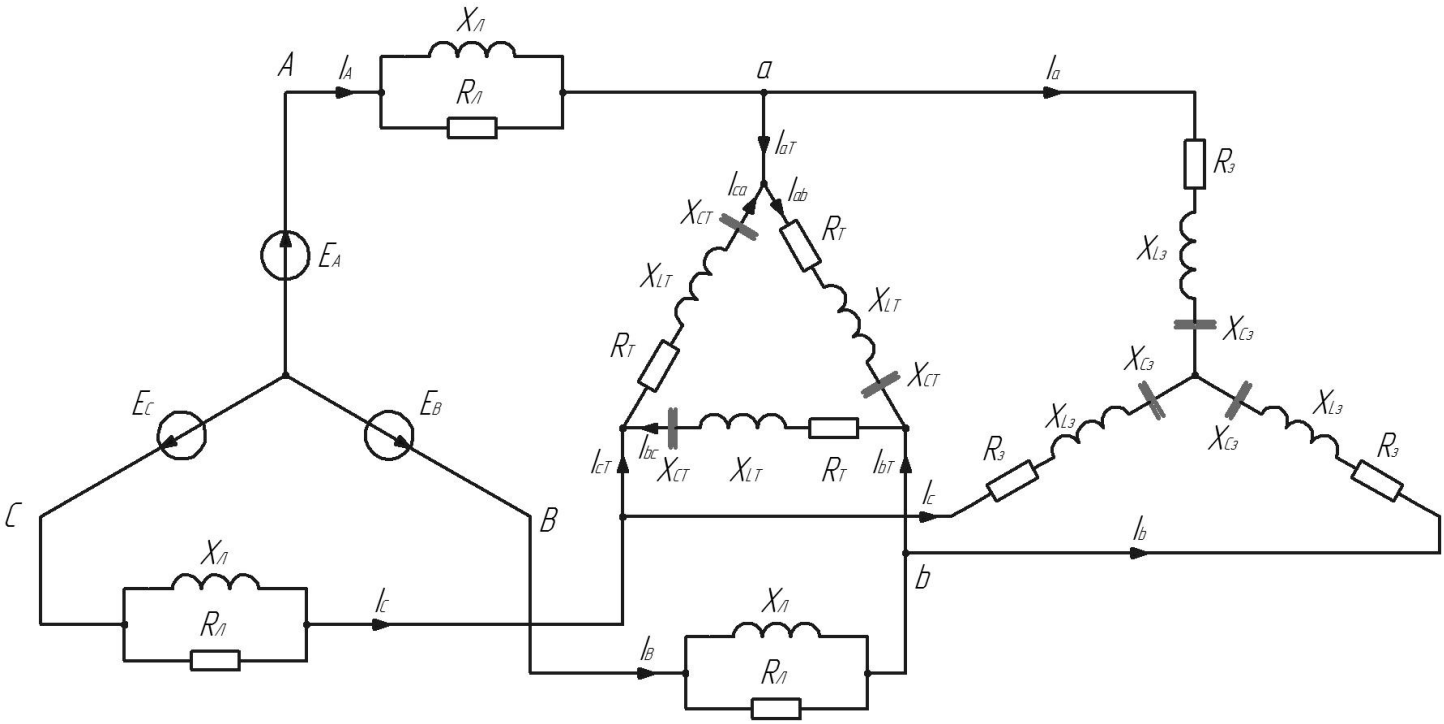


$E = 500$	В
$R_Л = 19$	Ом
$X_{LЛ} = 47j$	Ом
$R_З = 38$	Ом
$X_{CЗ} = -j \cdot 70$	Ом
$X_{LЗ} = j \cdot 41$	Ом
$R_Т = 21$	Ом
$X_{CТ} = -j \cdot 55$	Ом
$X_{LТ} = j \cdot 76$	Ом

Рассчет симметричного режима работы трехфазной цепи

Фазные и линейные напряжения генератора

$U_A = E = 500$ В

$U_B = U_A \cdot e^{-j \cdot 120deg} = -250 - 433.013j$ В

$U_C = U_A \cdot e^{j \cdot 120deg} = -250 + 433.013j$ В

$U_{AB} = \sqrt{3} \cdot U_A \cdot e^{j \cdot 30deg} = 750 + 433.013j$ В

$U_{BC} = U_{AB} \cdot e^{-j \cdot 120deg} = -866.025j$ В

$U_{CA} = U_{AB} \cdot e^{j \cdot 120deg} = -750 + 433.013j$ В

Сопротивления схемы замещения

$Z_Л = \frac{R_Л \cdot X_{LЛ}}{R_Л + X_{LЛ}} = \frac{19 \cdot 47j}{19 + 47j} = 16.331 + 6.602j$ Ом $\quad Z_Л = 17.615 \cdot e^{j \cdot 22.011deg}$ Ом

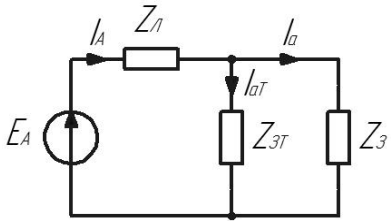
$Z_З = R_З + X_{LЗ} + X_{CЗ} = 38 + j \cdot 41 + (-j) \cdot 70 = 38 - 29j$ Ом $\quad Z_З = 47.802 \cdot e^{-j \cdot 37.349deg}$ Ом

$Z_Т = R_Т + X_{LТ} + X_{CТ} = 21 + j \cdot 76 + (-j) \cdot 55 = 21 + 21j$ Ом $\quad Z_Т = 29.698 \cdot e^{j \cdot 45deg}$ Ом

Преобразуем треугольник в эквивалентную звезду

$$Z_{тз} = \frac{Z_т}{3} = 7 + 7j \quad \text{Ом}$$

Рассчетная схема для фазы А



Рассчитаем токи фазы А

$$I_A = \frac{U_A}{Z_л + \frac{Z_{тз}\cdot Z_з}{Z_{тз} + Z_з}} = \frac{500}{16.331 + 6.602j + \frac{(38 - 29j)\cdot(7 + 7j)}{7 + 7j + 38 - 29j}} = 16.672 - 8.163j \quad \text{A}$$

$$|I_A| = 18.564 \quad \text{A} \qquad \angle(I_A) = -26.088$$

$$I_a = I_A\cdot\frac{Z_{тз}}{Z_{тз} + Z_з} = (16.672 - 8.163j)\cdot\frac{7 + 7j}{7 + 7j + 38 - 29j} = 2.596 + 2.593j \quad \text{A}$$

$$|I_a| = 3.669 \quad \text{A} \qquad \angle(I_a) = 44.966$$

$$I_{aT} = I_A - I_a = 16.672 - 8.163j - (2.596 + 2.593j) = 14.077 - 10.756j \quad \text{A}$$

$$|I_{aT}| = 17.716 \quad \text{A} \qquad \angle(I_{aT}) = -37.383$$

Падение напряжения в линейном проводе

$$\Delta U_{Ал} = I_A\cdot Z_л = (16.331 + 6.602j)\cdot(16.672 - 8.163j) = 326.172 - 23.245j \quad \text{B}$$

$$|\Delta U_{Ал}| = 326.999 \quad \text{B} \qquad \angle(\Delta U_{Ал}) = -4.076$$

Фазное напряжение схемы звезда

$$U_a = I_a\cdot Z_з = (38 - 29j)\cdot(2.596 + 2.593j) = 173.828 + 23.245j \quad \text{A}$$

$$|U_a| = 175.375 \quad \text{B} \qquad \angle(U_a) = 7.617$$

Токи фаз В и С

$I_B = I_A\cdot e^{-j\cdot 120deg} = -15.406 - 10.357j$	A	$\lvert I_B\rvert = 18.564$	A	$\angle(I_B) = -146.088$
$I_b = I_a\cdot e^{-j\cdot 120deg} = 0.947 - 3.544j$	A	$\lvert I_b\rvert = 3.669$	A	$\angle(I_b) = -75.034$
$I_{bT} = I_{aT}\cdot e^{-j\cdot 120deg} = -16.353 - 6.813j$	A	$\lvert I_{bT}\rvert = 17.716$	A	$\angle(I_{bT}) = -157.383$
$I_C = I_A\cdot e^{j\cdot 120deg} = -1.267 + 18.52j$	A	$\lvert I_C\rvert = 18.564$	A	$\angle(I_C) = 93.912$
$I_c = I_a\cdot e^{j\cdot 120deg} = -3.543 + 0.952j$	A	$\lvert I_c\rvert = 3.669$	A	$\angle(I_c) = 164.966$
$I_{cT} = I_{aT}\cdot e^{j\cdot 120deg} = 2.277 + 17.569j$	A	$\lvert I_{cT}\rvert = 17.716$	A	$\angle(I_{cT}) = 82.617$

Напряжения фаз В и С

$\Delta U_{Вл} = \Delta U_{Ал}\cdot e^{-j\cdot 120deg} = -183.217 - 270.851j$	B	$\lvert\Delta U_{Вл}\rvert = 326.999$	B	$\angle(\Delta U_{Вл}) = -124.076$
$\Delta U_{Сл} = \Delta U_{Ал}\cdot e^{j\cdot 120deg} = -142.956 + 294.096j$	B	$\lvert\Delta U_{Сл}\rvert = 326.999$	B	$\angle(\Delta U_{Сл}) = 115.924$
$U_b = U_a\cdot e^{-j\cdot 120deg} = -66.783 - 162.162j$	B	$\lvert U_b\rvert = 175.375$	B	$\angle(U_b) = -112.383$
$U_c = U_a\cdot e^{j\cdot 120deg} = -107.044 + 138.917j$	B	$\lvert U_c\rvert = 175.375$	B	$\angle(U_c) = 127.617$

Токи и напряжения схемы треугольник

$U_{ab} = U_a - U_b = 173.828 + 23.245j - (-66.783 - 162.162j) = 240.611 + 185.406j$ В

$|U_{ab}| = 303.759$ В $\quad \angle(U_{ab}) = 37.617$

$U_{bc} = U_b - U_c = -66.783 - 162.162j - (-107.044 + 138.917j) = 40.261 - 301.079j$ В

$|U_{bc}| = 303.759$ В $\quad \angle(U_{bc}) = -82.383$

$U_{ca} = U_c - U_a = -107.044 + 138.917j - (173.828 + 23.245j) = -280.872 + 115.672j$ В

$|U_{ca}| = 303.759$ В $\quad \angle(U_{ca}) = 157.617$

$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_т} = \frac{240.611 + 185.406j}{21 + 21j} = 10.143 - 1.314j$ А $\quad |I_{ab}| = 10.228$ А $\quad \angle(I_{ab}) = -7.383$

$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_т} = \frac{40.261 - 301.079j}{21 + 21j} = -6.21 - 8.127j$ А $\quad |I_{bc}| = 10.228$ А $\quad \angle(I_{bc}) = -127.383$

$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_т} = \frac{-280.872 + 115.672j}{21 + 21j} = -3.933 + 9.442j$ А $\quad |I_{ca}| = 10.228$ А $\quad \angle(I_{ca}) = 112.617$

Проверим выполнение баланса мощностей

Мощность источников

$S_{иA} = \overline{I_A} \cdot U_A = \overline{16.672 - 8.163j} \cdot 500 = 8.336 \times 10^3 + 4.082j \times 10^3$ ВА

$S_{иB} = \overline{I_B} \cdot U_B = (-250 - 433.013j) \cdot \overline{-15.406 - 10.357j} = 8.336 \times 10^3 + 4.082j \times 10^3$ ВА

$S_{иC} = \overline{I_C} \cdot U_C = (-250 + 433.013j) \cdot \overline{-1.267 + 18.52j} = 8.336 \times 10^3 + 4.082j \times 10^3$ ВА

$S_и = S_{иA} + S_{иB} + S_{иC} = 2.501 \times 10^4 + 1.224j \times 10^4$ ВА

Мощность приемников

$S_{лA} = \overline{I_A} \cdot \Delta U_{Aл} = (326.172 - 23.245j) \cdot \overline{16.672 - 8.163j} = 5.628 \times 10^3 + 2.275j \times 10^3$ ВА

$S_{лB} = \overline{I_B} \cdot \Delta U_{Bл} = (-183.217 - 270.851j) \cdot \overline{-15.406 - 10.357j} = 5.628 \times 10^3 + 2.275j \times 10^3$ ВА

$S_{лC} = \overline{I_C} \cdot \Delta U_{Cл} = (-142.956 + 294.096j) \cdot \overline{-1.267 + 18.52j} = 5.628 \times 10^3 + 2.275j \times 10^3$ ВА

$S_a = \overline{I_a} \cdot U_a = (173.828 + 23.245j) \cdot \overline{2.596 + 2.593j} = 511.485 - 390.344j$ ВА

$S_b = \overline{I_b} \cdot U_b = (-66.783 - 162.162j) \cdot \overline{0.947 - 3.544j} = 511.485 - 390.344j$ ВА

$S_c = \overline{I_c} \cdot U_c = (-107.044 + 138.917j) \cdot \overline{-3.543 + 0.952j} = 511.485 - 390.344j$ ВА

$S_{ab} = \overline{I_{ab}} \cdot U_{ab} = (240.611 + 185.406j) \cdot \overline{10.143 - 1.314j} = 2.197 \times 10^3 + 2.197j \times 10^3$ ВА

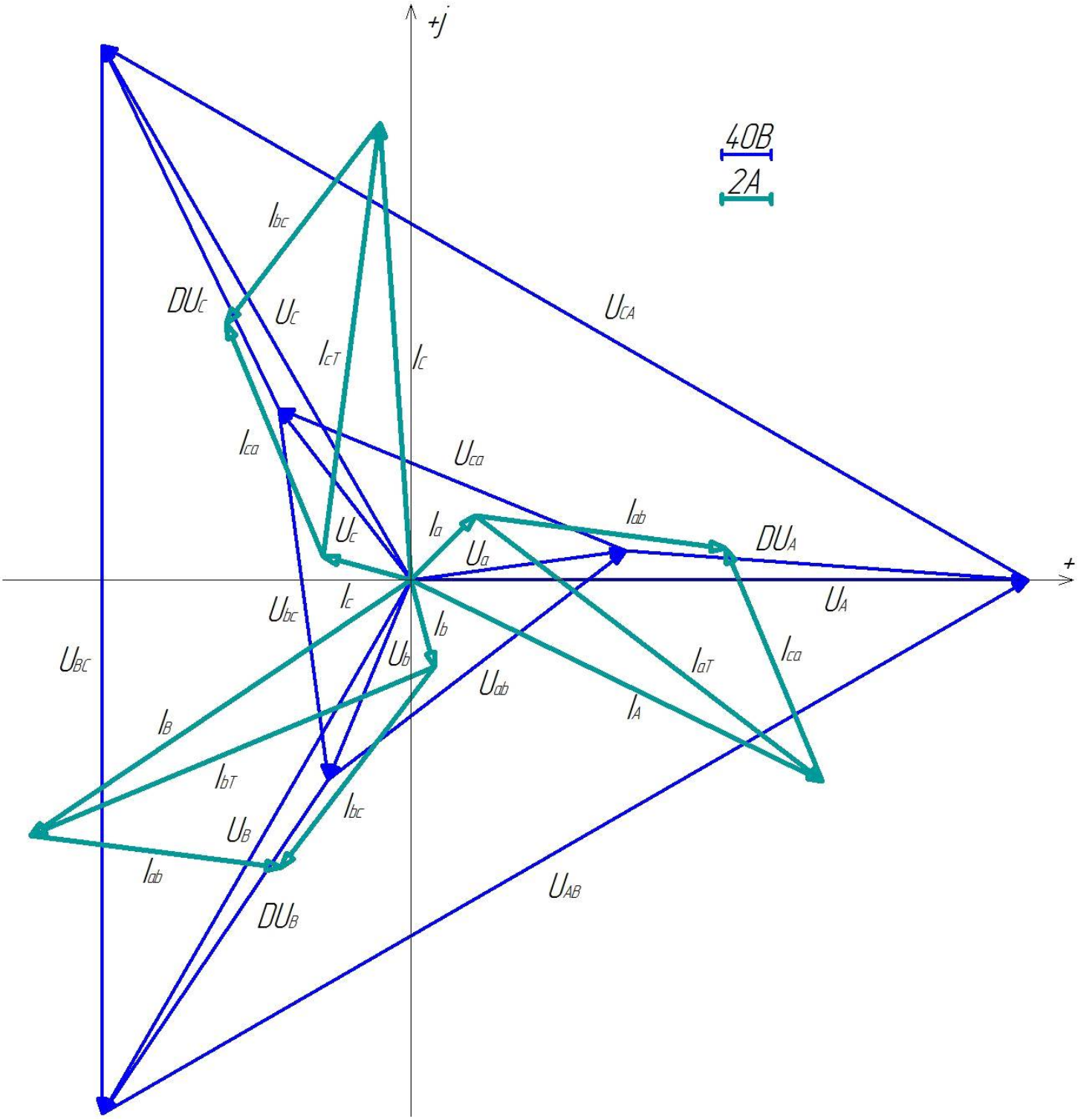
$S_{bc} = \overline{I_{bc}} \cdot U_{bc} = (40.261 - 301.079j) \cdot \overline{-6.21 - 8.127j} = 2.197 \times 10^3 + 2.197j \times 10^3$ ВА

$S_{ca} = \overline{I_{ca}} \cdot U_{ca} = (-280.872 + 115.672j) \cdot \overline{-3.933 + 9.442j} = 2.197 \times 10^3 + 2.197j \times 10^3$ ВА

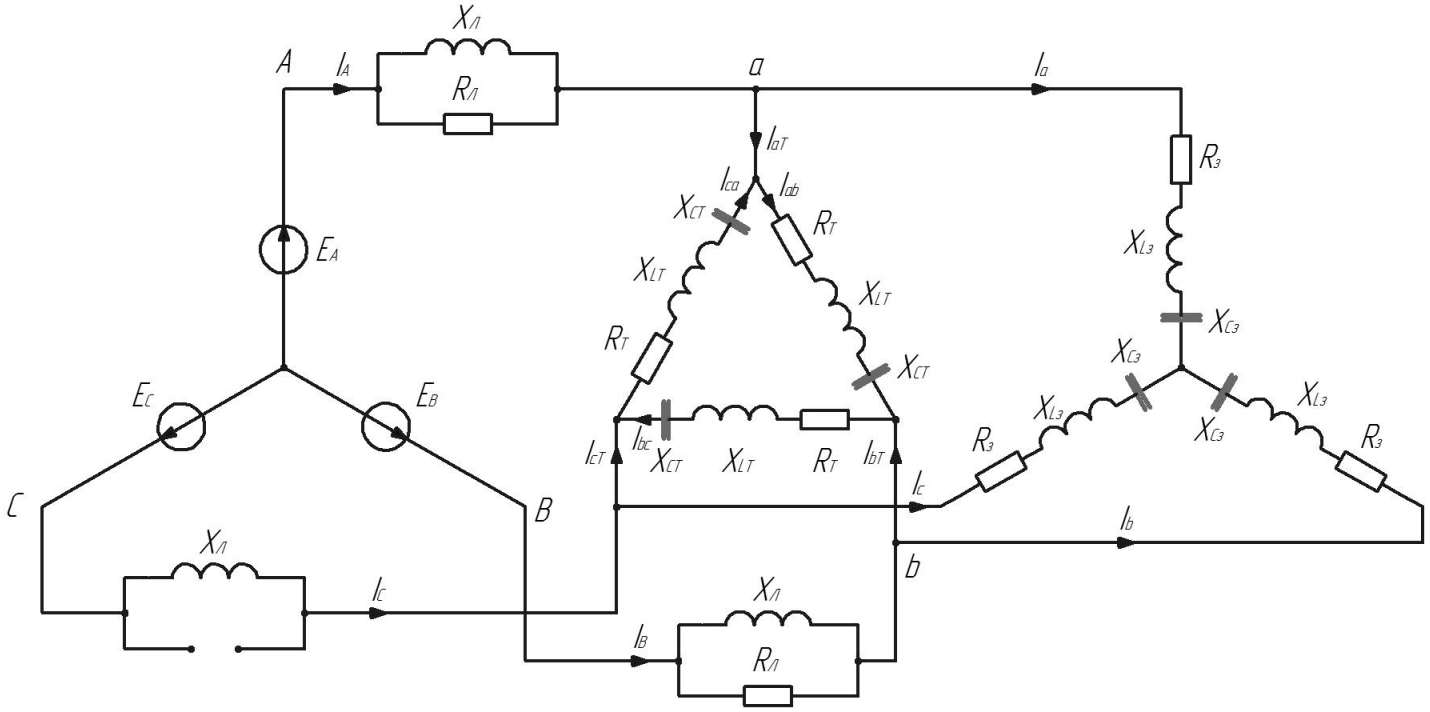
$S_п = S_{лA} + S_{лB} + S_{лC} + S_a + S_b + S_c + S_{ab} + S_{bc} + S_{ca} = 2.501 \times 10^4 + 1.224j \times 10^4$ ВА

Баланс сошелся

Построим совмещенную векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений



Рассчет симметричного режима работы трехфазной цепи



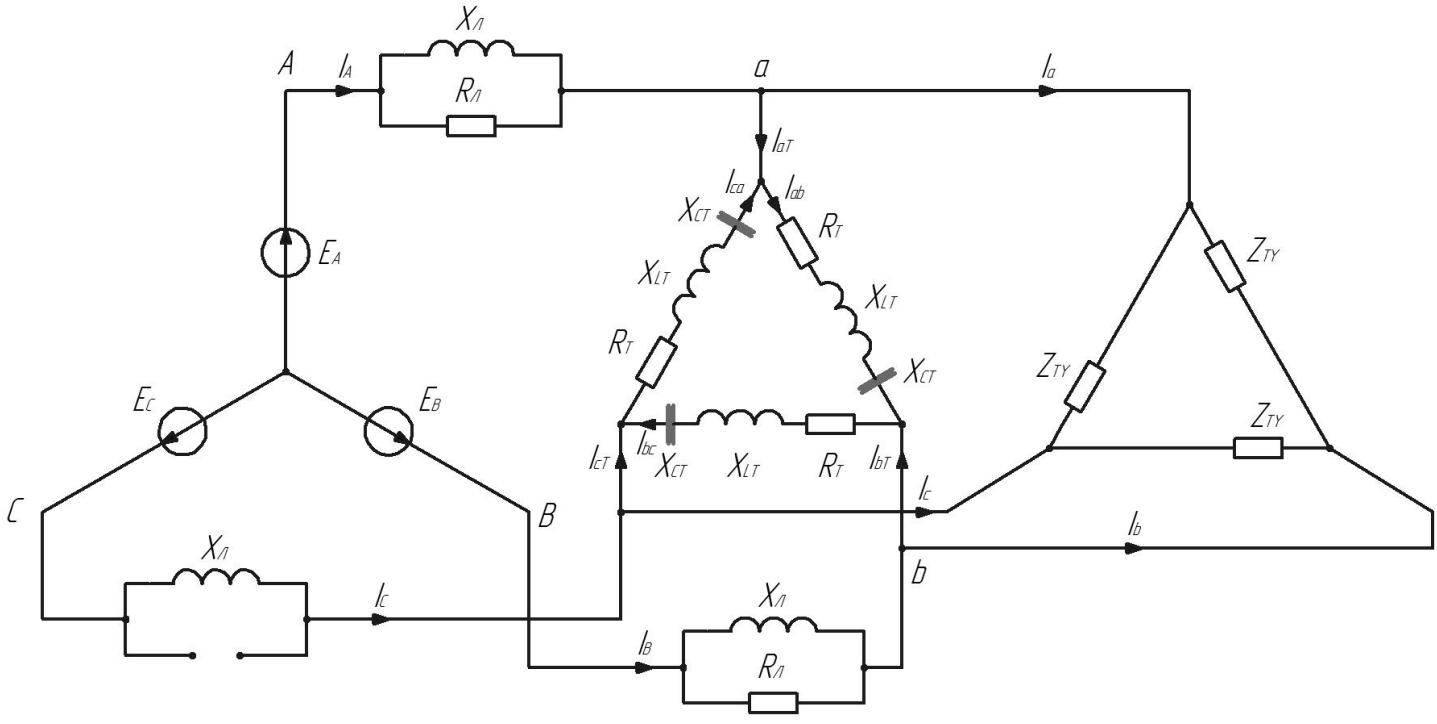
Полные сопротивления линейных проводов

$$Z_{лA} = \frac{R_л \cdot X_{Lл}}{R_л + X_{Lл}} = \frac{19 \cdot 47j}{19 + 47j} = 16.331 + 6.602j \quad \text{Ом}$$

$$Z_{лB} = \frac{R_л \cdot X_{Lл}}{R_л + X_{Lл}} = \frac{19 \cdot 47j}{19 + 47j} = 16.331 + 6.602j \quad \text{Ом}$$

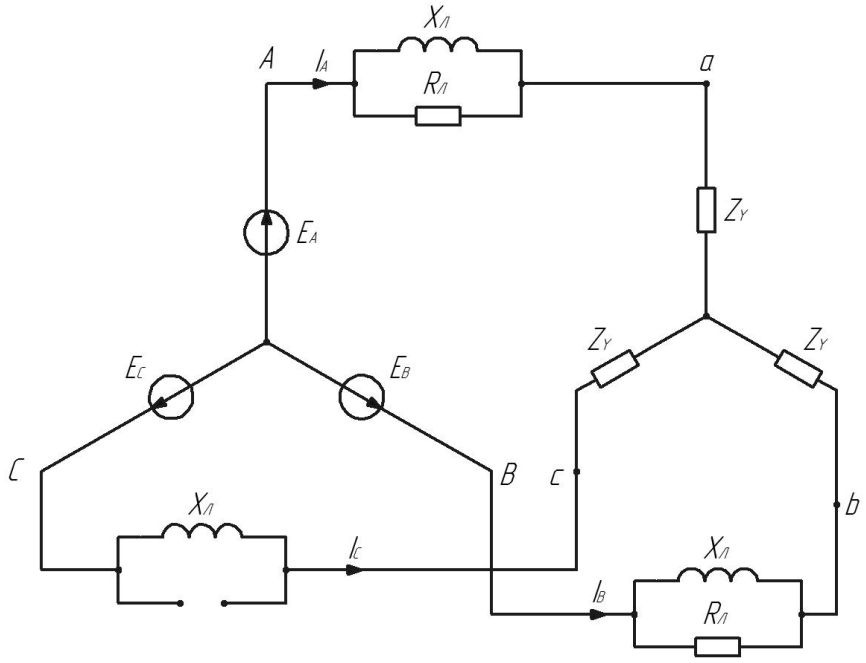
$$Z_{лC} = X_{Lл} = 47j \quad \text{Ом}$$

Преобразуем звезду в эквивалентный треугольник



$$Z_{TY} = Z_з + Z_з + \frac{Z_з \cdot Z_з}{Z_з} = 114 - 87j \quad \text{Ом}$$

Преобразуем параллельные ветви и преобразуем треугольник в эквивалентную звезду



$$Z_Y = \frac{1}{3}\cdot\frac{Z_{TY}\cdot Z_т}{Z_{TY} + Z_т} = \frac{1}{3}\cdot\frac{(21 + 21j)\cdot(114 - 87j)}{114 - 87j + 21 + 21j} = 7.859 + 5.242j \quad \text{Ом}$$

Напряжение смещения нейтрали преобразованной схемы

$$U_0 = \frac{\frac{U_A}{Z_{лA} + Z_Y} + \frac{U_B}{Z_{лB} + Z_Y} + \frac{U_C}{Z_{лC} + Z_Y}}{\frac{1}{Z_{лA} + Z_Y} + \frac{1}{Z_{лB} + Z_Y} + \frac{1}{Z_{лC} + Z_Y}}$$

$$U_0 = \frac{\frac{500}{16.331 + 6.602j + 7.859 + 5.242j} + \frac{-250 - 433.013j}{16.331 + 6.602j + 7.859 + 5.242j} + \frac{-250 + 433.013j}{47j + 7.859 + 5.242j}}{\frac{1}{16.331 + 6.602j + 7.859 + 5.242j} + \frac{1}{16.331 + 6.602j + 7.859 + 5.242j} + \frac{1}{47j + 7.859 + 5.242j}} = 167.448 - 57.831j \text{ В}$$

$|U_0| = 177.153$ В $\quad \angle(U_0) = -19.053$

Токи линейных проводов

$$I_A = \frac{U_A - U_0}{Z_{лA} + Z_Y} = \frac{500 - (167.448 - 57.831j)}{16.331 + 6.602j + 7.859 + 5.242j} = 12.033 - 3.501j \text{ А} \quad |I_A| = 12.532 \text{ А} \quad \angle(I_A) = -16.223$$

$$I_B = \frac{U_B - U_0}{Z_{лB} + Z_Y} = \frac{-250 - 433.013j - (167.448 - 57.831j)}{16.331 + 6.602j + 7.859 + 5.242j} = -20.045 - 5.695j \text{ А} \quad |I_B| = 20.838 \text{ А} \quad \angle(I_B) = -164.14$$

$$I_C = \frac{U_C - U_0}{Z_{лC} + Z_Y} = \frac{-250 + 433.013j - (167.448 - 57.831j)}{47j + 7.859 + 5.242j} = 8.012 + 9.196j \text{ А} \quad |I_C| = 12.197 \text{ А} \quad \angle(I_C) = 48.936$$

Падение напряжения в линейных проводах

$$\Delta U_{Aл} = I_A\cdot Z_{лA} = (16.331 + 6.602j)\cdot(12.033 - 3.501j) = 219.627 + 22.265j \text{ В}$$

$|\Delta U_{Aл}| = 220.753$ В $\quad \angle(\Delta U_{Aл}) = 5.789$

$$\Delta U_{Bл} = I_B\cdot Z_{лB} = (16.331 + 6.602j)\cdot(-20.045 - 5.695j) = -289.762 - 225.341j \text{ В}$$

$|\Delta U_{Bл}| = 367.07$ В $\quad \angle(\Delta U_{Bл}) = -142.129$

$$\Delta U_{Cл} = I_C\cdot Z_{лC} = (8.012 + 9.196j)\cdot 47j = -432.209 + 376.568j \text{ В}$$

$|\Delta U_{Cл}| = 573.244$ В $\quad \angle(\Delta U_{Cл}) = 138.936$

Напряжения схемы треугольник

$U_{ab} = (I_A - I_B)\cdot Z_Y = (7.859 + 5.242j)\cdot[12.033 - 3.501j - (-20.045 - 5.695j)] = 240.611 + 185.406j$ B

$|U_{ab}| = 303.759$ B $\angle(U_{ab}) = 37.617$

$U_{bc} = (I_B - I_C)\cdot Z_Y = (7.859 + 5.242j)\cdot[-20.045 - 5.695j - (8.012 + 9.196j)] = -142.447 - 264.117j$ B

$|U_{bc}| = 300.082$ B $\angle(U_{bc}) = -118.34$

$U_{ca} = (I_C - I_A)\cdot Z_Y = (7.859 + 5.242j)\cdot[8.012 + 9.196j - (12.033 - 3.501j)] = -98.164 + 78.71j$ B

$|U_{ca}| = 125.823$ B $\angle(U_{ca}) = 141.276$

Токи схемы треугольник

$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_т} = \frac{240.611 + 185.406j}{21 + 21j} = 10.143 - 1.314j$ A $|I_{ab}| = 10.228$ A $\angle(I_{ab}) = -7.383$

$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_т} = \frac{-142.447 - 264.117j}{21 + 21j} = -9.68 - 2.897j$ A $|I_{bc}| = 10.104$ A $\angle(I_{bc}) = -163.34$

$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_т} = \frac{-98.164 + 78.71j}{21 + 21j} = -0.463 + 4.211j$ A $|I_{ca}| = 4.237$ A $\angle(I_{ca}) = 96.276$

$I_{aT} = I_{ab} - I_{ca} = 10.143 - 1.314j - (-0.463 + 4.211j) = 10.606 - 5.526j$ A

$|I_{aT}| = 11.96$ A $\angle(I_{aT}) = -27.518$

$I_{bT} = I_{bc} - I_{ab} = -9.68 - 2.897j - (10.143 - 1.314j) = -19.823 - 1.582j$ A

$|I_{bT}| = 19.886$ A $\angle(I_{bT}) = -175.436$

$I_{cT} = I_{ca} - I_{bc} = -0.463 + 4.211j - (-9.68 - 2.897j) = 9.217 + 7.108j$ A

$|I_{cT}| = 11.639$ A $\angle(I_{cT}) = 37.64$

Токи и напряжения схемы звезда

$I_a = I_A - I_{aT} = 12.033 - 3.501j - (10.606 - 5.526j) = 1.427 + 2.025j$ A

$|I_a| = 2.477$ A $\angle(I_a) = 54.831$

$I_b = I_B - I_{bT} = -20.045 - 5.695j - (-19.823 - 1.582j) = -0.222 - 4.112j$ A

$|I_b| = 4.118$ A $\angle(I_b) = -93.086$

$I_c = I_C - I_{cT} = 8.012 + 9.196j - (9.217 + 7.108j) = -1.205 + 2.088j$ A

$|I_c| = 2.41$ A $\angle(I_c) = 119.989$

$U_a = I_a\cdot Z_з = (38 - 29j)\cdot(1.427 + 2.025j) = 112.925 + 35.565j$ B

$|U_a| = 118.393$ B $\angle(U_a) = 17.482$

$U_b = I_b\cdot Z_з = (38 - 29j)\cdot(-0.222 - 4.112j) = -127.686 - 149.841j$ B

$|U_b| = 196.866$ B $\angle(U_b) = -130.436$

$U_c = I_c\cdot Z_з = (38 - 29j)\cdot(-1.205 + 2.088j) = 14.761 + 114.276j$ B

$|U_c| = 115.225$ B $\angle(U_c) = 82.64$

Проверим выполнение баланса мощностей

Мощность источников

$S_{иA} = \overline{I_A} \cdot U_A = \overline{12.033 - 3.501j} \cdot 500 = 6.017 \times 10^3 + 1.751j \times 10^3$ ВА

$S_{иB} = \overline{I_B} \cdot U_B = (-250 - 433.013j) \cdot \overline{-20.045 - 5.695j} = 7.477 \times 10^3 + 7.256j \times 10^3$ ВА

$S_{иC} = \overline{I_C} \cdot U_C = (-250 + 433.013j) \cdot \overline{8.012 + 9.196j} = 1.979 \times 10^3 + 5.768j \times 10^3$ ВА

$S_и = S_{иA} + S_{иB} + S_{иC} = 1.547 \times 10^4 + 1.477j \times 10^4$ ВА

Мощность приемников

$S_{лA} = \overline{I_A} \cdot \Delta U_{Aл} = (219.627 + 22.265j) \cdot \overline{12.033 - 3.501j} = 2.565 \times 10^3 + 1.037j \times 10^3$ ВА

$S_{лB} = \overline{I_B} \cdot \Delta U_{Bл} = (-289.762 - 225.341j) \cdot \overline{-20.045 - 5.695j} = 7.092 \times 10^3 + 2.867j \times 10^3$ ВА

$S_{лC} = \overline{I_C} \cdot \Delta U_{Cл} = (-432.209 + 376.568j) \cdot \overline{8.012 + 9.196j} = 6.992j \times 10^3$ ВА

$S_a = \overline{I_a} \cdot U_a = (112.925 + 35.565j) \cdot \overline{1.427 + 2.025j} = 233.105 - 177.896j$ ВА

$S_b = \overline{I_b} \cdot U_b = (-127.686 - 149.841j) \cdot \overline{-0.222 - 4.112j} = 644.522 - 491.872j$ ВА

$S_c = \overline{I_c} \cdot U_c = (14.761 + 114.276j) \cdot \overline{-1.205 + 2.088j} = 220.796 - 168.502j$ ВА

$S_{ab} = \overline{I_{ab}} \cdot U_{ab} = (240.611 + 185.406j) \cdot \overline{10.143 - 1.314j} = 2.197 \times 10^3 + 2.197j \times 10^3$ ВА

$S_{bc} = \overline{I_{bc}} \cdot U_{bc} = (-142.447 - 264.117j) \cdot \overline{-9.68 - 2.897j} = 2.144 \times 10^3 + 2.144j \times 10^3$ ВА

$S_{ca} = \overline{I_{ca}} \cdot U_{ca} = (-98.164 + 78.71j) \cdot \overline{-0.463 + 4.211j} = 376.939 + 376.939j$ ВА

$S_п = S_{лA} + S_{лB} + S_{лC} + S_a + S_b + S_c + S_{ab} + S_{bc} + S_{ca} = 1.547 \times 10^4 + 1.477j \times 10^4$ ВА

Баланс сошелся

Построим совмещенную векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений