

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 280

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 замкнути.

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

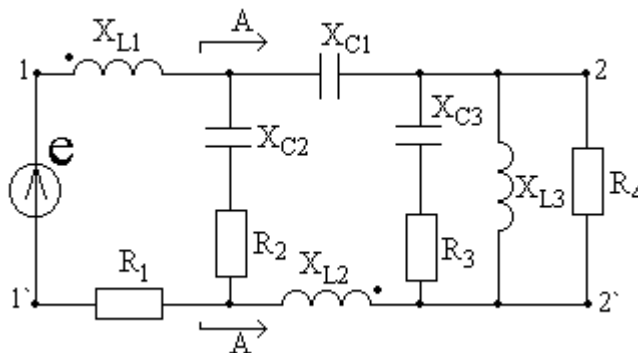
- 2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів;
- 2.2. Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;
- 2.3. Побудувати сумісну векторну діаграму струмів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

$$\begin{aligned} E &:= 120 & \psi &:= -30 & R_1 &:= 7 & R_2 &:= 9 & R_3 &:= 11 & R_4 &:= 13 \\ X_{L1} &:= 60 & X_{L2} &:= 50 & X_{L3} &:= 43 & X_{C1} &:= 20 & X_{C2} &:= 15 & X_{C3} &:= 13 \\ X_M &:= 32 & f &:= 100 & \omega &:= 2 \cdot \pi \cdot f & \omega &= 628.319 \end{aligned}$$

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



Символічний метод

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

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

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

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

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

$$Z_6 := R_4$$

$$Z_1 = 7 + 60i$$

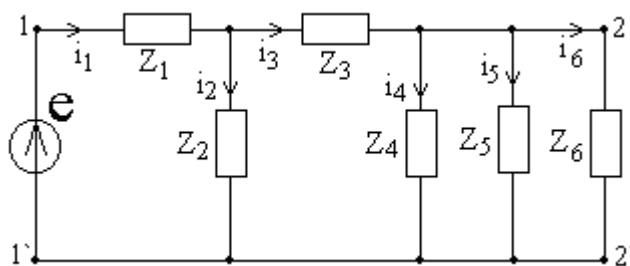
$$Z_2 = 9 - 15i$$

$$Z_3 = 30i$$

$$Z_4 = 11 - 13i$$

$$Z_5 = 43i$$

$$Z_6 = 13$$



$$Z_{3456} := \frac{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_5}{Z_6 + Z_5} \right) \cdot Z_4}{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_5}{Z_6 + Z_5} \right) + Z_4} + Z_3 \quad Z_{3456} = 8.41 + 28.42i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_{3456}}{Z_2 + Z_{3456}} + Z_1 \quad Z_E = 28.687 + 50.729i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = -0.018 - 2.059i \quad F(I_1) = (2.059 \quad -90.512)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{3456}}{Z_{3456} + Z_2} \quad I_2 = 1.607 - 2.264i \quad F(I_2) = (2.776 \quad -54.623)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -1.626 + 0.205i \quad F(I_3) = (1.639 \quad 172.825)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \right)}{Z_4 + \left(\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \right)} \quad I_4 = -0.699 - 0.436i \quad F(I_4) = (0.823 \quad -148.048)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{\left(\frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} \right)}{Z_5 + \left(\frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} \right)} \quad I_5 = 0.1 + 0.31i \quad F(I_5) = (0.326 \quad 72.188)$$

$$I_6 := I_3 - I_4 - I_5 \quad I_6 = -1.027 + 0.33i \quad F(I_6) = (1.079 \quad 162.188)$$

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 :

$$S_r := U \cdot I_1 \quad S_r = 121.629 + 215.082i$$

$$P := \left(|I_1| \right)^2 \cdot R_1 + \left(|I_2| \right)^2 \cdot R_2 + \left(|I_4| \right)^2 \cdot R_3 + \left(|I_6| \right)^2 \cdot R_4 \quad P = 121.629$$

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

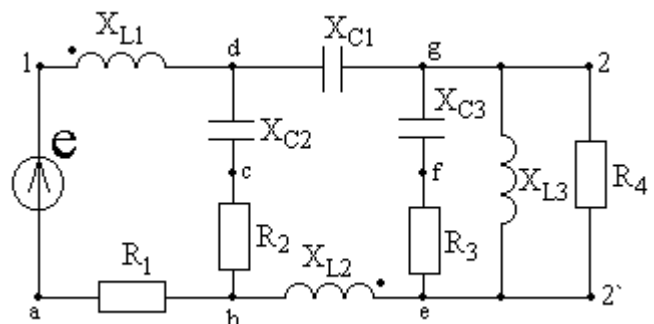
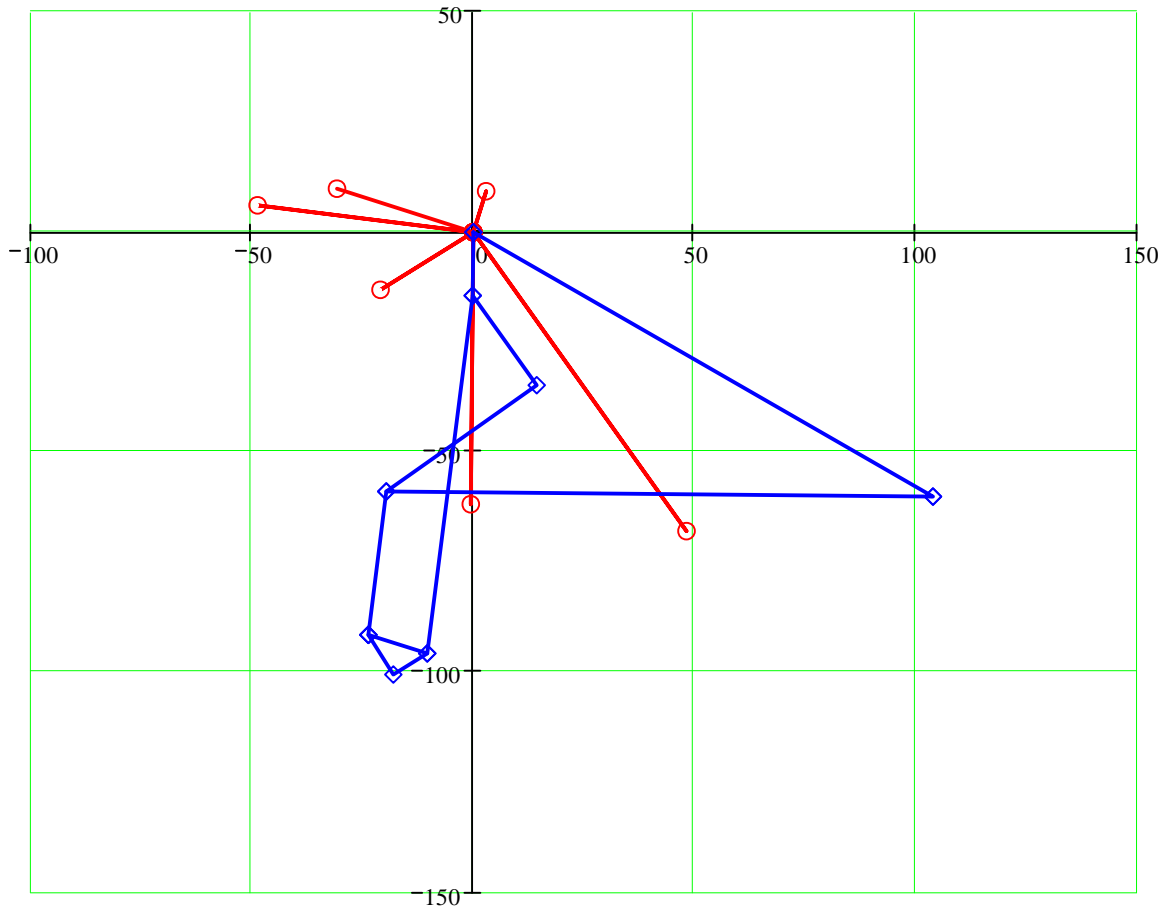
$$Q = 215.082i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$\phi_a := 0$		
$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot R_1$	$\phi_b = -0.129 - 14.413i$	$F(\phi_b) = (14.414 \quad -90.512)$
$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2$	$\phi_c = 14.337 - 34.786i$	$F(\phi_c) = (37.625 \quad -67.601)$
$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$	$\phi_d = -19.618 - 58.896i$	$F(\phi_d) = (62.078 \quad -108.422)$
$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$	$\phi_1 = 103.923 - 60i$	$F(\phi_1) = (120 \quad -30)$
$\phi_{1'} := \phi_1 - U$	$\phi_{1'} = 1.421 \times 10^{-14} + 7.105i \times 10^{-15}$	
$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i$	$\phi_e = -10.361 - 95.7i$	$F(\phi_e) = (96.259 \quad -96.179)$
$\phi_f := \phi_e + I_4 \cdot R_3$	$\phi_f = -18.046 - 100.493i$	$F(\phi_f) = (102.101 \quad -100.18)$
$\phi_g := \phi_f + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$	$\phi_g = -23.711 - 91.411i$	$F(\phi_g) = (94.436 \quad -104.541)$
$\phi_d := \phi_g + I_3 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$	$\phi_d = -19.618 - 58.896i$	$F(\phi_d) = (62.078 \quad -108.422)$
$\phi_g := \phi_e + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$	$\phi_g = -23.711 - 91.411i$	$F(\phi_g) = (94.436 \quad -104.541)$
$\phi_g := \phi_e + I_6 \cdot R_4$	$\phi_g = -23.711 - 91.411i$	$F(\phi_g) = (94.436 \quad -104.541)$

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.

$$Z_E := \frac{\frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + \frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}}} + i \cdot (X_{L2} - X_{C1}) \quad Z_E = 8.41 + 28.42i$$

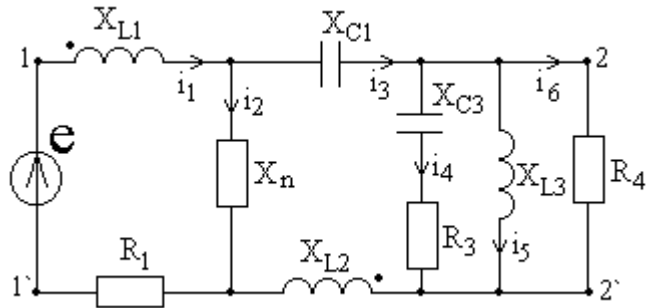
$$Z_E = R_E - j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 8.41 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = 28.42$$

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.032 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -30.909$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола

$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 7 + 60i \\ Z_3 &:= X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_3 &= 30i \\ Z_4 &:= R_3 - X_{C3} \cdot i & Z_4 &= 11 - 13i \\ Z_5 &:= X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 43i \\ Z_6 &:= R_4 & Z_6 &= 13 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} Z_{56} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} & Z_{56} &= 11.911 + 3.601i & Z_{3456} &:= \frac{Z_{56} \cdot Z_4}{Z_{56} + Z_4} + Z_3 & Z_{3456} &= 8.41 + 28.42i \\ Z_{46} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} & Z_{46} &= 7.556 - 2.949i & Z_{45} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} & Z_{45} &= 19.921 - 11.329i \end{aligned}$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{3456} \cdot i \cdot X_N}{Z_{3456} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left(\frac{-35172367}{1237573} + \frac{10408021}{1237573} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left(\frac{10408021}{1237573} + \frac{35172367}{1237573} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 7 + 60 \cdot i$$

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

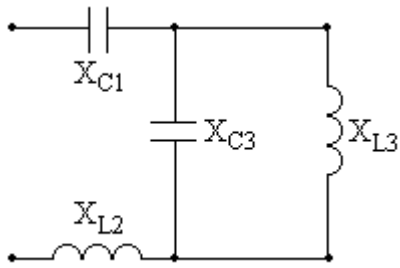
Уявна частина вхідного опору, яка за умовою резонансу дорівнює нулю:

$$X_{VX}(X_N) := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{\left(5307829850 \cdot X_N + 109426747 \cdot X_N^2 + 65228748600 \right)}{\left(1087145810 + 70344734 \cdot X_N + 1237573 \cdot X_N^2 \right)}$$

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -24.3 + 2.81 \cdot i \\ -24.3 - 2.81 \cdot i \end{pmatrix}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{4 \cdot \pi}$$

$$L_2 = 0.08$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{43}{200 \cdot \pi}$$

$$L_3 = 0.068$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \rightarrow \frac{1}{4000 \cdot \pi}$$

$$C_1 = 7.958 \times 10^{-5}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{2600 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 1.224 \times 10^{-4}$$

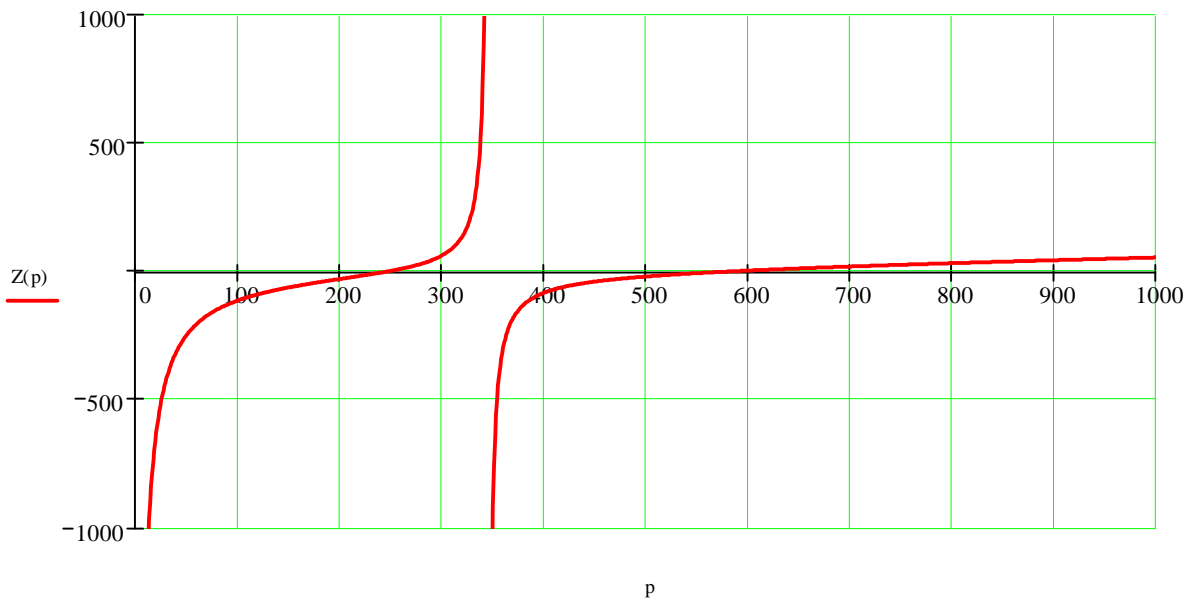
$$Z(p) := \frac{p \cdot L_3 \cdot \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 - \frac{1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_1}$$

Знаходимо нулі: $Z(p) = 0$

$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 567. \\ -567. \\ 243. \\ -243. \end{pmatrix}$$

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

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 345.4755500 \\ -345.4755500 \\ 0 \end{pmatrix}$$



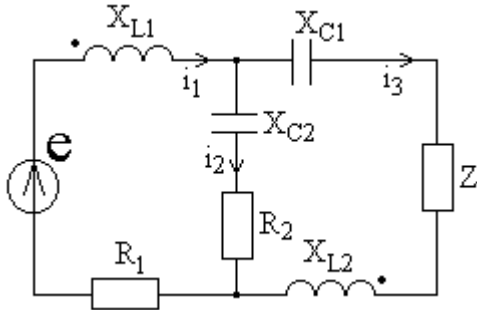
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 T/ L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

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

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



$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 7 + 60i \\ Z_2 &:= R_2 - X_{C2} \cdot i & Z_2 &= 9 - 15i \\ Z_3 &:= X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_3 &= 30i \\ Z_4 &:= R_3 - X_{C3} \cdot i & Z_4 &= 11 - 13i \\ Z_5 &:= X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 43i \\ Z_6 &:= R_4 & Z_6 &= 13 \end{aligned}$$

$$Z := \frac{\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} \cdot Z_4}{\frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} + Z_4} \quad Z = 8.41 - 1.58i$$

$$\begin{aligned} Z_{11} &:= R_1 + j \cdot X_{L1} + R_2 - j \cdot X_{C2} & Z_{11} &= 16 + 45i \\ Z_{22} &:= Z + R_2 + j \cdot (X_{L2} - X_{C1} - X_{C2}) & Z_{22} &= 17.41 + 13.42i \\ Z_{12} &:= R_2 - j \cdot (X_{C2} + X_M) & Z_{12} &= 9 - 47i \end{aligned}$$

Given

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} .8057562945 - .6301127455 \cdot i \\ -2.015027357 - .9476729362 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 0.806 - 0.63i \quad I_{K2} = -2.015 - 0.948i$$

$$\begin{aligned} I_1 &:= I_{K1} & I_1 &= 0.806 - 0.63i & F(I_1) &= (1.023 \quad -38.026) \\ I_2 &:= I_{K1} - I_{K2} & I_2 &= 2.821 + 0.318i & F(I_2) &= (2.839 \quad 6.423) \\ I_3 &:= I_{K2} & I_3 &= -2.015 - 0.948i & F(I_3) &= (2.227 \quad -154.812) \\ I_4 &:= \frac{I_3 \cdot Z}{Z_4} & I_4 &= -0.485 - 1.008i & F(I_4) &= (1.119 \quad -115.686) \\ I_5 &:= \frac{I_3 \cdot Z}{Z_5} & I_5 &= -0.111 + 0.429i & F(I_5) &= (0.443 \quad 104.55) \\ I_6 &:= \frac{I_3 \cdot Z}{Z_6} & I_6 &= -1.419 - 0.368i & F(I_6) &= (1.466 \quad -165.45) \end{aligned}$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 - I_3 &= 0 & I_3 - I_4 - I_5 - I_6 &= 0 & I_2 + I_4 + I_5 + I_6 - I_1 &= 0 \\ S_{M1} &:= \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot X_M & S_{M1} &= -32.847 - 65.065i & F(S_{M1}) &= (72.886 \quad -116.786) \\ S_{M2} &:= \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot X_M & S_{M2} &= -32.847 + 65.065i & F(S_{M2}) &= (72.886 \quad 116.786) \end{aligned}$$

Баланс потужностей електричного кола :

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

$$S = 121.543 + 17.138i$$

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

$$P = 121.543$$

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

$$Q = 17.138$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:

$$\phi_a := 0$$

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

$$F(\phi_b) = (7.16 \quad -38.026)$$

$$\phi_b = 5.64 - 4.411i$$

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

$$F(\phi_c) = (31.066 \quad -2.865)$$

$$\phi_c = 31.027 - 1.553i$$

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

$$F(\phi_d) = (56.613 \quad -50.788)$$

$$\phi_d = 35.791 - 43.865i$$

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

$$F(\phi_d) = (56.613 \quad -50.788)$$

$$\phi_d = 35.791 - 43.865i$$

$$\phi_I := \phi_{I'} + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$$

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

$$\phi_I = 103.923 - 60i$$

$$\phi_A := \phi_I - U$$

$$F(\phi_A) = (3.485 \times 10^{-8} \quad -55.443)$$

$$\phi_A = 1.977 \times 10^{-8} - 2.87i \times 10^{-8}$$

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

$$F(\phi_{e'}) = (117.774 \quad -63.242)$$

$$\phi_{e'} = 53.024 - 105.162i$$

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

$$F(\phi_e) = (107.969 \quad -47.324)$$

$$\phi_e = 73.188 - 79.378i$$

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

$$F(\phi_f) = (113.087 \quad -53.13)$$

$$\phi_f = 67.853 - 90.47i$$

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

$$F(\phi_g) = (100.403 \quad -56.958)$$

$$\phi_g = 54.744 - 84.165i$$

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

$$F(\phi_d) = (56.613 \quad -50.788)$$

$$\phi_d = 35.791 - 43.865i$$

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

$$F(\phi_g) = (100.403 \quad -56.958)$$

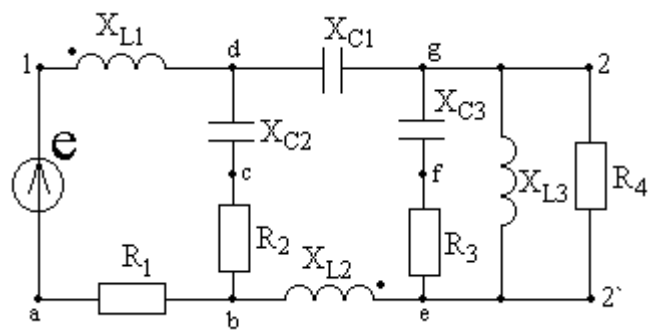
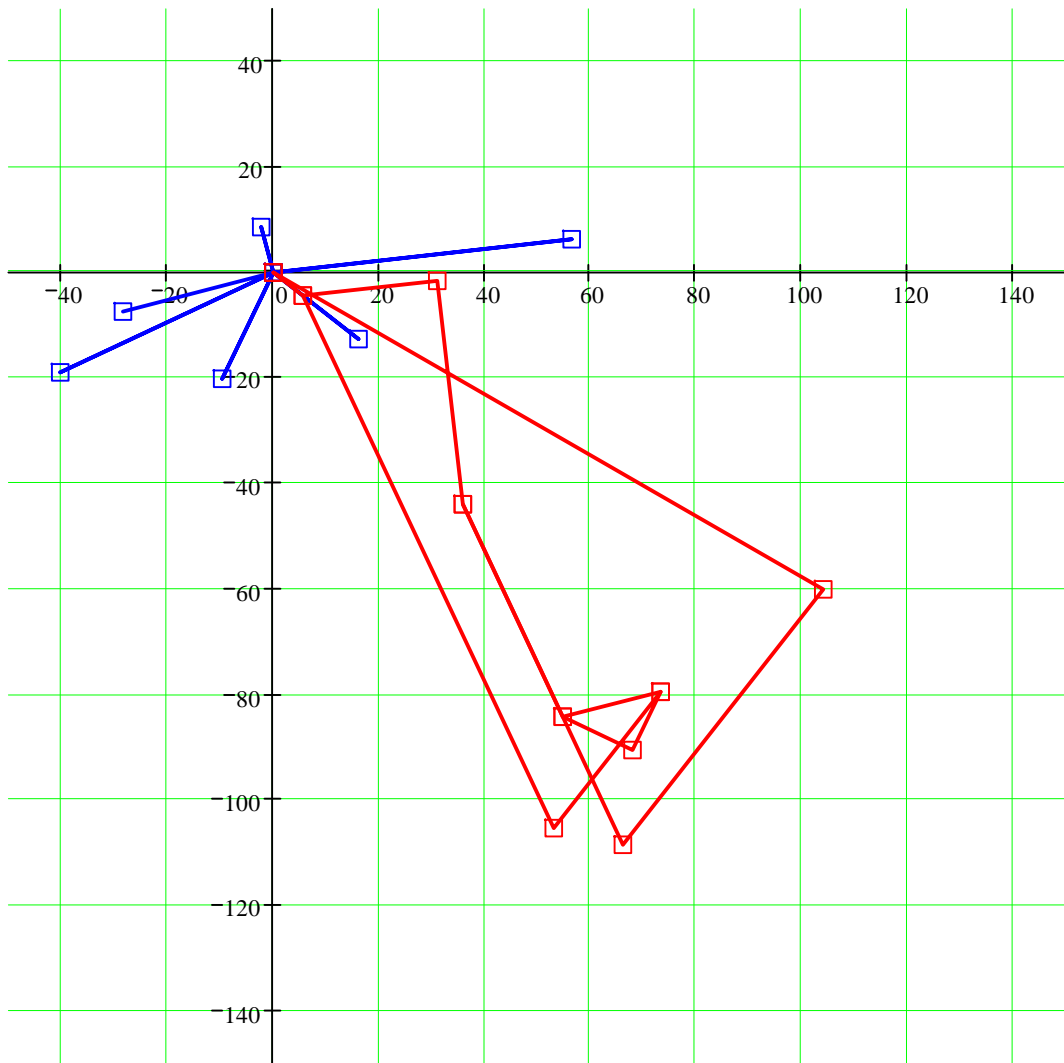
$$\phi_g = 54.744 - 84.165i$$

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

$$F(\phi_g) = (100.403 \quad -56.958)$$

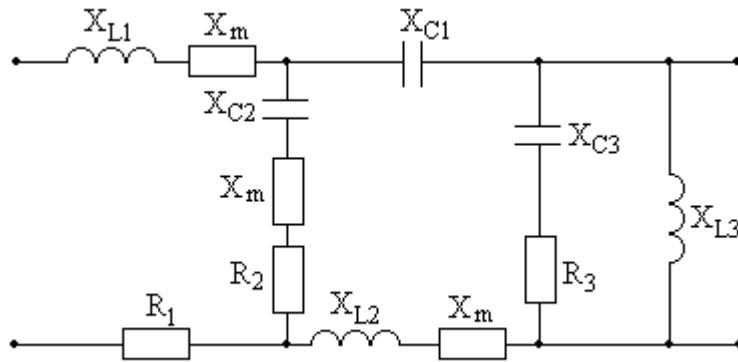
$$\phi_g = 54.744 - 84.165i$$

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" :

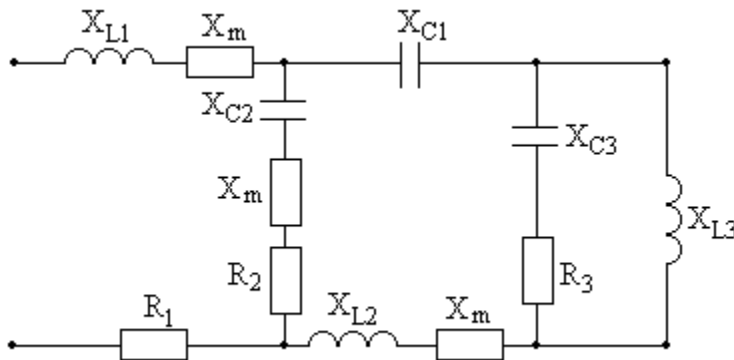
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 7 + 92 \cdot i \quad Z_3 := \frac{i \cdot X_{L3} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + i \cdot X_{L3}} \quad Z_3 = 19.921 - 11.329i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 9 - 47 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{[Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})] \cdot Z_2}{Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})} + R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M) \quad Z_{10} = 92.068 + 64.597i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \quad Z_{20} = 60.538 - 32.376i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 0.45 - 0.967i \quad F(I_{10}) = (1.067 \quad -65.054)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{[Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})]} \quad F(I_{30}) = (1.751 \quad -151.448)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot Z_3 \quad U_{20} = -40.13 + 0.753i \quad F(U_{20}) = (40.137 \quad 178.925)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = -2.617 + 1.446i \quad F(A) = (2.99 \quad 151.075)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = -0.012 + 0.024i \quad F(C) = (0.027 \quad 116.021)$$

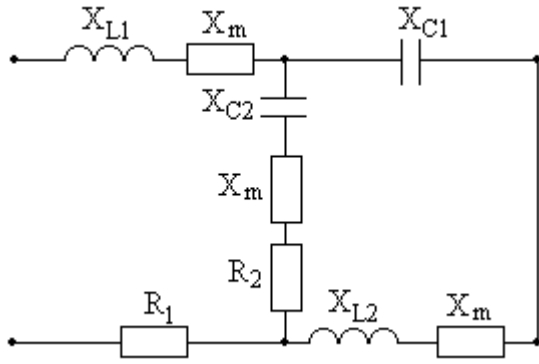
Коротке замикання:

$$U_2 = 0$$

$$U_K := U$$

$$U_1 = B \cdot I_2$$

$$I_1 = D \cdot I_2$$



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 7 + 92 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 9 - 47 \cdot i$$

$$Z_3 := i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 62 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 120.059 - 34.431i$$

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

$$I_{1K} = 0.932 - 0.232i$$

$$F(I_{1K}) = (0.961 \quad -13.998)$$

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

$$I_{3K} = -2.325 - 1.226i$$

$$F(I_{3K}) = (2.628 \quad -152.194)$$

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

$$B = -24.325 + 38.637i$$

$$F(B) = (45.656 \quad 122.194)$$

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

$$D = -0.272 + 0.244i$$

$$F(D) = (0.366 \quad 138.196)$$

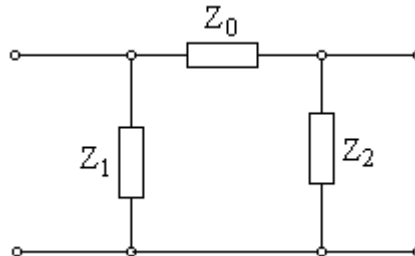
Перевірка

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

$$F(A) = (2.99 \quad 151.075) \quad F(B) = (45.656 \quad 122.194)$$

$$F(C) = (0.027 \quad 116.021) \quad F(D) = (0.366 \quad 138.196)$$

Розрахувати параметри віток схеми II заміщення;



$$Z_0 := B$$

$$Z_0 = -24.325 + 38.637i$$

$$F(Z_0) = (45.656 \quad 122.194)$$

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

$$Y_1 = 0.019 + 0.021i$$

$$F(Y_1) = (0.028 \quad 46.966)$$

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

$$Y_2 = 0.069 + 0.05i$$

$$F(Y_2) = (0.085 \quad 36.014)$$

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

$$R_0 = -24.325$$

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

$$X_{L0} = 38.637$$

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

$$Z_1 = 24.048 - 25.758i$$

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

$$R_1 = 24.048$$

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

$$X_{C1} = 25.758$$

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

$$Z_2 = 9.481 - 6.892i$$

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

$$R_2 = 9.481$$

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

$$X_{C2} = 6.892$$

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

$$C_1 = 6.179 \times 10^{-5}$$

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

$$C_2 = 2.309 \times 10^{-4}$$

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

$$L_0 = 0.061$$