

Міністерство освіти України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”
Кафедра ТОЕ

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 220

Виконав: _____

Перевірив: _____

Умова завдання

В електричному колі діє джерело синусоїдної ЄРС:

Необхідно:

1. ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА БЕЗ ВЗАЄМНОЇ ІНДУКЦІЇ:

- 1.1. Розрахувати струми віток символічним методом скласти баланс активних і реактивних потужностей кола;
- 1.2. Побудувати діаграму струмів і топографічну діаграму напруг, показати кут зсуву фаз;
- 1.3. Приймаючи активний опір R_2 за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів;
- 1.4. Розрахувати струму для резонансного стану кола;
- 1.5. Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей;
- 1.6. Розрахувати (знайти нулі і полюси) і побудувати частотну характеристику вхідного опору частини кола, розміщеної справа від перерізу А-А. Для одержання реактивного двополюсника активні опори закортити.

2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L_1 ТА L_2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

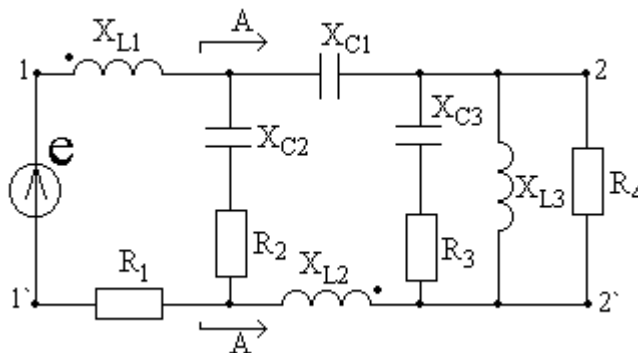
- 2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів;
- 2.2. Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;
- 2.3. Побудувати сумісну векторну діаграму струмів і топографічну діаграму напруг (на діаграмі показати напруги взаємної індукції).

3. ВІДКИНУВШИ ВІТКУ МІЖ ЗАТИСКАЧАМИ 2-2", ВИКОНАТИ ЕКВІВАЛЕНТУВАННЯ ВЗАЄМОІНДУКТИВНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ВІТОК. ОДЕРЖАНУ СХЕМУ РОЗГЛЯДАТИ ЯК ЧОТИРИПОЛЮСНИК З ЗАТИСКАЧАМИ 1-1" ТА 2-2" :

- 3.1. Розрахувати коефіцієнти А, В, С, D чотиріполюсника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 120 & \psi &:= -30 & R_1 &:= 7 & R_2 &:= 9 & R_3 &:= 11 & R_4 &:= 13 \\ X_{L1} &:= 35 & X_{L2} &:= 40 & X_{L3} &:= 45 & X_{C1} &:= 15 & X_{C2} &:= 20 & X_{C3} &:= 25 \\ X_M &:= 23 & f &:= 60 & \omega &:= 2 \cdot \pi \cdot f & \omega &= 376.991 \end{aligned}$$

$$U := E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} \quad U = 103.923 - 60i \quad F(U) = (120 \quad -30)$$



Символічний метод

$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - X_{C2} \cdot i$$

$$Z_3 := X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i$$

$$Z_4 := R_3 - X_{C3} \cdot i$$

$$Z_5 := X_{L3} \cdot i$$

$$Z_6 := R_4$$

$$Z_1 = 7 + 35i$$

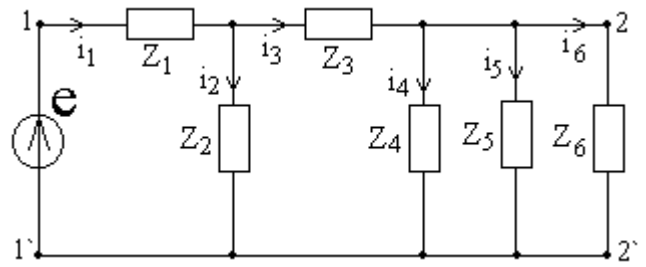
$$Z_2 = 9 - 20i$$

$$Z_3 = 25i$$

$$Z_4 = 11 - 25i$$

$$Z_5 = 45i$$

$$Z_6 = 13$$



$$Z_{3456} := \frac{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_5}{Z_6 + Z_5} \right) \cdot Z_4}{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_5}{Z_6 + Z_5} \right) + Z_4} + Z_3 \quad Z_{3456} = 10.746 + 23.677i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_{3456}}{Z_2 + Z_{3456}} + Z_1 \quad Z_E = 34.895 + 29.714i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 0.878 - 2.467i \quad F(I_1) = (2.618 \quad -70.415)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{3456}}{Z_{3456} + Z_2} \quad I_2 = 3.268 - 0.899i \quad F(I_2) = (3.389 \quad -15.374)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -2.39 - 1.568i \quad F(I_3) = (2.859 \quad -146.735)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \right)}{Z_4 + \left(\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \right)} \quad I_4 = 0.049 - 1.132i \quad F(I_4) = (1.133 \quad -87.505)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{\left(\frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} \right)}{Z_5 + \left(\frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} \right)} \quad I_5 = -0.304 + 0.617i \quad F(I_5) = (0.688 \quad 116.244)$$

$$I_6 := I_3 - I_4 - I_5 \quad I_6 = -2.136 - 1.053i \quad F(I_6) = (2.381 \quad -153.756)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_4 - I_5 - I_6 = 0$$

$$I_2 + I_4 + I_5 + I_6 - I_1 = 0$$

Баланс потужностей електричного кола :

$$S_r := U \cdot I_1 \quad S_r = 239.217 + 203.697i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_6|)^2 \cdot R_4 \quad P = 239.217$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3} \cdot i) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \cdot i$$

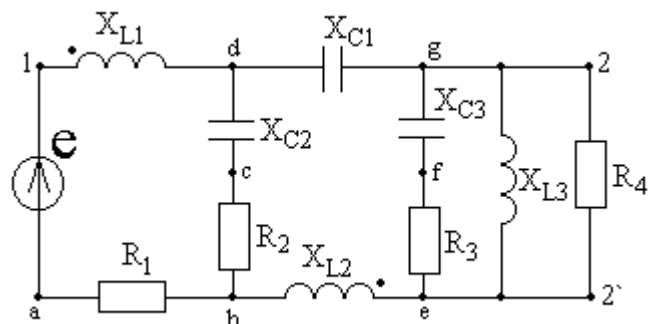
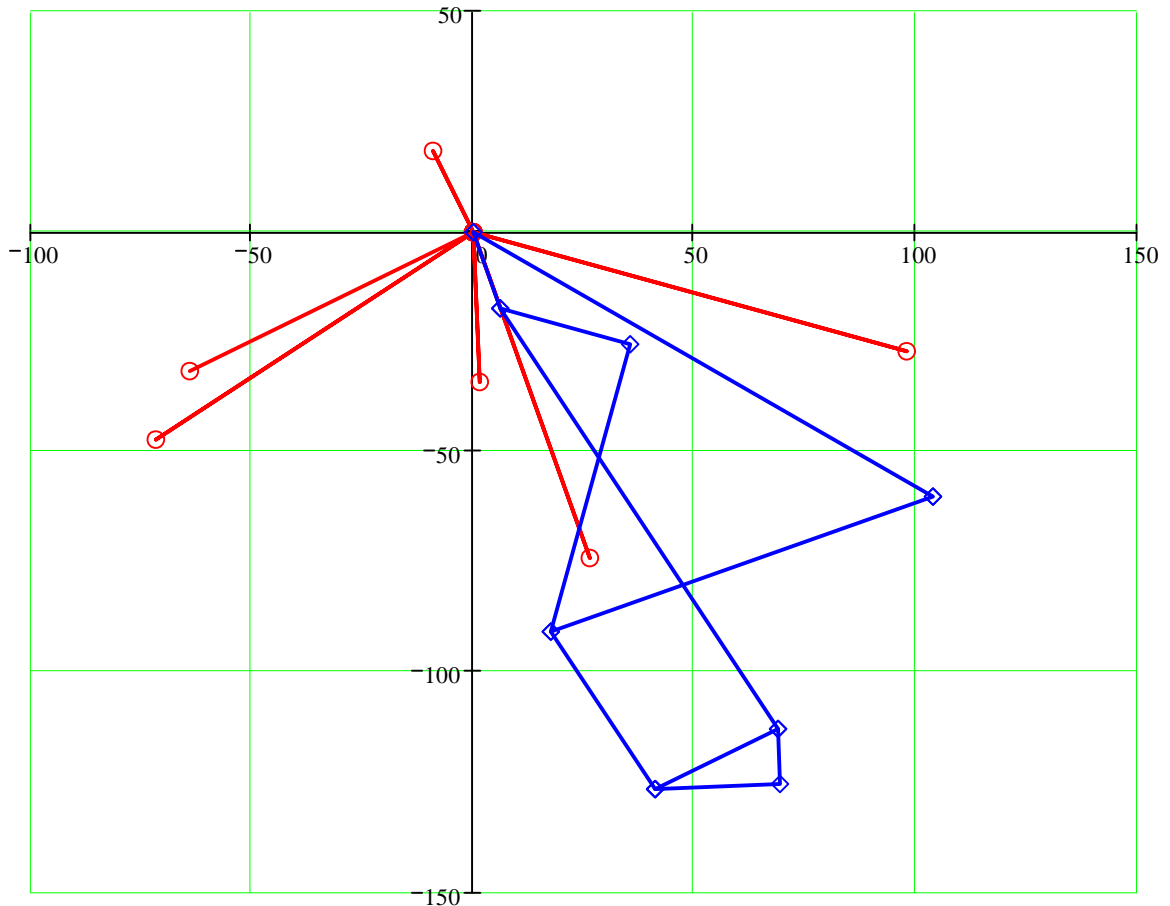
$$Q = 203.697i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$\phi_a := 0$		
$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot R_1$	$\phi_b = 6.144 - 17.268i$	$F(\phi_b) = (18.328 \quad -70.415)$
$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2$	$\phi_c = 35.557 - 25.355i$	$F(\phi_c) = (43.671 \quad -35.492)$
$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$	$\phi_d = 17.585 - 90.718i$	$F(\phi_d) = (92.407 \quad -79.03)$
$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$	$\phi_1 = 103.923 - 60i$	$F(\phi_1) = (120 \quad -30)$
$\phi_{1'} := \phi_1 - U$	$\phi_{1'} = 1.421i \times 10^{-14}$	
$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i$	$\phi_e = 68.872 - 112.888i$	$F(\phi_e) = (132.238 \quad -58.613)$
$\phi_f := \phi_e + I_4 \cdot R_3$	$\phi_f = 69.414 - 125.342i$	$F(\phi_f) = (143.28 \quad -61.022)$
$\phi_g := \phi_f + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$	$\phi_g = 41.108 - 126.576i$	$F(\phi_g) = (133.084 \quad -72.008)$
$\phi_d := \phi_g + I_3 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$	$\phi_d = 17.585 - 90.718i$	$F(\phi_d) = (92.407 \quad -79.03)$
$\phi_g := \phi_e + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$	$\phi_g = 41.108 - 126.576i$	$F(\phi_g) = (133.084 \quad -72.008)$
$\phi_g := \phi_e + I_6 \cdot R_4$	$\phi_g = 41.108 - 126.576i$	$F(\phi_g) = (133.084 \quad -72.008)$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



Прийнявши активний опір R2 за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів.

$$Z_E := \frac{\frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + \frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}}} + i \cdot (X_{L2} - X_{C1}) \quad Z_E = 10.746 + 23.677i$$

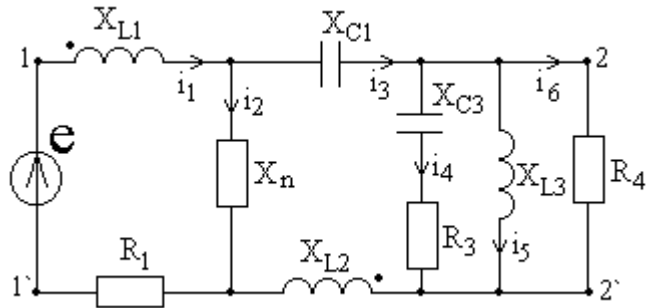
$$Z_E = R_E - j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 10.746 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = 23.677$$

За умовою резонансу: $B_{ab} = B_n + B_E \quad B_n = -B_E = \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2}$

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.035 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -28.554$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола

$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 7 + 35i \\ Z_3 &:= X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_3 &= 25i \\ Z_4 &:= R_3 - X_{C3} \cdot i & Z_4 &= 11 - 25i \\ Z_5 &:= X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 45i \\ Z_6 &:= R_4 & Z_6 &= 13 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} Z_{56} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} & Z_{56} &= 11.999 + 3.466i & Z_{3456} &:= \frac{Z_{56} \cdot Z_4}{Z_{56} + Z_4} + Z_3 & Z_{3456} &= 10.746 + 23.677i \\ Z_{46} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} & Z_{46} &= 9.623 - 3.518i & Z_{45} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} & Z_{45} &= 42.754 - 32.735i \end{aligned}$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{3456} \cdot i \cdot X_N}{Z_{3456} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left(\frac{-51563930}{2177849} + \frac{23402925}{2177849} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left(\frac{23402925}{2177849} + \frac{51563930}{2177849} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 7 + 35 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 1} \end{array} \right. \rightarrow \frac{\left(7 \cdot 10^8 \cdot X_N + 4 \cdot 10^7 \cdot X_N^2 + 1 \cdot 10^{10} + 5 \cdot 10^9 \cdot i \cdot X_N + 1 \cdot 10^8 \cdot i \cdot X_N^2 + 5 \cdot 10^{10} \cdot i \right)}{\left(1 \cdot 10^9 + 1 \cdot 10^8 \cdot X_N + 2 \cdot 10^6 \cdot X_N^2 \right)^1}$$

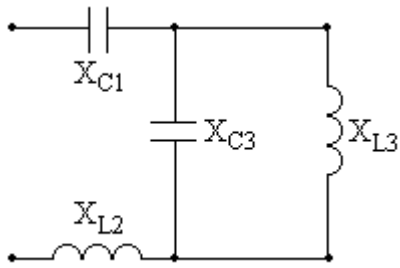
Уявна частина вхідного опору, яка за умовою резонансу дорівнює нулю:

$$X_{VX}(X_N) := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 5 \cdot \frac{\left(1016363165 \cdot X_N + 25557729 \cdot X_N^2 + 10306385075 \right)}{\left(1472340725 + 103127860 \cdot X_N + 2177849 \cdot X_N^2 \right)}$$

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -19.9 + 2.81 \cdot i \\ -19.9 - 2.81 \cdot i \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола не можливий

Розрахувати (знайти нулі і полюси) і побудувати частотну характеристику вхідного опору частини кола, розміщеної справа від перерізу А-А. Активні опори закортити



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{3 \cdot \pi}$$

$$L_2 = 0.106$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{3}{8 \cdot \pi}$$

$$L_3 = 0.119$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \rightarrow \frac{1}{1800 \cdot \pi}$$

$$C_1 = 1.768 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 1.061 \times 10^{-4}$$

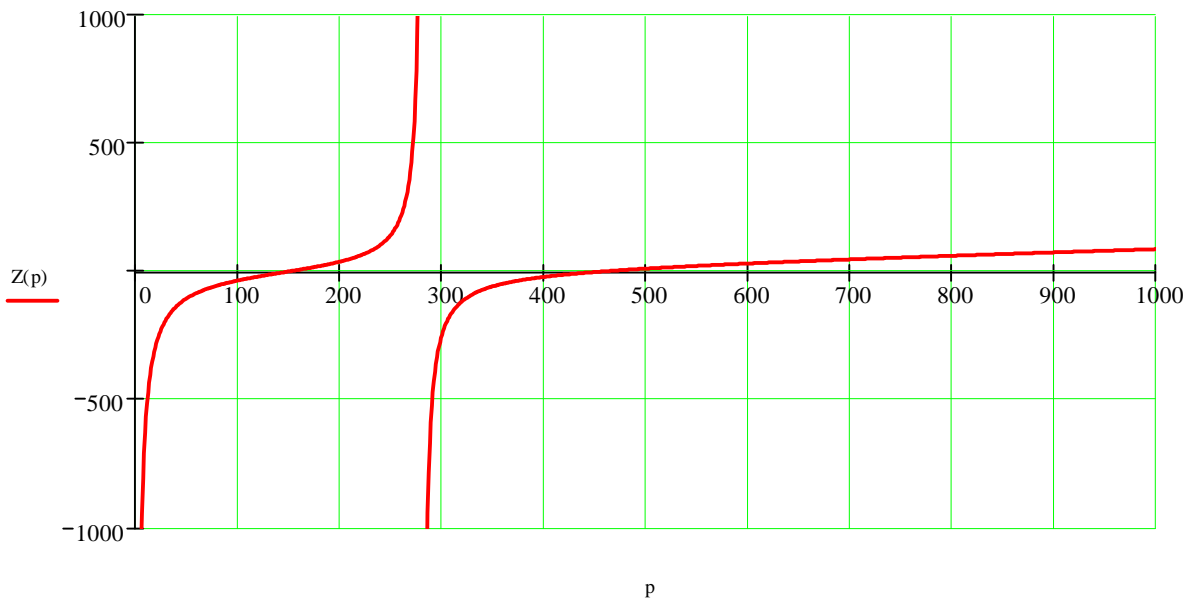
$$Z(p) := \frac{p \cdot L_3 \cdot \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 - \frac{1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_1}$$

Знаходимо нулі: $Z(p) = 0$

$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 448. \\ -448. \\ 144. \\ -144. \end{pmatrix}$$

Знаходимо полюси: $\frac{1}{Z(p)} = 0$

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 280.9925893 \\ -280.9925893 \\ 0 \end{pmatrix}$$



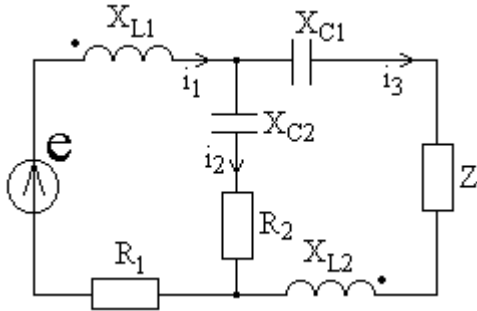
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 T/ L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів, визначити покази вольметра;

2.2. Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

2.3. Побудувати сумісну векторну діаграму струмів і топографічну діаграму напруг (на діаграмі показати напруги взаємної індукції).

Спростимо схему до двох незалежних контурів



$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i \quad Z_1 = 7 + 35i$$

$$Z_2 := R_2 - X_{C2} \cdot i \quad Z_2 = 9 - 20i$$

$$Z_3 := X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i \quad Z_3 = 25i$$

$$Z_4 := R_3 - X_{C3} \cdot i \quad Z_4 = 11 - 25i$$

$$Z_5 := X_{L3} \cdot i \quad Z_5 = 45i$$

$$Z_6 := R_4 \quad Z_6 = 13$$

$$Z := \frac{\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \cdot Z_4}{\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} + Z_4} \quad Z = 10.746 - 1.323i$$

$$Z_{11} := R_1 + j \cdot X_{L1} + R_2 - j \cdot X_{C2}$$

$$Z_{11} = 16 + 15i$$

$$Z_{22} := Z + R_2 + j \cdot (X_{L2} - X_{C1} - X_{C2})$$

$$Z_{22} = 19.746 + 3.677i$$

$$Z_{12} := R_2 - j \cdot (X_{C2} + X_M)$$

$$Z_{12} = 9 - 43i$$

Given

$$I_{K1} \cdot Z_{11} - I_{K2} \cdot Z_{12} = U \quad -I_{K1} \cdot Z_{12} + I_{K2} \cdot Z_{22} = 0$$

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \quad \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} .6872055058 - .7780711863 \cdot i \\ -1.668002492 - 1.540573726 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 0.687 - 0.778i \quad I_{K2} = -1.668 - 1.541i$$

$$I_1 := I_{K1} \quad I_1 = 0.687 - 0.778i \quad F(I_1) = (1.038 \quad -48.549)$$

$$I_2 := I_{K1} - I_{K2} \quad I_2 = 2.355 + 0.763i \quad F(I_2) = (2.476 \quad 17.939)$$

$$I_3 := I_{K2} \quad I_3 = -1.668 - 1.541i \quad F(I_3) = (2.271 \quad -137.274)$$

$$I_4 := \frac{I_3 \cdot Z}{Z_4} \quad I_4 = 0.186 - 0.881i \quad F(I_4) = (0.9 \quad -78.045)$$

$$I_5 := \frac{I_3 \cdot Z}{Z_5} \quad I_5 = -0.319 + 0.444i \quad F(I_5) = (0.546 \quad 125.705)$$

$$I_6 := \frac{I_3 \cdot Z}{Z_6} \quad I_6 = -1.536 - 1.104i \quad F(I_6) = (1.891 \quad -144.295)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_3 - I_4 - I_5 - I_6 = 0$$

$$I_2 + I_4 + I_5 + I_6 - I_1 = 0$$

$$S_{M1} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot X_M \quad S_{M1} = 1.206 - 54.2i$$

$$F(S_{M1}) = (54.213 \quad -88.726)$$

$$S_{M2} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot X_M \quad S_{M2} = 1.206 + 54.2i$$

$$F(S_{M2}) = (54.213 \quad 88.726)$$

Баланс потужностей електричного кола :

$$S := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S = 118.101 + 39.627i$$

$$P := \left(|I_1|\right)^2 \cdot R_1 + \left(|I_2|\right)^2 \cdot R_2 + \left(|I_4|\right)^2 \cdot R_3 + \left(|I_6|\right)^2 \cdot R_4$$

$$P = 118.101$$

$$Q := \left(|I_1|\right)^2 \cdot X_{L1} + \left(|I_2|\right)^2 \cdot (-X_{C2}) + \left(|I_3|\right)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + \left(|I_4|\right)^2 \cdot (-X_{C3}) + \left(|I_5|\right)^2 \cdot X_{L3} + S_{M1} + S_{M2}$$

$$Q = 39.627$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot R_1$$

$$F(\phi_b) = (7.267 \quad -48.549)$$

$$\phi_b = 4.81 - 5.446i$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2$$

$$F(\phi_c) = (26.046 \quad 3.117)$$

$$\phi_c = 26.007 + 1.416i$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$$

$$F(\phi_d) = (61.56 \quad -47.917)$$

$$\phi_d = 41.257 - 45.688i$$

$$\phi_{1'} := \phi_d + I_3 \cdot X_M \cdot i$$

$$F(\phi_{1'}) = (61.56 \quad -47.917)$$

$$\phi_{1'} = 41.257 - 45.688i$$

$$\phi_1 := \phi_{1'} + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$$

$$F(\phi_1) = (120 \quad -30)$$

$$\phi_1 = 103.923 - 60i$$

$$\phi_A := \phi_1 - U$$

$$F(\phi_A) = (8.073 \times 10^{-8} \quad -11.287)$$

$$\phi_A = 7.917 \times 10^{-8} - 1.58i \times 10^{-8}$$

$$\phi_{e'} := \phi_b + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i$$

$$F(\phi_{e'}) = (98.089 \quad -47.369)$$

$$\phi_{e'} = 66.433 - 72.167i$$

$$\phi_e := \phi_{e'} + I_1 \cdot X_M \cdot i$$

$$F(\phi_e) = (101.429 \quad -33.757)$$

$$\phi_e = 84.329 - 56.361i$$

$$\phi_f := \phi_e + I_4 \cdot R_3$$

$$F(\phi_f) = (108.737 \quad -37.402)$$

$$\phi_f = 86.38 - 66.047i$$

$$\phi_g := \phi_f + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$$

$$F(\phi_g) = (95.617 \quad -47.688)$$

$$\phi_g = 64.366 - 70.708i$$

$$\phi_d := \phi_g + I_3 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$$

$$F(\phi_d) = (61.56 \quad -47.917)$$

$$\phi_d = 41.257 - 45.688i$$

$$\phi_g := \phi_e + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$$

$$F(\phi_g) = (95.617 \quad -47.688)$$

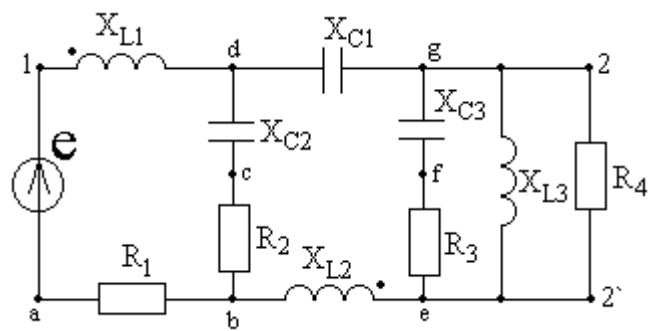
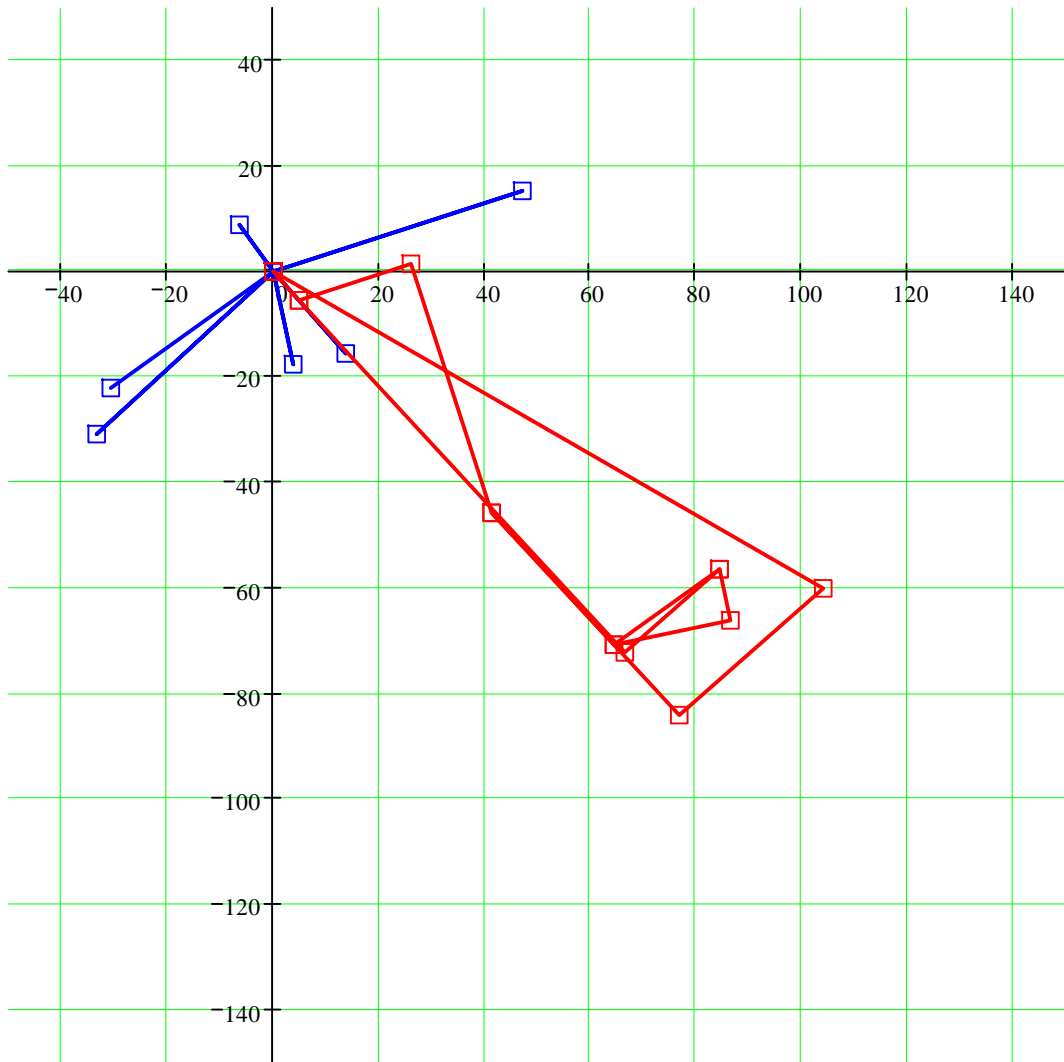
$$\phi_g = 64.366 - 70.708i$$

$$\phi_g := \phi_e + I_6 \cdot R_4$$

$$F(\phi_g) = (95.617 \quad -47.688)$$

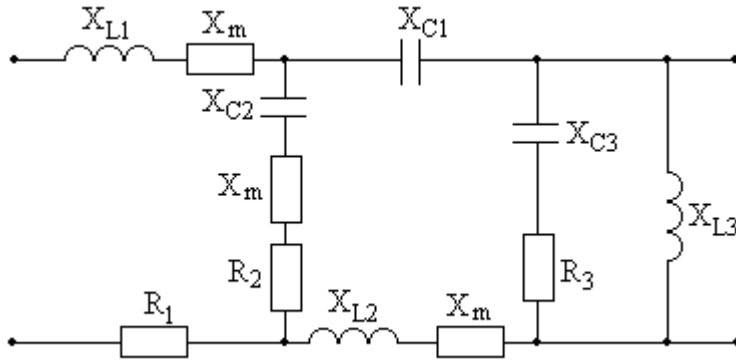
$$\phi_g = 64.366 - 70.708i$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



ВІДКИНУВШИ ВІТКУ МІЖ ЗАТИСКАЧАМИ 2-2", ВИКОНАТИ ЕКВІВАЛЕНТУВАННЯ ВЗАЄМОІНДУКТИВНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ВІТОК. ОДЕРЖАНУ СХЕМУ РОЗГЛЯДАТИ ЯК ЧОТИРИПОЛЮСНИК З ЗАТИСКАЧАМИ 1-1" ТА 2-2" :

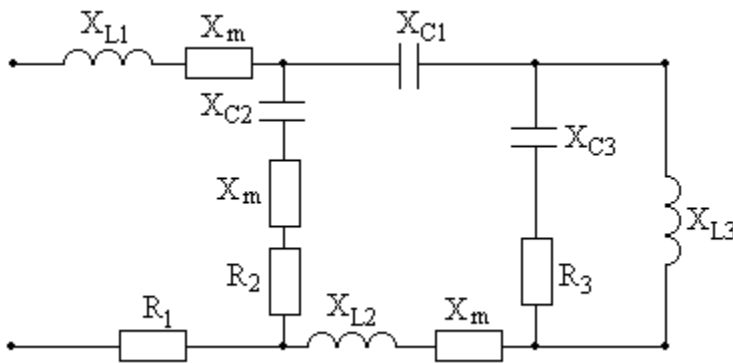
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполосника **A, B, C, D**



$$U_1 = A \cdot U_2 + B \cdot I_2$$

$$I_1 = C \cdot U_2 + D \cdot I_2$$

Неробочий хід: $I_2 = 0$ $U_{10} := U$ $U_1 = A \cdot U_2$ $I_1 = C \cdot U_2$



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 7 + 58 \cdot i \quad Z_3 := \frac{i \cdot X_{L3} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + i \cdot X_{L3}} \quad Z_3 = 42.754 - 32.735i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 9 - 43 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{[Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})] \cdot Z_2}{Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})} + R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M) \quad Z_{10} = 36.313 + 40.841i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \quad Z_{20} = 134.702 - 57.124i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 0.443 - 2.151i \quad F(I_{10}) = (2.196 \quad -78.359)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{[Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})]} \quad F(I_{30}) = (1.643 \quad -128.35)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot Z_3 \quad U_{20} = -85.757 - 21.716i \quad F(U_{20}) = (88.463 \quad -165.79)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = -0.972 + 0.946i \quad F(A) = (1.356 \quad 135.79)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 1.112 \times 10^{-3} + 0.025i \quad F(C) = (0.025 \quad 87.431)$$

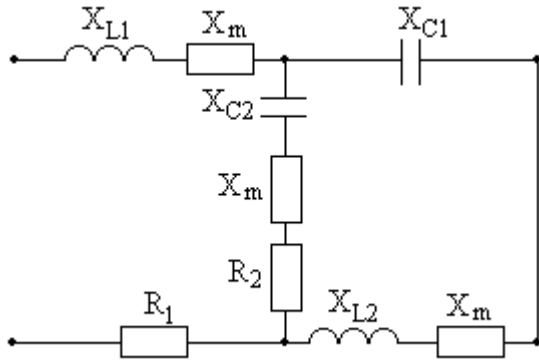
Коротке замикання:

$$U_2 = 0$$

$$U_K := U$$

$$U_1 = B \cdot I_2$$

$$I_1 = D \cdot I_2$$



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 7 + 58 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 9 - 43 \cdot i$$

$$Z_3 := i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 48 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 202.623 - 2.679i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K}$$

$$I_{1K} = 0.517 - 0.289i$$

$$F(I_{1K}) = (0.592 \quad -29.242)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

$$I_{3K} = -1.832 - 1.74i$$

$$F(I_{3K}) = (2.527 \quad -136.476)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}}$$

$$B = -13.468 + 45.54i$$

$$F(B) = (47.49 \quad 106.476)$$

$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}}$$

$$D = -0.069 + 0.224i$$

$$F(D) = (0.234 \quad 107.233)$$

Перевірка

$$A \cdot D - B \cdot C = 1$$

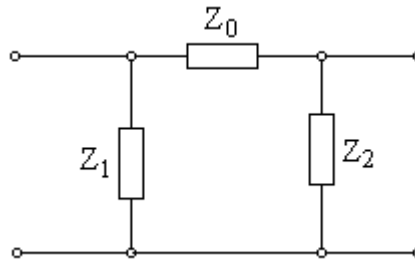
$$F(A) = (1.356 \quad 135.79)$$

$$F(B) = (47.49 \quad 106.476)$$

$$F(C) = (0.025 \quad 87.431)$$

$$F(D) = (0.234 \quad 107.233)$$

Розрахувати параметри віток схеми II заміщення:



$$Z_0 := B$$

$$Z_0 = -13.468 + 45.54i$$

$$F(Z_0) = (47.49 \quad 106.476)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B}$$

$$Y_1 = 0.011 + 0.02i$$

$$F(Y_1) = (0.023 \quad 61.703)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B}$$

$$Y_2 = 0.031 + 0.034i$$

$$F(Y_2) = (0.046 \quad 47.903)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0)$$

$$R_0 = -13.468$$

$$X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0)$$

$$X_{L0} = 45.54$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1}$$

$$Z_1 = 20.604 - 38.271i$$

$$R_1 := \operatorname{Re}(Z_1)$$

$$R_1 = 20.604$$

$$X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1)$$

$$X_{C1} = 38.271$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2}$$

$$Z_2 = 14.554 - 16.11i$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(Z_2)$$

$$R_2 = 14.554$$

$$X_{C2} := -\operatorname{Im}(Z_2)$$

$$X_{C2} = 16.11$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}}$$

$$C_1 = 6.931 \times 10^{-5}$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}}$$

$$C_2 = 1.647 \times 10^{-4}$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega}$$

$$L_0 = 0.121$$