_{BR5} = 6.64 \cdot e^{j \cdot 10.6} \quad A$$

$$I_{Bл5} = I_{Aл5} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = 0.68 - 3.66j \quad A \quad I_{Bл5} = 3.72 \cdot e^{-j \cdot 79.4} \quad A$$

$$I_{BH5} = I_{AH5} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} = 4.01 + 0.75j \quad A \quad I_{BH5} = 4.08 \cdot e^{j \cdot 10.6} \quad A$$

$$I_{Cl5} = I_{Aл5} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -4.15 + 10.56j \quad A \quad I_{Cl5} = 11.35 \cdot e^{j \cdot 111.47} \quad A$$

$$I_{CR5} = I_{AR5} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -4.32 + 5.04j \quad A \quad I_{CR5} = 6.64 \cdot e^{j \cdot 130.6} \quad A$$

$$I_{Cл5} = I_{Aл5} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = 2.82 + 2.42j \quad A \quad I_{Cл5} = 3.72 \cdot e^{j \cdot 40.6} \quad A$$

$$I_{CH5} = I_{AH5} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} = -2.65 + 3.1j \quad A \quad I_{CH5} = 4.08 \cdot e^{j \cdot 130.6} \quad A$$

Определим составляющие тока в амперметре и напряжения на вольтметре для третьей гармоники

$$U_{BR5} = I_{BR5} \cdot R = (6.53 + 1.22j) \cdot 7 = 45.69 + 8.55j \quad \text{В}$$

$$U_{AR5} = I_{AR5} \cdot R = (-2.21 - 6.26j) \cdot 7 = -15.44 - 43.85j \quad \text{В}$$

$$U_{V5} = U_{BR5} - U_{AR5} = 61.13 + 52.4j \quad \text{В}$$

$$I_{A5} = I_{Bл5} = 11.22 - 1.68j \quad \text{А}$$

2.2 Вычислим показания вольтметра и амперметра

$$I_A = \sqrt{(|I_{A1}|)^2 + (|I_{A3}|)^2 + (|I_{A5}|)^2} = \sqrt{(|-68.95 + 11.67j|)^2 + (|12.71 - 10.36j|)^2 + (|11.22 - 1.68j|)^2} = 72.72$$

$$U_V = \sqrt{(|U_{V1}|)^2 + (|U_{V3}|)^2 + (|U_{V5}|)^2} = \sqrt{(|-135.08 - 329.53j|)^2 + (|0|)^2 + (|61.13 + 52.4j|)^2} = 365.13 \quad \text{В}$$

2.3 Запишем мгновенные значения гармоник и результирующее значения тока амперметра

$$i_{A1}(t) = |I_{A1}| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + \arg(I_{A1})) = 69.93 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t + 2.97) \quad \text{А}$$

$$i_{A3}(t) = |I_{A3}| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(942t + \arg(I_{A3})) = 16.4 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(942 \cdot t - 0.68) \quad \text{А}$$

$$i_{A5}(t) = |I_{A5}| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(1570t + \arg(I_{A5})) = 11.35 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(1.57 \times 10^3 \cdot t - 0.15) \quad \text{А}$$

$$i_A(t) = i_{A1}(t) + i_{A3}(t) + i_{A5}(t) = 16.4 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(942 \cdot t - 0.68) + 69.93 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t + 2.97) + 11.35 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(1.57 \times 10^3 \cdot t - 0.15)$$

