

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 417

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 A, B, C, D чотириполусника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

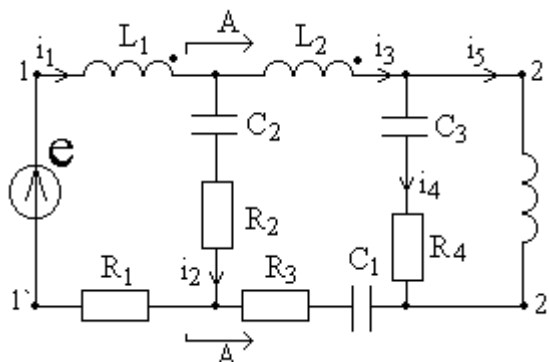
$$E := 160 \quad \psi := -60 \quad R_1 := 11 \quad R_2 := 13 \quad R_3 := 15 \quad R_4 := 17 \quad X_{L1} := 30 \quad X_{L2} := 35 \quad X_{L3} := 40$$

$$X_{C1} := 10 \quad X_{C2} := 15 \quad X_{C3} := 20 \quad X_M := 20 \quad f := 50$$

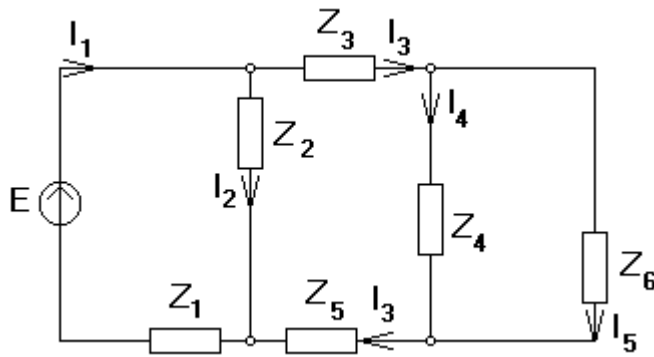
$$U := E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}}$$

$$U = 80 - 138.564i$$

$$F(U) = (160 \quad -60)$$



Розрахувати всі струми символічним методом



$$Z_1 := R_1 + j \cdot X_{L1} \quad Z_1 = 11 + 30i$$

$$Z_2 := R_2 - j \cdot X_{C2} \quad Z_2 = 13 - 15i$$

$$Z_5 := R_3 - j \cdot X_{C1} \quad Z_5 = 15 - 10i$$

$$Z_3 := j \cdot X_{L2} \quad Z_3 = 35i$$

$$Z_4 := R_4 - j \cdot X_{C3} \quad Z_4 = 17 - 20i$$

$$Z_6 := j \cdot X_{L3} \quad Z_6 = 40i$$

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_4}{Z_6 + Z_4} + Z_3 + Z_5 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_6 \cdot Z_4}{Z_6 + Z_4} + Z_3 + Z_5} + Z_1 \quad Z_E = 25.131 + 20.72i \quad F(Z_E) = (32.572 \quad 39.505)$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = -0.811 - 4.845i \quad F(I_1) = (4.912 \quad -99.505)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{\left(\frac{Z_6 \cdot Z_4}{Z_6 + Z_4} + Z_3 + Z_5 \right)}{\left(Z_2 + \frac{Z_6 \cdot Z_4}{Z_6 + Z_4} + Z_3 + Z_5 \right)} \quad I_2 = 0.458 - 4.159i \quad F(I_2) = (4.184 \quad -83.712)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -1.269 - 0.686i \quad F(I_3) = (1.443 \quad -151.607)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_6}{Z_6 + Z_4} \quad I_4 = -0.797 - 2.05i \quad F(I_4) = (2.199 \quad -111.242)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -0.473 + 1.363i \quad F(I_5) = (1.443 \quad 109.122)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ $I_3 - I_4 - I_5 = 0$ $I_2 + I_4 + I_5 - I_1 = 0$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_{L1}) + U - I_2 \cdot (R_2 - j \cdot X_{C2}) = 7.105 \times 10^{-15} + 2.842i \times 10^{-14}$$

$$-I_2 \cdot (R_2 - j \cdot X_{C2}) + I_3 \cdot [R_3 + j \cdot (X_{L2} - X_{C1})] + I_4 \cdot (R_4 - j \cdot X_{C3}) = 1.421 \times 10^{-14} - 7.105i \times 10^{-15}$$

$$I_4 \cdot (R_4 - j \cdot X_{C3}) - I_5 \cdot j \cdot X_{L3} = 3.553i \times 10^{-15}$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S := U \cdot \overline{I_1} \quad S = 606.427 + 499.982i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_4|)^2 \cdot R_4 \quad P = 606.427$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot X_{L1} + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = 499.982$$

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot R_1 \quad F(\phi_b) = (54.035 \quad -99.505)$$

$$\phi_b = -8.923 - 53.293i$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad F(\phi_c) = (107.396 \quad -91.582)$$

$$\phi_c = -2.965 - 107.356i$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-X_{C2} \cdot i) \quad F(\phi_d) = (131.599 \quad -119.772)$$

$$\phi_d = -65.345 - 114.23i$$

$$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i \quad F(\phi_1) = (160 \quad -60)$$

$$\phi_1 = 80 - 138.564i$$

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

$$\phi_A = -1.421 \times 10^{-14} - 2.842i \times 10^{-14}$$

$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot R_3 \quad F(\phi_e) = (69.463 \quad -113.739)$$

$$\phi_e = -27.964 - 63.586i$$

$$\phi_k := \phi_e + I_3 \cdot (-X_{C1} \cdot i) \quad F(\phi_k) = (61.667 \quad -124.384)$$

$$\phi_k = -34.826 - 50.892i$$

$$\phi_m := \phi_k + I_4 \cdot R_4 \quad F(\phi_m) = (98.438 \quad -119.431)$$

$$\phi_m = -48.37 - 85.734i$$

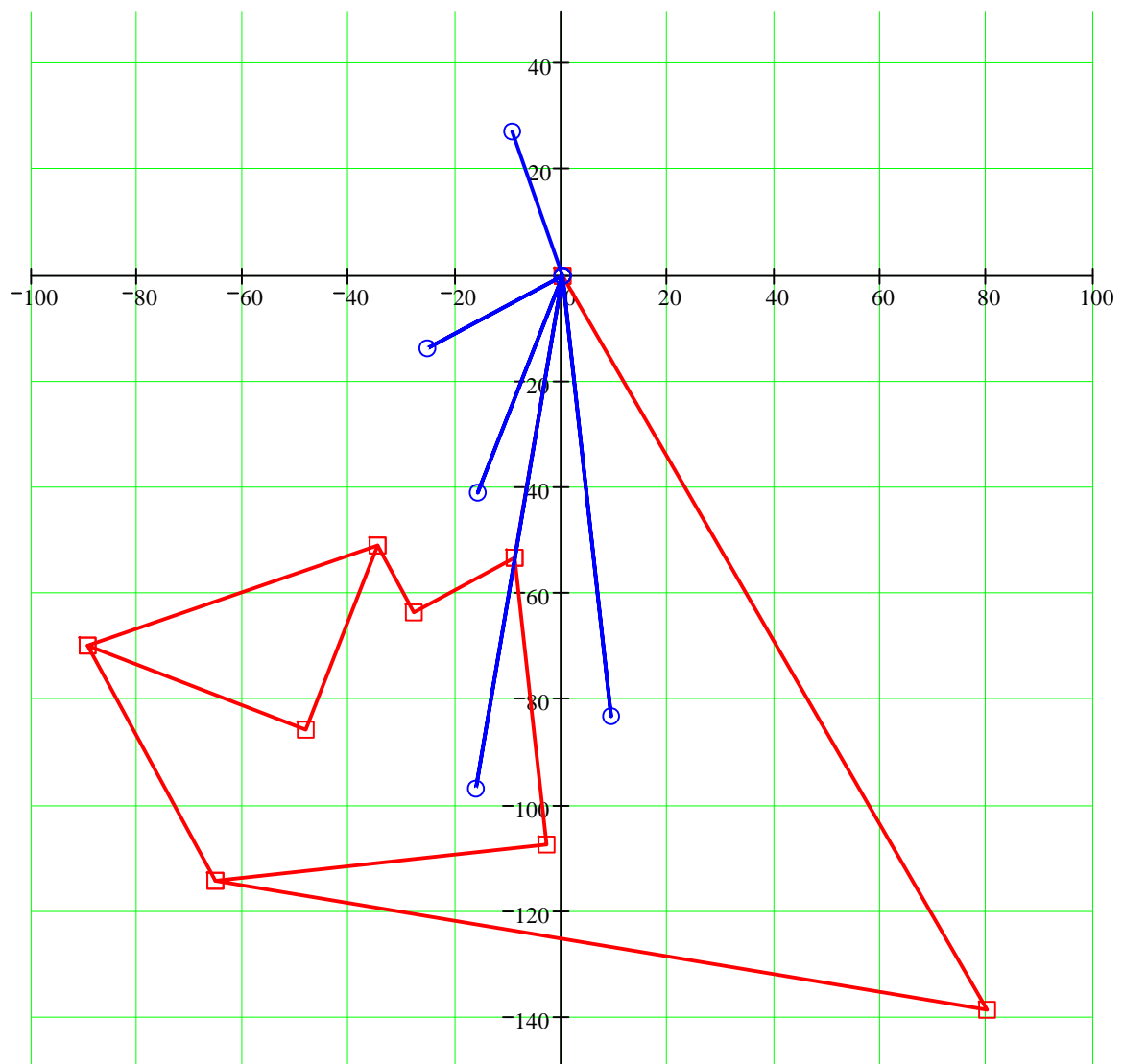
$$\phi_z := \phi_m + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i) \quad F(\phi_z) = (113.391 \quad -142.007)$$

$$\phi_z = -89.361 - 69.8i$$

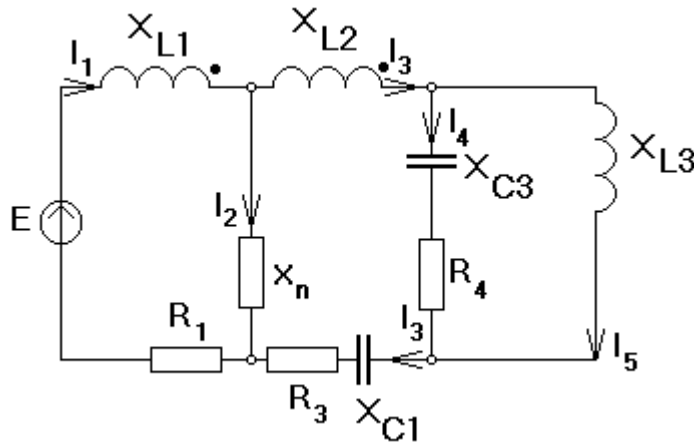
$$\phi_d := \phi_z + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i \quad F(\phi_d) = (131.599 \quad -119.772)$$

$$\phi_d = -65.345 - 114.23i$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



Прийняти опір $R_2 = 0$ і, вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомим, визначити його за умовою резонансу струмів.



$$Z_{45} := \frac{(R_4 - i \cdot X_{C3}) \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 - i \cdot X_{C3} + i \cdot X_{L3}}$$

$$Z_{45} = 39.478 - 6.444i$$

$$Z_E := R_3 + i \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + Z_{45}$$

$$Z_E = 54.478 + 18.556i$$

$$Z_E = R_E - j \cdot X_E$$

$$R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 54.478$$

$$X_E := \operatorname{Im}(Z_E)$$

$$X_E = 18.556$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2}$$

$$B_n = -5.602 \times 10^{-3}$$

$$\text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n}$$

$$X_n = -178.494$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола

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

$$Z_1 = 11 + 30i$$

$$Z_3 := R_3 + X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i$$

$$Z_3 = 15 + 25i$$

$$Z_4 := R_4 - X_{C3} \cdot i$$

$$Z_4 = 17 - 20i$$

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

$$Z_5 = 40i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 \quad Z_{345} = 54.478 + 18.556i$$

$$\text{Вхідний опір кола: } Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(281270 \cdot X_N + 45114 \cdot X_N^2 + 25102550 + 3049150 \cdot i \cdot X_N + 33455 \cdot i \cdot X_N^2 + 68461500 \cdot i)}{(2282050 + 25570 \cdot X_N + 689 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left(\begin{array}{l} -40.063405764817734505 \\ -51.078426547243242927 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

$$\text{Отже резонанс кола буде при таких активних опорах у другій вітці: } X_N = \begin{pmatrix} -40.063 \\ -51.078 \end{pmatrix}$$

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -40.063$$

$$Z_{VX}(X_n) = 36.49$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)}$$

$$I_1 = 2.192 - 3.797i$$

$$F(I_1) = (4.385 \quad -60)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n}$$

$$I_2 = 4.058 - 1.449i$$

$$F(I_2) = (4.309 \quad -19.646)$$

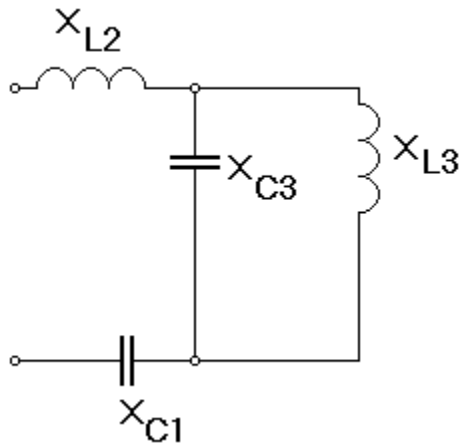
$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -1.865 - 2.349i$$

$$F(I_3) = (2.999 \quad -128.456)$$

$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5}$	$I_4 = 0.152 - 4.568i$	$F(I_4) = (4.571 \quad -88.092)$
$I_5 := I_3 - I_4$	$I_5 = -2.018 + 2.219i$	$F(I_5) = (2.999 \quad 132.273)$
$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$	$S_1 = 701.56$	
$P := \left(I_1 \right)^2 \cdot R_1 + \left(I_3 \right)^2 \cdot R_3 + \left(I_4 \right)^2 \cdot R_4$	$P = 701.56$	
$Q := \left(I_1 \right)^2 \cdot X_{L1} + \left(I_2 \right)^2 \cdot X_n + \left(I_3 \right)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + \left(I_4 \right)^2 \cdot (-X_{C3}) + \left(I_5 \right)^2 \cdot X_{L3}$		
$Q = 3.411 \times 10^{-13}$		
При $X_n := X_{N_1}$	$X_n = -51.078$	$Z_{VX}(X_n) = 46.308$
$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)}$	$I_1 = 1.728 - 2.992i$	$F(I_1) = (3.455 \quad -60)$
$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n}$	$I_2 = 3.083 - 0.563i$	$F(I_2) = (3.134 \quad -10.354)$
$I_3 := I_1 - I_2$	$I_3 = -1.355 - 2.429i$	$F(I_3) = (2.782 \quad -119.163)$
$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5}$	$I_4 = 0.823 - 4.158i$	$F(I_4) = (4.239 \quad -78.799)$
$I_5 := I_3 - I_4$	$I_5 = -2.179 + 1.729i$	$F(I_5) = (2.782 \quad 141.566)$
$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$	$S_1 = 552.822$	$P := \left(I_1 \right)^2 \cdot R_1 + \left(I_3 \right)^2 \cdot R_3 + \left(I_4 \right)^2 \cdot R_4$
		$P = 552.822$
$Q := \left(I_1 \right)^2 \cdot X_{L1} + \left(I_2 \right)^2 \cdot X_n + \left(I_3 \right)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + \left(I_4 \right)^2 \cdot (-X_{C3}) + \left(I_5 \right)^2 \cdot X_{L3}$		
$Q = 1.137 \times 10^{-13}$		

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{7}{20 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.111$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{2}{5 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.127$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \rightarrow \frac{1}{1000 \cdot \pi} \quad C_1 = 3.183 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{2000 \cdot \pi} \quad C_3 = 1.592 \times 10^{-4}$$

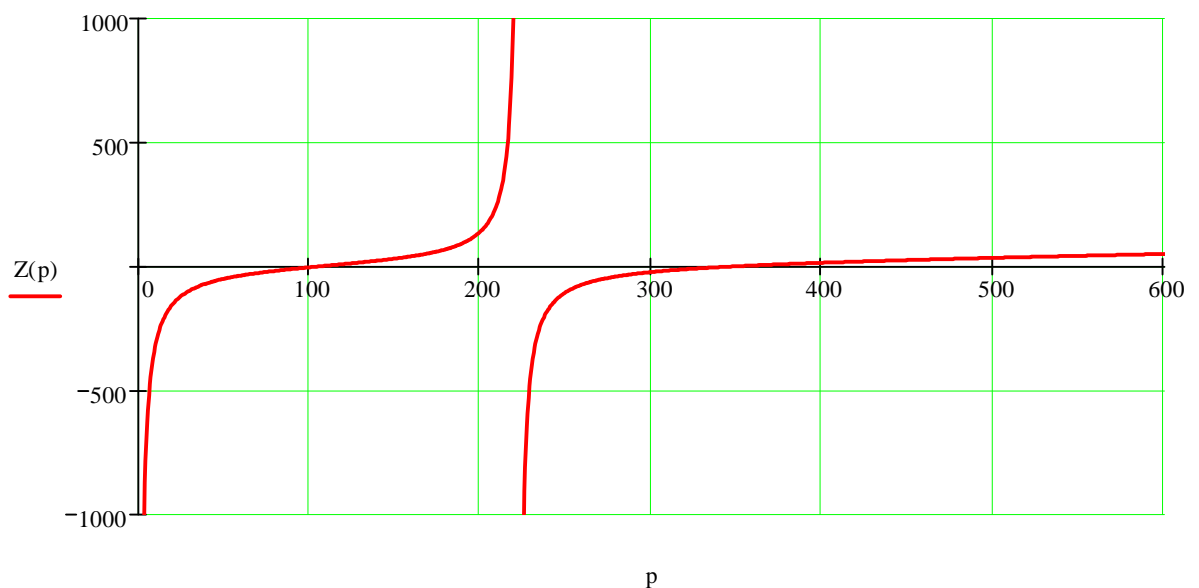
$$Z(p) := \frac{p \cdot L_3 \cdot \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 + \frac{-1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2 + \frac{-1}{p \cdot C_1} \rightarrow \frac{-800}{\left(\frac{2}{5} \cdot \frac{p}{\pi} - \frac{2000}{p} \cdot \pi\right)} + \frac{7}{20} \cdot \frac{p}{\pi} - \frac{1000}{p} \cdot \pi$$

Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 16} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 350.1337571745304 \\ -350.1337571745304 \\ 106.5409932584084 \\ -106.5409932584084 \end{pmatrix} \omega = \begin{pmatrix} 350.134 \\ -350.134 \\ 106.541 \\ -106.541 \end{pmatrix} \quad \omega := \begin{pmatrix} \omega_0 \\ \omega_2 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 350.134 \\ 106.541 \end{pmatrix}$$

Знаходимо полюси:

$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \text{ solve, p} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{50 \cdot 2^2 \cdot \pi} \\ \frac{1}{-50 \cdot 2^2 \cdot \pi} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 222.144 \\ -222.144 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{10} \\ \omega_{12} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 222.144 \\ 0 \end{pmatrix}$$



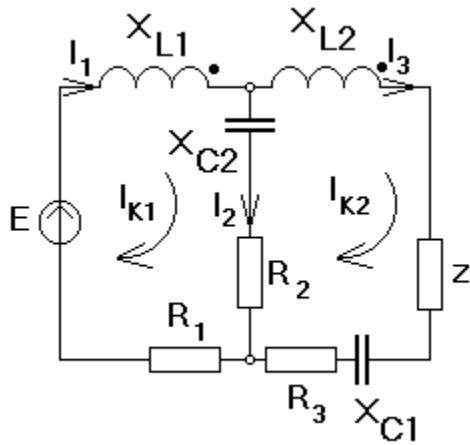
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 T/ L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

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



$$Z := \frac{(R_4 - j \cdot X_{C3}) \cdot j \cdot X_{L3}}{R_4 + j \cdot (X_{L3} - X_{C3})} \quad Z = 39.478 - 6.444i$$

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

$$Z_{22} := Z + R_3 + j \cdot (X_{L2} - X_{C1} - X_{C2}) + R_2$$

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

$$Z_{11} = 24 + 15i \quad Z_{22} = 67.478 + 3.556i \quad Z_{12} = 13 - 35i$$

Given

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \quad \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -0.252374583 - 3.264090805 \cdot i \\ -1.763021874 - 0.4050383871 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = -0.252 - 3.264i \quad I_{K2} = -1.763 - 0.405i$$

$$I_1 := I_{K1} \quad I_1 = -0.252 - 3.264i \quad F(I_1) = (3.274 \quad -94.421)$$

$$I_2 := I_{K1} - I_{K2} \quad I_2 = 1.511 - 2.859i \quad F(I_2) = (3.234 \quad -62.149)$$

$$I_3 := I_{K2} \quad I_3 = -1.763 - 0.405i \quad F(I_3) = (1.809 \quad -167.061)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{j \cdot X_{L3}}{R_4 + j \cdot (X_{L3} - X_{C3})} \quad I_4 = -1.647 - 2.21i \quad F(I_4) = (2.757 \quad -126.697)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -0.116 + 1.805i \quad F(I_5) = (1.809 \quad 93.668)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа: $I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad I_2 + I_4 + I_5 - I_1 = 0$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + j \cdot (X_{L1} + X_M)] + U - I_2 \cdot [R_2 - j \cdot (X_{C2} + X_M)] = 6.5 \times 10^{-9} + 1.719i \times 10^{-8}$$

$$-I_2 \cdot [R_2 - j \cdot (X_{C2} + X_M)] + I_3 \cdot [R_3 + j \cdot (X_{L2} - X_{C1} + X_M)] + I_4 \cdot (R_4 - j \cdot X_{C3}) = -2.193 \times 10^{-8} - 1.889i \times 10^{-8}$$

$$I_4 \cdot (R_4 - j \cdot X_{C3}) - I_5 \cdot j \cdot X_{L3} = 1.776i \times 10^{-15}$$

$$S_{M1} := \bar{I}_1 \cdot I_3 \cdot X_M \quad S_{M1} = 35.34 - 113.049i \quad F(S_{M1}) = (118.444 \quad -72.64)$$

$$S_{M2} := I_1 \cdot \bar{I}_3 \cdot X_M \quad S_{M2} = 35.34 + 113.049i \quad F(S_{M2}) = (118.444 \quad 72.64)$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S = 432.096 + 296.097i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_4|)^2 \cdot R_4$$

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

$$S = 432.096 + 296.097i$$

$$P = 432.096$$

$$Q = 296.097$$

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

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

$$F(\phi_b) = (36.012 \quad -94.421)$$

$$\phi_b = -2.776 - 35.905i$$

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

$$F(\phi_c) = (74.993 \quad -77.006)$$

$$\phi_c = 16.862 - 73.073i$$

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

$$F(\phi_d) = (99.206 \quad -105.208)$$

$$\phi_d = -26.023 - 95.732i$$

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

$$F(\phi_{1''}) = (132.213 \quad -97.791)$$

$$\phi_{1''} = -17.923 - 130.993i$$

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

$$F(\phi_1) = (160 \quad -60)$$

$$\phi_1 = 80 - 138.564i$$

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

$$F(\phi_A) = (1.838 \times 10^{-8} \quad -110.713)$$

$$\phi_A = -6.5 \times 10^{-9} - 1.719i \times 10^{-8}$$

$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot R_3$$

$$F(\phi_e) = (51.149 \quad -124.841)$$

$$\phi_e = -29.221 - 41.981i$$

$$\phi_m := \phi_e + I_3 \cdot i \cdot (-X_{C1})$$

$$F(\phi_m) = (41.231 \quad -143.801)$$

$$\phi_m = -33.272 - 24.35i$$

$$\phi_z := \phi_m + I_3 \cdot \text{Re}(Z)$$

$$F(\phi_z) = (110.498 \quad -158.588)$$

$$\phi_z = -102.872 - 40.34i$$

$$\phi_k := \phi_z + I_3 \cdot i \cdot \text{Im}(Z)$$

$$F(\phi_k) = (109.39 \quad -164.638)$$

$$\phi_k = -105.482 - 28.979i$$

$$\phi_{d'} := \phi_k + I_1 \cdot i \cdot X_M$$

$$F(\phi_{d'}) = (52.667 \quad -139.754)$$

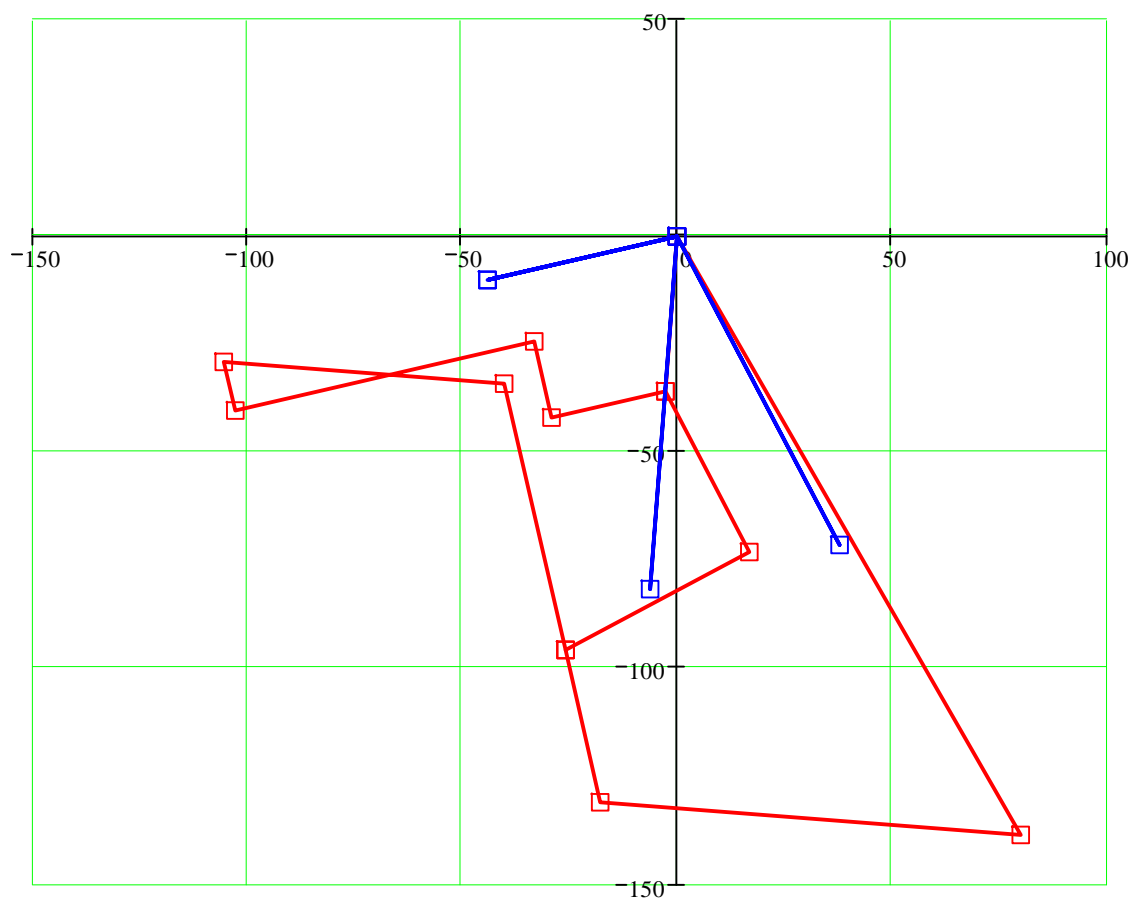
$$\phi_{d'} = -40.2 - 34.027i$$

$$\phi_d := \phi_{d'} + I_3 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$F(\phi_d) = (99.206 \quad -105.208)$$

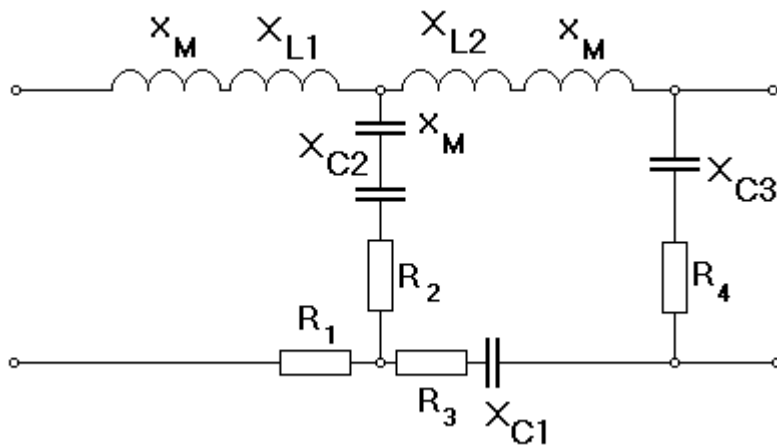
$$\phi_d = -26.023 - 95.732i$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



Відкинувши крайню вітку між полюсами 2,2", зробити розв'язку магнітного зв'язку. Одержану схему розглядати як чотириполюсник з полюсами 1,1" та 2,2":

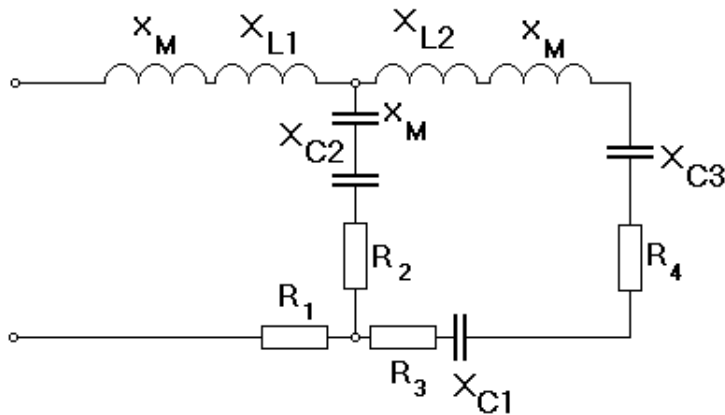
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника **A,B,C,D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_M + X_{L1}) \rightarrow 11 + 50 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 13 - 35 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C3} - X_{C1}) \rightarrow 32 + 25 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1$$

$$Z_{10} = 42.08 + 39.24i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_2 \cdot Z_1}{Z_2 + Z_1} + Z_3 \quad Z_{20} = 93.682 - 2.509i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}}$$

$$I_{10} = -0.626 - 2.71i$$

$$F(I_{10}) = (2.781 \quad -103)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

$$I_{30} = -2.118 - 0.767i$$

$$F(I_{30}) = (2.252 \quad -160.095)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) \quad U_{20} = -51.338 + 29.318i$$

$$F(U_{20}) = (59.12 \quad 150.27)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

$$A = -2.337 + 1.364i$$

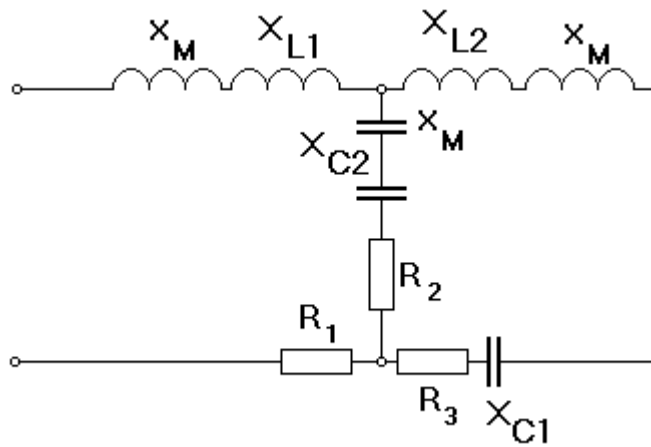
$$F(A) = (2.706 \quad 149.73)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}}$$

$$C = -0.014 + 0.045i$$

$$F(C) = (0.047 \quad 106.73)$$

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M) \rightarrow 11 + 50 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 13 - 35 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + i \cdot (X_{L2} - X_{C1} + X_M) \rightarrow 15 + 45 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 67.742 + 31.87i$$

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

$$I_{1K} = 0.179 - 2.13i$$

$$F(I_{1K}) = (2.137 \quad -85.201)$$

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

$$I_{3K} = -2.671 - 0.258i$$

$$F(I_{3K}) = (2.684 \quad -174.478)$$

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

$$B = -24.703 + 54.261i$$

$$F(B) = (59.62 \quad 114.478)$$

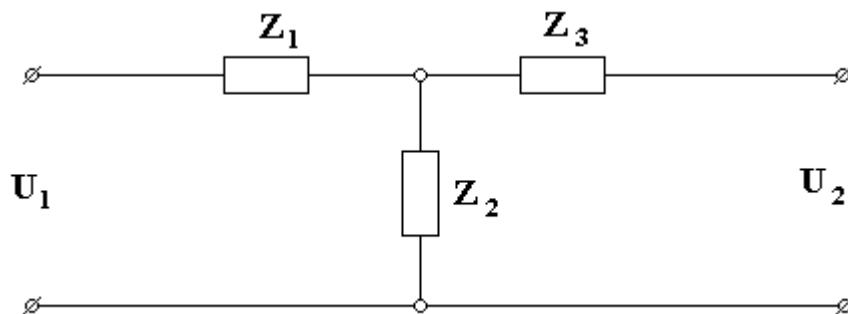
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}}$$

$$D = 0.01 + 0.796i$$

$$F(D) = (0.796 \quad 89.277)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

Расчитать параметры R,L,C T - схемы замещения.



$$Z_1 := \frac{A - 1}{C}$$

$$Z_1 = 48.2 + 59.6i$$

$$F(Z_1) = (76.651 \quad 51.037)$$

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

$$Z_2 = 13 - 35i$$

$$F(Z_2) = (37.336 \quad -69.624)$$

$$Z_3 := \frac{D - 1}{C}$$

$$Z_3 = 22.271 + 15.282i$$

$$F(Z_3) = (27.01 \quad 34.458)$$

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

$$R_1 = 48.2$$

$$X_1 := \text{Im}(Z_1)$$

$$X_1 = 59.6$$

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

$$R_2 = -6.12$$

$$X_2 := \text{Im}(Z_2)$$

$$X_2 = -20.36$$

$$R_3 := \text{Re}(Z_3)$$

$$R_3 = 22.271$$

$$X_3 := \text{Im}(Z_3)$$

$$X_3 = 15.282$$

$$L_1 := \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$C := -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_2}$$

$$L_2 := \frac{X_3}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L_1 = 0.19$$

$$C = 1.563 \times 10^{-4}$$

$$L_2 = 0.049$$