

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 140

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):

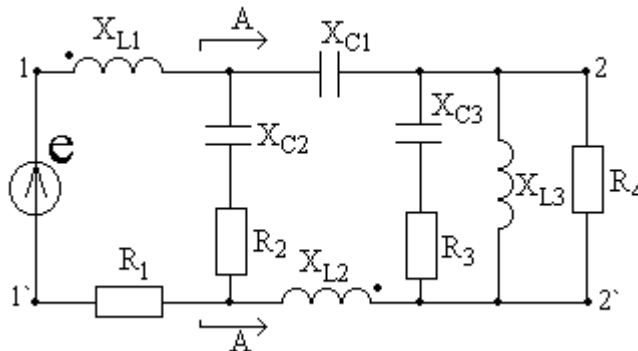
- 2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів;
- 2.2. Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;
- 2.3. Побудувати сумісну векторну діаграму струмів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

$$\begin{aligned} E &:= 100 & \psi &:= -20 & R_1 &:= 5 & R_2 &:= 7 & R_3 &:= 9 & R_4 &:= 12 \\ X_{L1} &:= 45 & X_{L2} &:= 50 & X_{L3} &:= 55 & X_{C1} &:= 25 & X_{C2} &:= 30 & X_{C3} &:= 35 \\ X_M &:= 27 & f &:= 60 & \omega &:= 2 \cdot \pi \cdot f & \omega &= 376.991 \end{aligned}$$

$$U := E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} \quad U = 93.969 - 34.202i \quad F(U) = (100 \quad -20)$$



Символічний метод

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

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

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

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

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

$$Z_6 := R_4$$

$$Z_1 = 5 + 45i$$

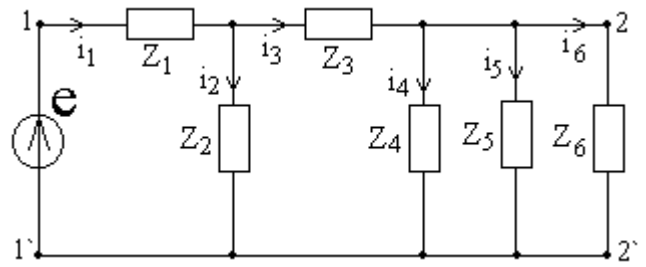
$$Z_2 = 7 - 30i$$

$$Z_3 = 25i$$

$$Z_4 = 9 - 35i$$

$$Z_5 = 55i$$

$$Z_6 = 12$$



$$Z_{3456} := \frac{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_5}{Z_6 + Z_5} \right) \cdot Z_4}{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_5}{Z_6 + Z_5} \right) + Z_4} + Z_3 \quad Z_{3456} = 10.983 + 23.951i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_{3456}}{Z_2 + Z_{3456}} + Z_1 \quad Z_E = 47.454 + 50.281i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 0.573 - 1.328i \quad F(I_1) = (1.446 \quad -66.657)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{3456}}{Z_{3456} + Z_2} \quad I_2 = 1.918 + 0.597i \quad F(I_2) = (2.009 \quad 17.3)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -1.345 - 1.925i \quad F(I_3) = (2.348 \quad -124.931)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \right)}{Z_4 + \left(\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \right)} \quad I_4 = 0.413 - 0.586i \quad F(I_4) = (0.717 \quad -54.808)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{\left(\frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} \right)}{Z_5 + \left(\frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} \right)} \quad I_5 = -0.359 + 0.305i \quad F(I_5) = (0.471 \quad 139.613)$$

$$I_6 := I_3 - I_4 - I_5 \quad I_6 = -1.399 - 1.645i \quad F(I_6) = (2.159 \quad -130.387)$$

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 :

$$S_r := U \cdot I_1 \quad S_r = 99.275 + 105.188i$$

$$P := \left(|I_1| \right)^2 \cdot R_1 + \left(|I_2| \right)^2 \cdot R_2 + \left(|I_4| \right)^2 \cdot R_3 + \left(|I_6| \right)^2 \cdot R_4 \quad P = 99.275$$

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

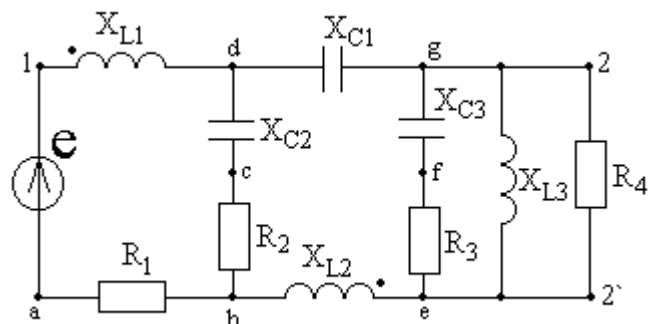
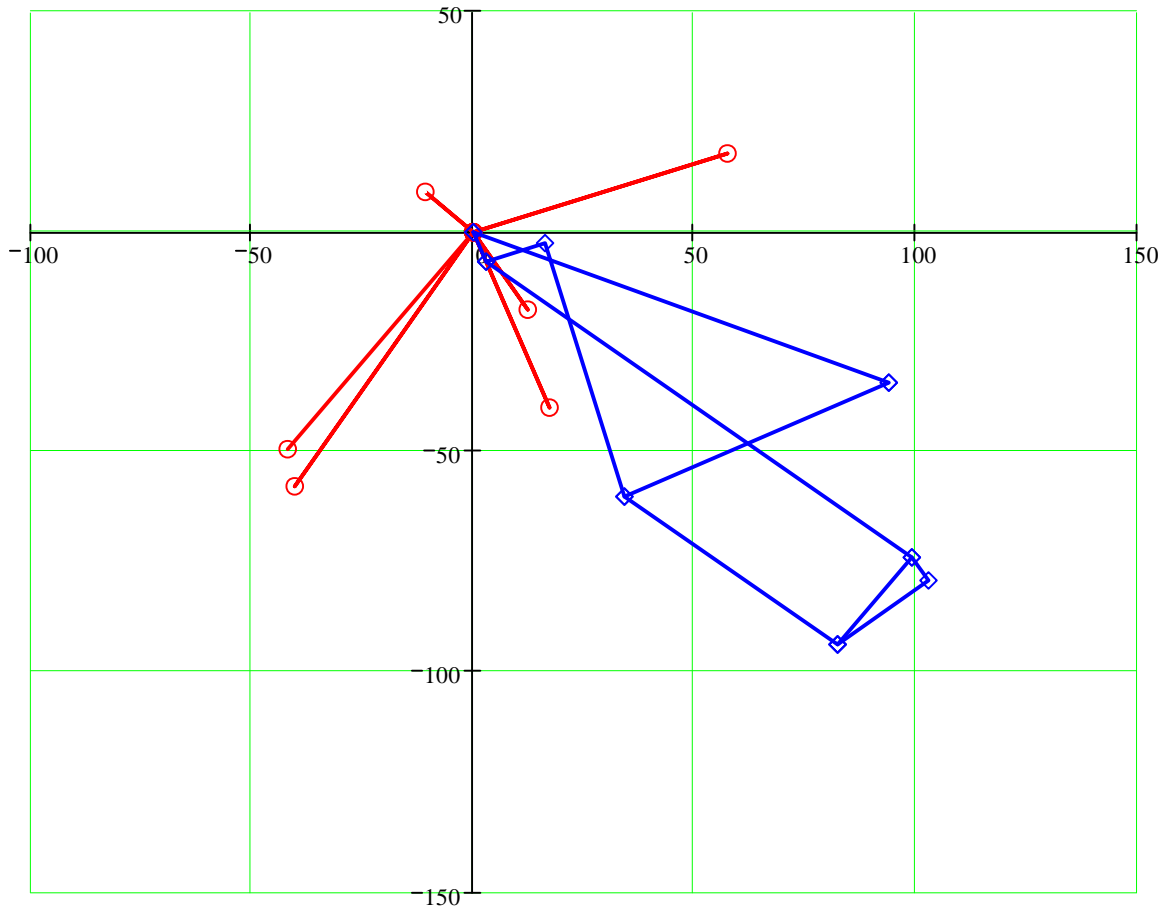
$$Q = 105.188i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$\phi_a := 0$		
$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot R_1$	$\phi_b = 2.866 - 6.64i$	$F(\phi_b) = (7.232 \quad -66.657)$
$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2$	$\phi_c = 16.29 - 2.459i$	$F(\phi_c) = (16.475 \quad -8.583)$
$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$	$\phi_d = 34.21 - 59.992i$	$F(\phi_d) = (69.061 \quad -60.307)$
$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$	$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$	$F(\phi_1) = (100 \quad -20)$
$\phi_{1'} := \phi_1 - U$	$\phi_{1'} = 1.421 \times 10^{-14} - 7.105i \times 10^{-15}$	
$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i$	$\phi_e = 99.131 - 73.873i$	$F(\phi_e) = (123.63 \quad -36.694)$
$\phi_f := \phi_e + I_4 \cdot R_3$	$\phi_f = 102.85 - 79.147i$	$F(\phi_f) = (129.778 \quad -37.58)$
$\phi_g := \phi_f + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$	$\phi_g = 82.343 - 93.609i$	$F(\phi_g) = (124.671 \quad -48.664)$
$\phi_d := \phi_g + I_3 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$	$\phi_d = 34.21 - 59.992i$	$F(\phi_d) = (69.061 \quad -60.307)$
$\phi_g := \phi_e + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$	$\phi_g = 82.343 - 93.609i$	$F(\phi_g) = (124.671 \quad -48.664)$
$\phi_g := \phi_e + I_6 \cdot R_4$	$\phi_g = 82.343 - 93.609i$	$F(\phi_g) = (124.671 \quad -48.664)$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



Прийнявши активний опір R_2 за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів.

$$Z_E := \frac{\frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + \frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}}} + i \cdot (X_{L2} - X_{C1}) \quad Z_E = 10.983 + 23.951i$$

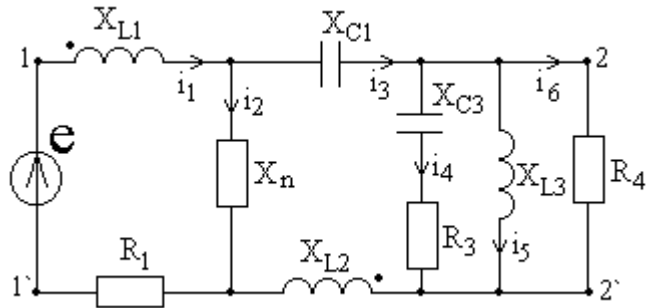
$$Z_E = R_E - j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 10.983 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = 23.951$$

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.034 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -28.988$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола

$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 5 + 45i \\ Z_3 &:= X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_3 &= 25i \\ Z_4 &:= R_3 - X_{C3} \cdot i & Z_4 &= 9 - 35i \\ Z_5 &:= X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 55i \\ Z_6 &:= R_4 & Z_6 &= 12 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} Z_{56} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} & Z_{56} &= 11.455 + 2.499i & Z_{3456} &:= \frac{Z_{56} \cdot Z_4}{Z_{56} + Z_4} + Z_3 & Z_{3456} &= 10.983 + 23.951i \\ Z_{46} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} & Z_{46} &= 10.185 - 3.025i & Z_{45} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} & Z_{45} &= 56.601 - 70.78i \end{aligned}$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{3456} \cdot i \cdot X_N}{Z_{3456} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left(\frac{-55965185}{2336657} + \frac{25664100}{2336657} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left(\frac{25664100}{2336657} + \frac{55965185}{2336657} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 5 + 45 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \rightarrow 5 \cdot \frac{(1 \cdot 10^8 \cdot X_N + 7 \cdot 10^6 \cdot X_N^2 + 2 \cdot 10^9 + 1 \cdot 10^9 \cdot i \cdot X_N + 3 \cdot 10^7 \cdot i \cdot X_N^2 + 1 \cdot 10^{10} \cdot i)}{(2 \cdot 10^9 + 1 \cdot 10^8 \cdot X_N + 2 \cdot 10^6 \cdot X_N^2)} \right| \cdot 1$$

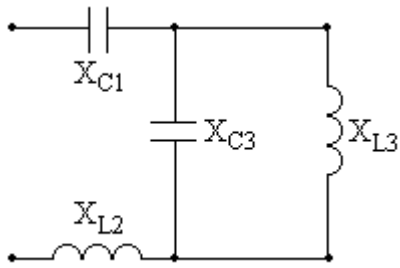
Уявна частина вхідного опору, яка за умовою резонансу дорівнює нулю:

$$X_{VX}(X_N) := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \rightarrow 25 \cdot \frac{(266366483 \cdot X_N + 6444590 \cdot X_N^2 + 2920131765)}{(1622295425 + 111930370 \cdot X_N + 2336657 \cdot X_N^2)} \end{array} \right.$$

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -20.7 + 5.11 \cdot i \\ -20.7 - 5.11 \cdot i \end{pmatrix}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{5}{12 \cdot \pi}$$

$$L_2 = 0.133$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{11}{24 \cdot \pi}$$

$$L_3 = 0.146$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi}$$

$$C_1 = 1.061 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{4200 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 7.579 \times 10^{-5}$$

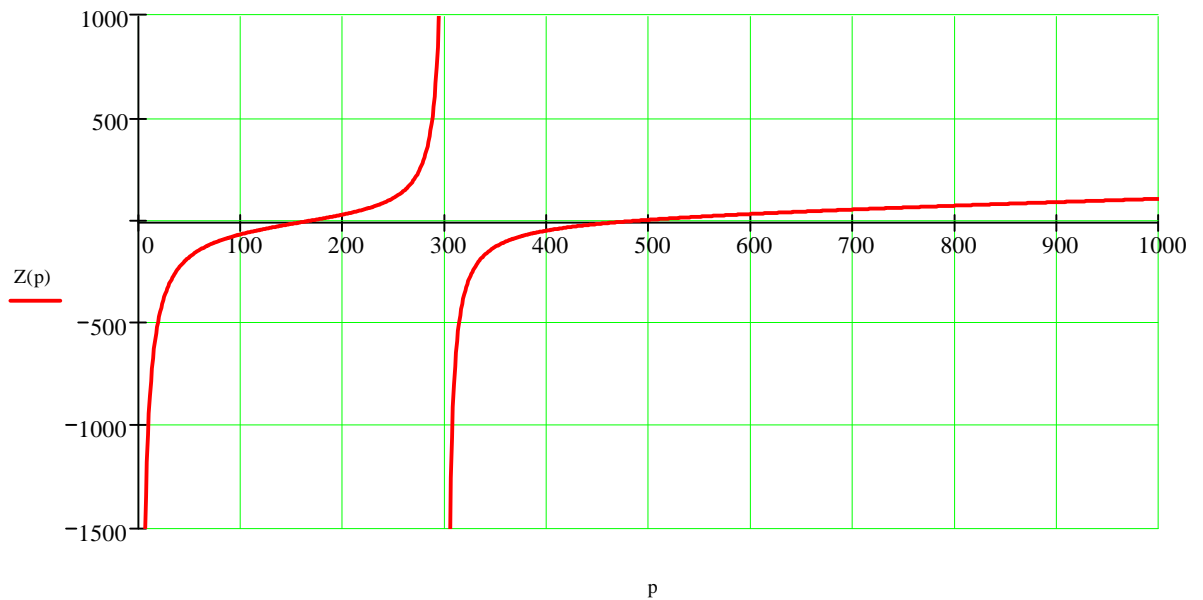
$$Z(p) := \frac{p \cdot L_3 \cdot \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 - \frac{1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_1}$$

Знаходимо нулі: $Z(p) = 0$

$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 483. \\ -483. \\ 164. \\ -164. \end{pmatrix}$$

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

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 300.7348763 \\ -300.7348763 \\ 0 \end{pmatrix}$$



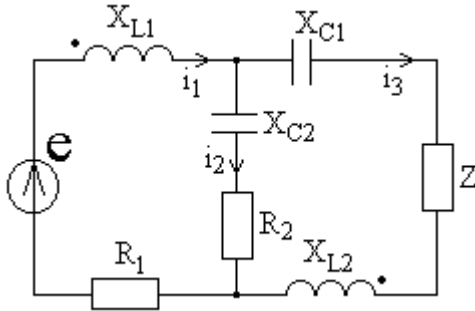
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 T/ L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

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



$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i \quad Z_1 = 5 + 45i$$

$$Z_2 := R_2 - X_{C2} \cdot i \quad Z_2 = 7 - 30i$$

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

$$Z_4 := R_3 - X_{C3} \cdot i \quad Z_4 = 9 - 35i$$

$$Z_5 := X_{L3} \cdot i \quad Z_5 = 55i$$

$$Z_6 := R_4 \quad Z_6 = 12$$

$$Z := \frac{\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \cdot Z_4}{\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} + Z_4} \quad Z = 10.983 - 1.049i$$

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

$$Z_{11} = 12 + 15i$$

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

$$Z_{22} = 17.983 - 6.049i$$

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

$$Z_{12} = 7 - 57i$$

Given

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \quad \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} .3027499618 - .4234299774 \cdot i \\ -.7600465797 - 1.380078716 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 0.303 - 0.423i \quad I_{K2} = -0.76 - 1.38i$$

$$I_1 := I_{K1} \quad I_1 = 0.303 - 0.423i \quad F(I_1) = (0.521 \quad -54.435)$$

$$I_2 := I_{K1} - I_{K2} \quad I_2 = 1.063 + 0.957i \quad F(I_2) = (1.43 \quad 41.991)$$

$$I_3 := I_{K2} \quad I_3 = -0.76 - 1.38i \quad F(I_3) = (1.576 \quad -118.843)$$

$$I_4 := \frac{I_3 \cdot Z}{Z_4} \quad I_4 = 0.317 - 0.361i \quad F(I_4) = (0.481 \quad -48.719)$$

$$I_5 := \frac{I_3 \cdot Z}{Z_5} \quad I_5 = -0.261 + 0.178i \quad F(I_5) = (0.316 \quad 145.701)$$

$$I_6 := \frac{I_3 \cdot Z}{Z_6} \quad I_6 = -0.816 - 1.197i \quad F(I_6) = (1.449 \quad -124.299)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

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

$$S_{M1} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot X_M \quad S_{M1} = 9.565 - 19.97i \quad F(S_{M1}) = (22.143 \quad -64.407)$$

$$S_{M2} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot X_M \quad S_{M2} = 9.565 + 19.97i \quad F(S_{M2}) = (22.143 \quad 64.407)$$

Баланс потужностей електричного кола :

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

$$S = 42.931 + 29.435i$$

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

$$P = 42.931$$

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

$$Q = 29.435$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:

$$\phi_a := 0$$

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

$$F(\phi_b) = (2.603 \quad -54.435)$$

$$\phi_b = 1.514 - 2.117i$$

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

$$F(\phi_c) = (10.056 \quad 27.089)$$

$$\phi_c = 8.953 + 4.579i$$

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

$$F(\phi_d) = (46.511 \quad -35.948)$$

$$\phi_d = 37.653 - 27.305i$$

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

$$F(\phi_{1'}) = (46.511 \quad -35.948)$$

$$\phi_{1'} = 37.653 - 27.305i$$

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

$$F(\phi_1) = (100 \quad -20)$$

$$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$$

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

$$F(\phi_A) = (6.092 \times 10^{-9} \quad -178.748)$$

$$\phi_A = -6.091 \times 10^{-9} - 1.331i \times 10^{-10}$$

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

$$F(\phi_{e'}) = (81.131 \quad -29.637)$$

$$\phi_{e'} = 70.518 - 40.119i$$

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

$$F(\phi_e) = (87.957 \quad -21.296)$$

$$\phi_e = 81.95 - 31.945i$$

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

$$F(\phi_f) = (91.821 \quad -22.541)$$

$$\phi_f = 84.806 - 35.199i$$

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

$$F(\phi_g) = (85.735 \quad -32.691)$$

$$\phi_g = 72.155 - 46.306i$$

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

$$F(\phi_d) = (46.511 \quad -35.948)$$

$$\phi_d = 37.653 - 27.305i$$

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

$$F(\phi_g) = (85.735 \quad -32.691)$$

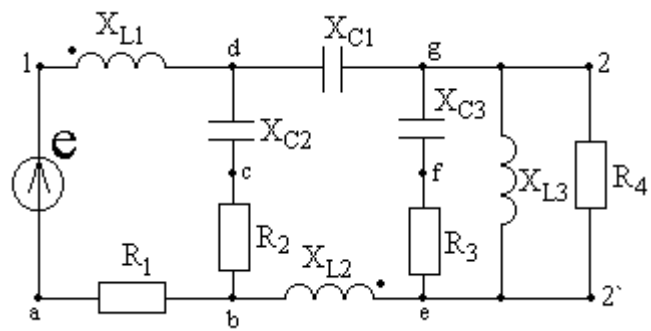
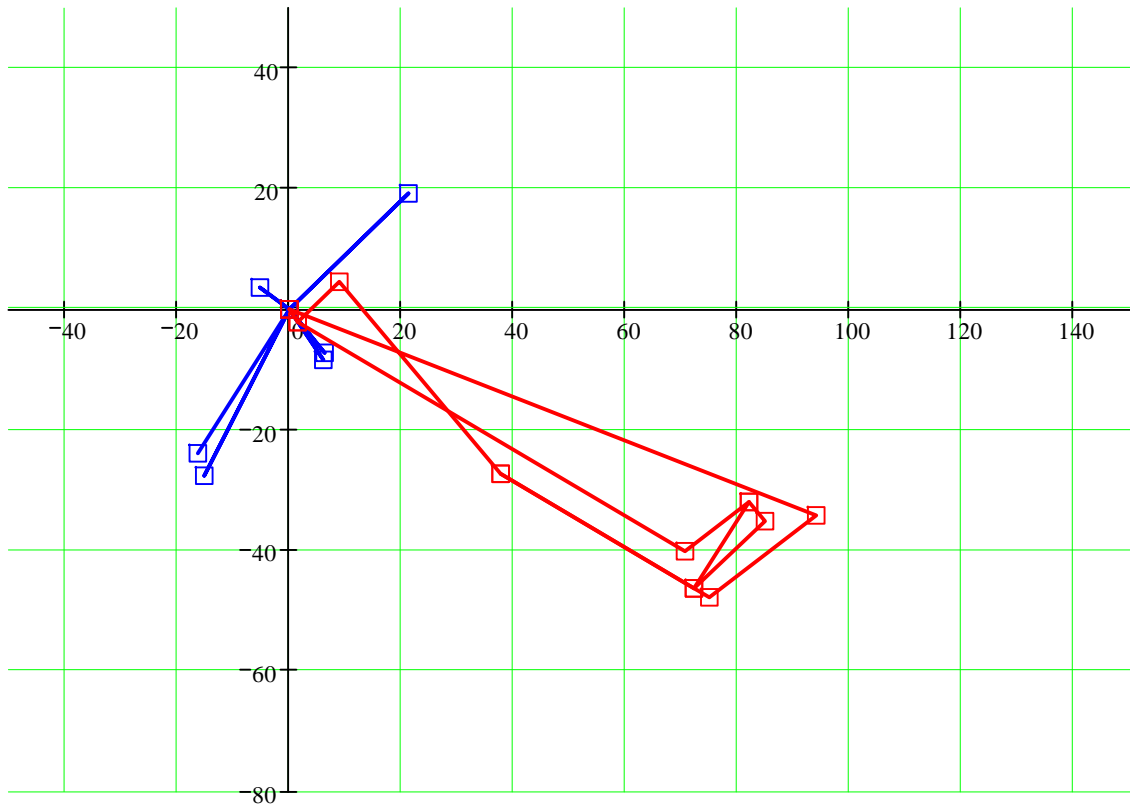
$$\phi_g = 72.155 - 46.306i$$

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

$$F(\phi_g) = (85.735 \quad -32.691)$$

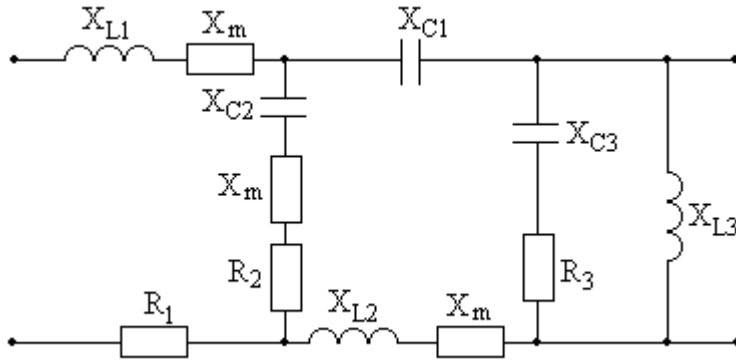
$$\phi_g = 72.155 - 46.306i$$

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" :

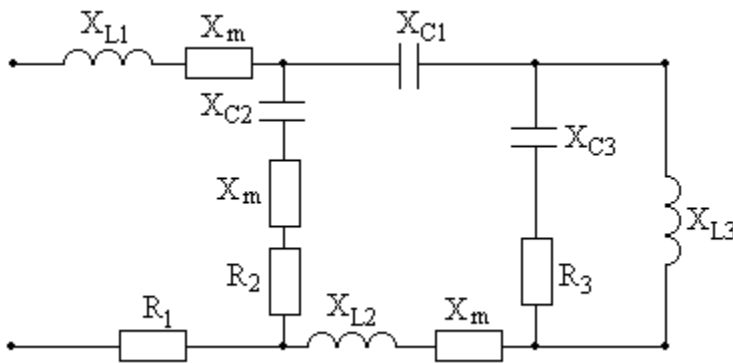
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполосника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 5 + 72 \cdot i \quad Z_3 := \frac{i \cdot X_{L3} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + i \cdot X_{L3}} \quad Z_3 = 56.601 - 70.78i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 7 - 57 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{[Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})] \cdot Z_2}{Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})} + R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M) \quad Z_{10} = 26.615 + 44.961i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \quad Z_{20} = 200.105 - 179.91i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 0.353 - 1.881i \quad F(I_{10}) = (1.914 \quad -79.376)$$

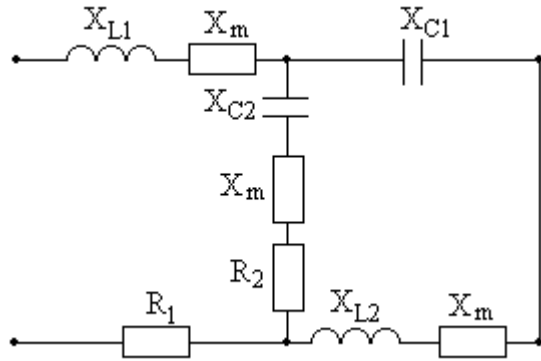
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{[Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})]} \quad F(I_{30}) = (1.111 \quad -112.381)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot Z_3 \quad U_{20} = -96.657 - 28.205i \quad F(U_{20}) = (100.688 \quad -163.732)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = -0.801 + 0.588i \quad F(A) = (0.993 \quad 143.732)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 1.869 \times 10^{-3} + 0.019i \quad F(C) = (0.019 \quad 84.357)$$

Коротке замикання: $U_2 = 0$ $U_K := U$ $U_1 = B \cdot I_2$ $I_1 = D \cdot I_2$



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 5 + 72 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 7 - 57 \cdot i$$

$$Z_3 := i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 52 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 260.784 + 306.703i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 0.086 - 0.233i \quad F(I_{1K}) = (0.248 \quad -69.626)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -0.755 - 1.476i \quad F(I_{3K}) = (1.658 \quad -117.087)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -7.44 + 59.844i \quad F(B) = (60.304 \quad 97.087)$$

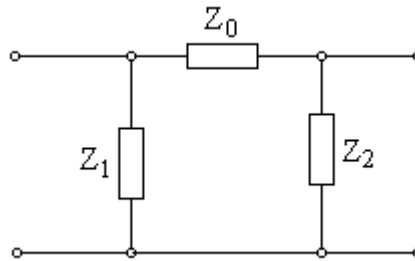
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = 0.101 + 0.11i \quad F(D) = (0.15 \quad 47.461)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (0.993 \quad 143.732) \quad F(B) = (60.304 \quad 97.087)$$

$$F(C) = (0.019 \quad 84.357) \quad F(D) = (0.15 \quad 47.461)$$

Розрахувати параметри віток схеми II заміщення:



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -7.44 + 59.844i \quad F(Z_0) = (60.304 \quad 97.087)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 3.655 \times 10^{-3} + 0.015i \quad F(Y_1) = (0.015 \quad 75.912)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.013 + 0.028i \quad F(Y_2) = (0.031 \quad 64.843)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -7.44 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 59.844$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 16.212 - 64.596i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 16.212 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 64.596$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 13.534 - 28.817i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 13.534 \quad X_{C2} := -\operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{C2} = 28.817$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 4.106 \times 10^{-5} \quad C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \quad C_2 = 9.205 \times 10^{-5}$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.159$$