

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 423

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; визначити покази вольтметра;
- 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 закоротити.

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, 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).

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" :

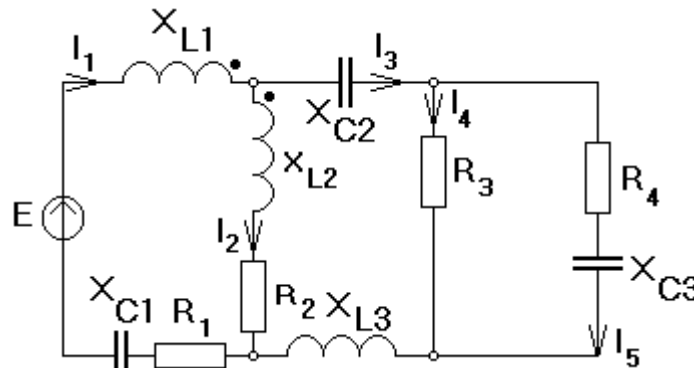
3.1 Розрахувати коефіцієнти чотирьохполосника **A,B,C,D**;

3.2 Розрахувати параметри R,L,C віток схеми ("Т" чи "П") заміщення.

$$E := 160 \quad \psi := -60 \quad R_1 := 11 \quad R_2 := 13 \quad R_3 := 15 \quad R_4 := 17 \quad X_{L1} := 35 \quad X_{L2} := 40 \quad X_{L3} := 45$$

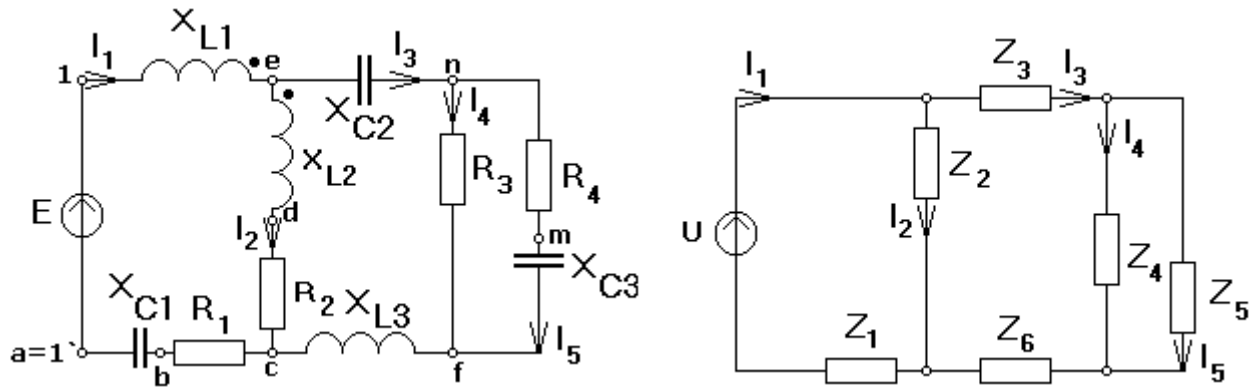
$$X_{C1} := 15 \quad X_{C2} := 20 \quad X_{C3} := 25 \quad X_M := 23 \quad f := 60$$

$$U := E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} \quad U = 80 - 138.564i \quad F(U) = (160 \quad -60)$$



Для електричного кола без взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символьним методом



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 11 + 20 \cdot i$$

$$Z_4 := R_3 \rightarrow 15$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2}) \rightarrow 13 + 40 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 17 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := -i \cdot X_{C2} \rightarrow -20 \cdot i$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L3} \rightarrow 45 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 17.053 + 34.099i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E}$$

$$I_1 = -2.312 - 3.502i$$

$$F(I_1) = (4.197 \quad -123.431)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6}$$

$$I_2 = -0.956 - 1.195i$$

$$F(I_2) = (1.531 \quad -128.66)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left(Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}$$

$$I_3 = -1.356 - 2.307i$$

$$F(I_3) = (2.676 \quad -120.441)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4}$$

$$I_4 = -1.486 - 1.327i$$

$$F(I_4) = (1.992 \quad -138.227)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5}$$

$$I_5 = 0.318 - 0.765i$$

$$F(I_5) = (0.828 \quad -67.451)$$

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

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) = -7.105 \times 10^{-15} + 7.105i \times 10^{-15}$$

$$I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) - I_4 \cdot R_3 - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2} + i \cdot X_{L3}) = 7.105 \times 10^{-15} - 7.105i \times 10^{-15}$$

$$I_4 \cdot R_3 - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = 3.553i \times 10^{-15}$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 300.331 + 600.554i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 300.331$$

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

$$Q = 600.554$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1})$$

$$\phi_b = -52.535 + 34.681i$$

$$F(\phi_b) = (62.95 \quad 146.569)$$

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

$$\phi_c = -77.967 - 3.845i$$

$$F(\phi_c) = (78.062 \quad -177.177)$$

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

$$\phi_d = -90.401 - 19.386i$$

$$F(\phi_d) = (92.456 \quad -167.897)$$

$$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$\phi_e = -42.581 - 57.642i$$

$$F(\phi_e) = (71.664 \quad -126.454)$$

$$\phi_1 := \phi_e + I_1 \cdot i \cdot X_{L1}$$

$$\phi_1 = 80 - 138.564i$$

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

$$\phi_{1'} := \phi_1 - U$$

$$\phi_{1'} = 1.421 \times 10^{-14}$$

$$\phi_f := \phi_c + I_3 \cdot i \cdot X_{L3}$$

$$\phi_f = 25.84 - 64.849i$$

$$F(\phi_f) = (69.808 \quad -68.274)$$

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

$$\phi_n = 22.129 - 64.811i$$

$$F(\phi_n) = (68.485 \quad -71.148)$$

$$\phi_m := \phi_f + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3})$$

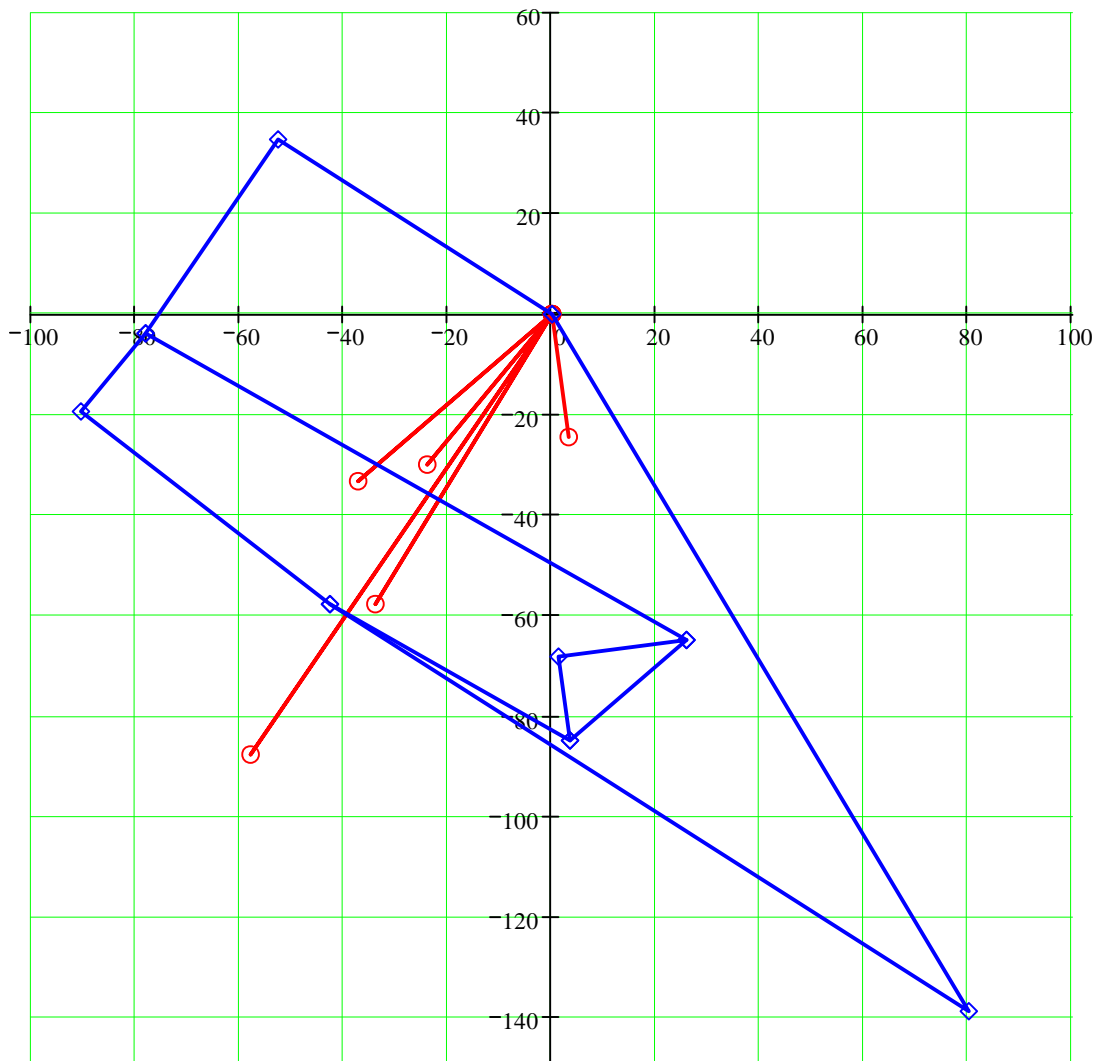
$$\phi_m = 1.346 - 68.099i$$

$$F(\phi_m) = (68.112 \quad -88.868)$$

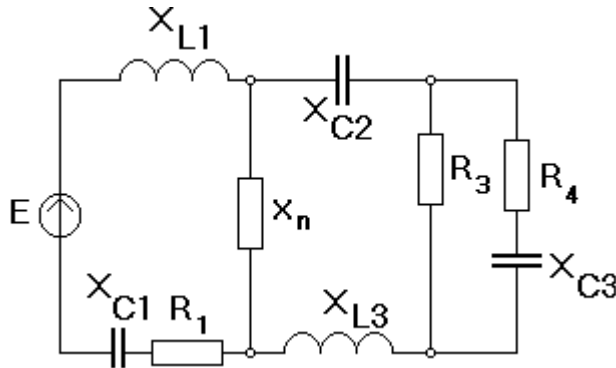
$$\phi_n := \phi_m + I_5 \cdot R_4$$

$$\phi_n = 3.555 - 84.755i$$

$$F(\phi_n) = (84.83 \quad -87.598)$$



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



$$Z_E := \frac{R_3 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (-X_{C3})} - i \cdot (X_{C2} + X_{L3}) \quad Z_E = 10.634 - 68.411i$$

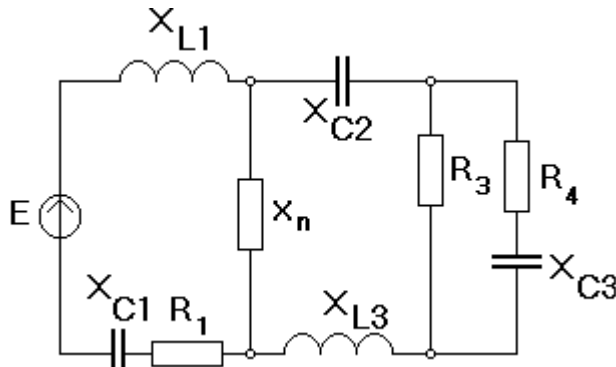
$$Z_E = R_E - j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 10.634 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = -68.411$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = 0.014 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = 70.064$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$Z_1 := R_1 - X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i \quad Z_1 = 11 + 20i$$

$$Z_3 := -X_{C2} \cdot i + X_{L3} \cdot i \quad Z_3 = 25i$$

$$Z_4 := R_3 \quad Z_4 = 15$$

$$Z_5 := R_4 - X_{C3} \cdot i \quad Z_5 = 17 - 25i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 \quad Z_{345} = 10.634 + 21.589i$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(783200 \cdot X_N + 35674 \cdot X_N^2 + 10505275 + 2379025 \cdot i \cdot X_N + 68580 \cdot i \cdot X_N^2 + 19100500 \cdot i)}{(955025 + 71200 \cdot X_N + 1649 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left(\begin{array}{l} -12.619316557104725517 \\ -22.070461803933478042 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N_0} \\ X_{N_1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -12.619 \\ -22.07 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N_0} = -12.619$). ($X_{N_1} = -22.07$)

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = -12.619 \quad Z_{VX}(X_n) = 19.75$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 4.051 - 7.016i \quad F(I_1) = (8.101 \quad -60)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 11.284 - 8.311i \quad F(I_2) = (14.014 \quad -36.37)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -7.234 + 1.295i \quad F(I_3) = (7.349 \quad 169.852)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -4.834 + 2.563i \quad F(I_4) = (5.471 \quad 152.067)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -2.4 - 1.268i \quad F(I_5) = (2.715 \quad -152.149)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 1.296 \times 10^3$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.296 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L3} - X_{C2}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 3.126 \times 10^{-13}$$

При $X_n := X_{N1} \quad X_n = -22.07 \quad Z_{VX}(X_n) = 61.182$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 1.411 - 2.443i \quad F(I_1) = (2.821 \quad -60)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 6.339 + 0.708i \quad F(I_2) = (6.378 \quad 6.37)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -4.928 - 3.151i \quad F(I_3) = (5.849 \quad -147.407)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -4.21 - 1.113i \quad F(I_4) = (4.355 \quad -165.192)$$

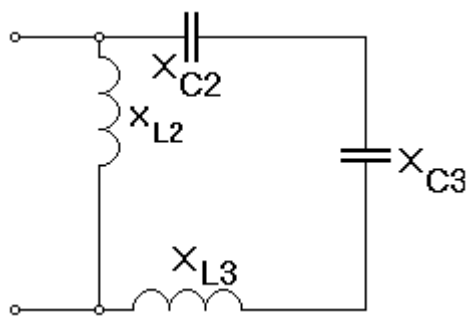
$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -0.718 - 2.038i \quad F(I_5) = (2.161 \quad -109.408)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 451.389$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 451.389$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L3} - X_{C2}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = -2.274 \times 10^{-13}$$

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



$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{3}{8 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.119$$

$$C_2 := \frac{1}{X_{C2} \cdot \omega} \rightarrow \frac{1}{2400 \cdot \pi} \quad C_2 = 1.326 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi} \quad C_3 = 1.061 \times 10^{-4}$$

$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{3 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.106$$

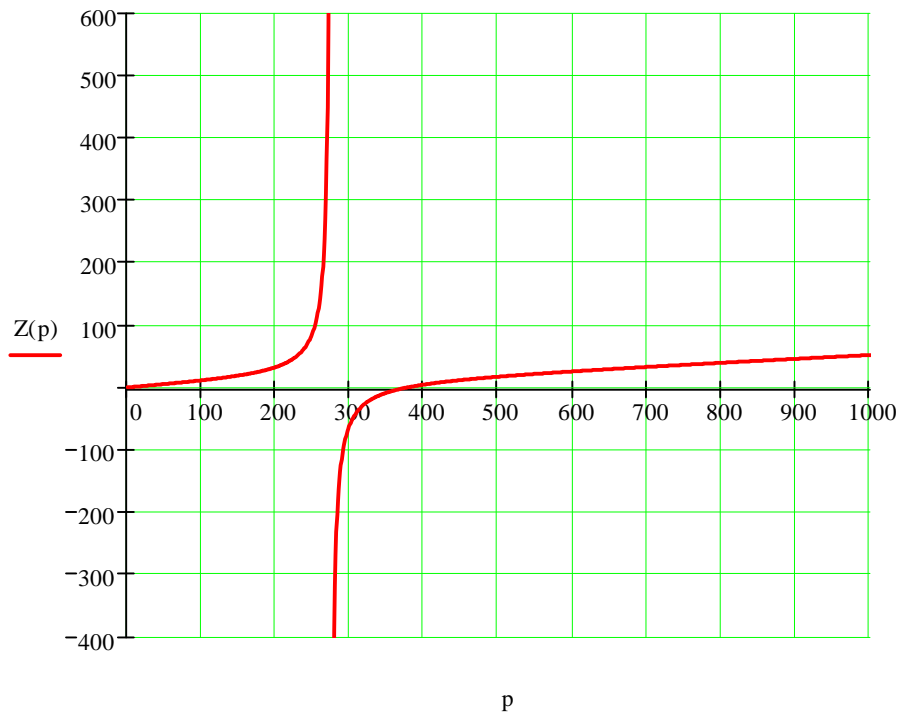
$$Z(p) := \frac{\left(\frac{-1}{C_2 \cdot p} - \frac{1}{C_3 \cdot p} + L_3 \cdot p \right) \cdot L_2 \cdot p}{L_2 \cdot p + \frac{-1}{C_2 \cdot p} - \frac{1}{C_3 \cdot p} + L_3 \cdot p} \rightarrow \frac{1}{3} \cdot \frac{\left(\frac{-5400}{p} \cdot \pi + \frac{3}{8} \cdot \frac{p}{\pi} \right)}{\pi} \cdot \frac{p}{\left(\frac{17}{24} \cdot \frac{p}{\pi} - \frac{5400}{p} \cdot \pi \right)}$$

Знаходимо нулі:

$$p' := Z(p) \text{ solve, } p \rightarrow \begin{pmatrix} 120 \cdot \pi \\ -120 \cdot \pi \\ 0 \end{pmatrix} \quad p' = \begin{pmatrix} 376.991 \\ -376.991 \\ 0 \end{pmatrix} \quad p' := \begin{pmatrix} p'_0 \\ p'_2 \end{pmatrix} \quad p' = \begin{pmatrix} 376.991 \\ 0 \end{pmatrix}$$

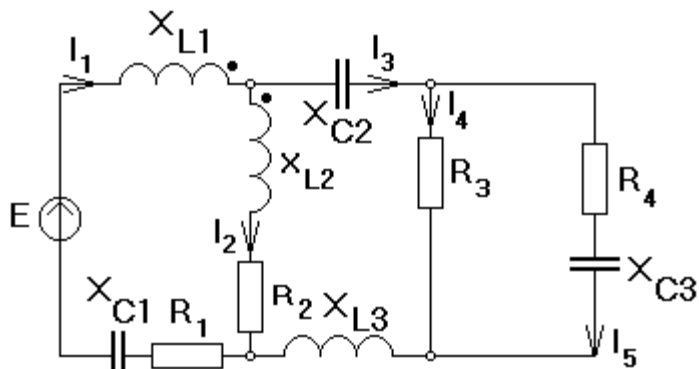
Знаходимо полюси:

$$p'' := \frac{1}{Z(p)} \text{ solve, } p \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{\frac{360}{17} \cdot 17^2 \cdot \pi} \\ \frac{-360}{17} \cdot 17^2 \cdot \pi \end{pmatrix} \quad p'' = \begin{pmatrix} 274.301 \\ -274.301 \end{pmatrix} \quad p'' := p''_0 \quad p'' = 274.301$$



При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;
- 3) Побудувати сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг



$$Z := \frac{(R_4 - i \cdot X_{C3}) \cdot R_3}{R_4 + R_3 + i \cdot (-X_{C3})}$$

$$Z = 10.634 - 3.411i$$

$$Z_{11} := R_1 + R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} + X_{L2} - 2 \cdot X_M) \rightarrow 24 + 14 \cdot i$$

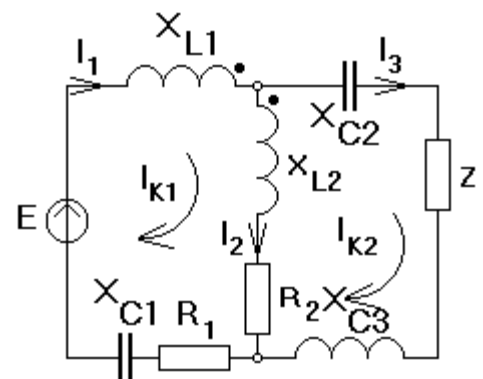
$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M) \rightarrow 13 + 17 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2} + X_{L3}) + Z \rightarrow \frac{38972}{1649} + \frac{101560}{1649} \cdot i$$

Given

$$I_{K1} \cdot Z_{11} - I_{K2} \cdot Z_{12} = U$$

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



$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \text{ float}, 15 \rightarrow \begin{pmatrix} .22852737554484 - 7.65520506913521 \cdot i \\ -.630561551924061 - 2.40322518564599 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 0.229 - 7.655i$$

$$I_{K2} = -0.631 - 2.403i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 0.229 - 7.655i$$

$$F(I_1) = (7.659 \quad -88.29)$$

$$I_2 := I_{K1} - I_{K2}$$

$$I_2 = 0.859 - 5.252i$$

$$F(I_2) = (5.322 \quad -80.71)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = -0.631 - 2.403i$$

$$F(I_3) = (2.485 \quad -104.702)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{R_4 - i \cdot X_{C3}}{R_4 + R_3 + i \cdot (-X_{C3})}$$

$$I_4 = -0.994 - 1.56i$$

$$F(I_4) = (1.85 \quad -122.488)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 0.363 - 0.843i$$

$$F(I_5) = (0.918 \quad -66.703)$$

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

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_M)] + U - I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M)] = -4.263 \times 10^{-14} + 1.99i \times 10^{-13}$$

$$I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M)] - I_4 \cdot R_3 - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2} + i \cdot X_M + i \cdot X_{L3}) = -1.137 \times 10^{-13} + 1.066i \times 10^{-13}$$

$$I_4 \cdot R_3 - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = -7.105 \times 10^{-15} - 3.553i \times 10^{-15}$$

$$S_{M1} := -I_1 \cdot \overline{I_2} \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M1} = -123.654 - 929.23i$$

$$F(S_{M1}) = (937.421 \quad -97.58)$$

$$S_{M2} := -I_1 \cdot I_2 \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M2} = 123.654 - 929.23i$$

$$F(S_{M2}) = (937.421 \quad -82.42)$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 1.079 \times 10^3 + 580.751i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 1.079 \times 10^3$$

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

$$Q := Q + S_{M1} + S_{M2}$$

$$Q = 580.751i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1})$$

$$\phi_b = -114.828 - 3.428i$$

$$F(\phi_b) = (114.879 \quad -178.29)$$

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

$$\phi_c = -112.314 - 87.635i$$

$$F(\phi_c) = (142.458 \quad -142.036)$$

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

$$\phi_d = -101.146 - 155.911i$$

$$F(\phi_d) = (185.846 \quad -122.973)$$

$$\phi_{d'} := \phi_d + I_2 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$\phi_{d'} = 108.933 - 121.547i$$

$$F(\phi_{d'}) = (163.218 \quad -48.133)$$

$$\phi_e := \phi_{d'} - I_1 \cdot i \cdot X_M$$

$$\phi_e = -67.137 - 126.803i$$

$$F(\phi_e) = (143.48 \quad -117.899)$$

$$\phi_{e'} := \phi_e - I_2 \cdot i \cdot X_M$$

$$\phi_{e'} = -187.932 - 146.563i$$

$$F(\phi_{e'}) = (238.326 \quad -142.05)$$

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

$$\phi_1 = 80 - 138.564i$$

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

$$\phi_{1'} := \phi_1 - U$$

$$\phi_{1'} = 4.263 \times 10^{-14} - 1.99i \times 10^{-13}$$

$$\phi_f := \phi_c + I_3 \cdot i \cdot X_{L3}$$

$$\phi_f = -4.169 - 116.01i$$

$$F(\phi_f) = (116.085 \quad -92.058)$$

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

$$\phi_n = -19.072 - 139.415i$$

$$F(\phi_n) = (140.713 \quad -97.79)$$

$$\phi_e := \phi_n + I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2})$$

$$\phi_e = -67.137 - 126.803i$$

$$F(\phi_e) = (143.48 \quad -117.899)$$

$$\phi_m := \phi_f + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3})$$

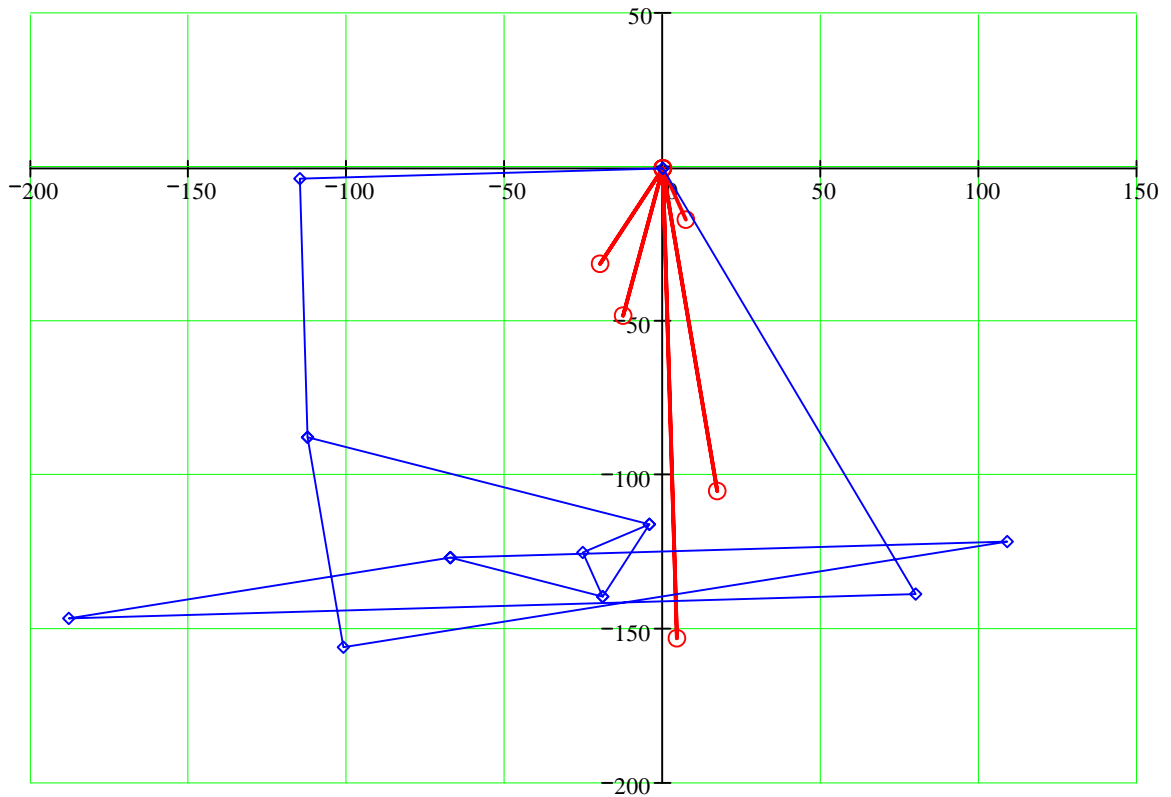
$$\phi_m = -25.243 - 125.085i$$

$$F(\phi_m) = (127.606 \quad -101.409)$$

$$\phi_n := \phi_m + I_5 \cdot R_4$$

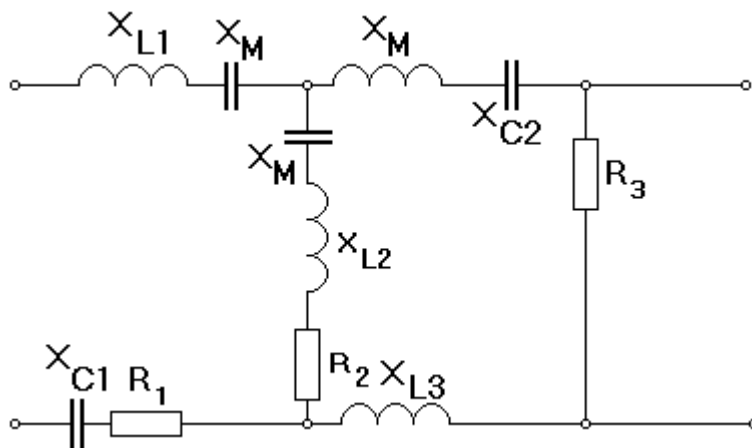
$$\phi_n = -19.072 - 139.415i$$

$$F(\phi_n) = (140.713 \quad -97.79)$$



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

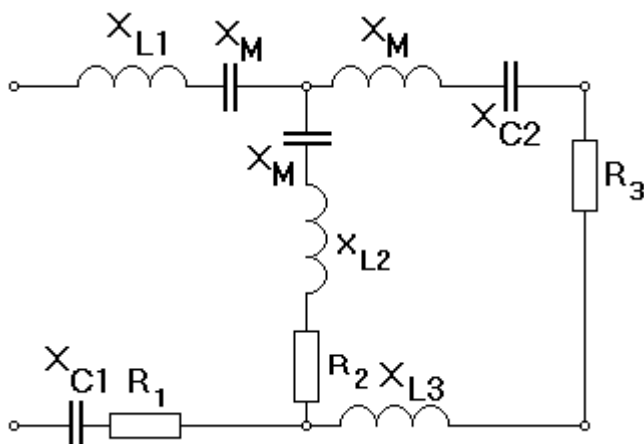
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника A, B, C, D



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_M - X_{C1}) \rightarrow 11 - 3 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M) \rightarrow 13 + 17 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C2} + X_M) \rightarrow 15 + 48 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 18.935 + 9.972i \quad Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 23.715 + 49.083i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 0.29 - 7.471i \quad F(I_{10}) = (7.476 \quad -87.773)$$

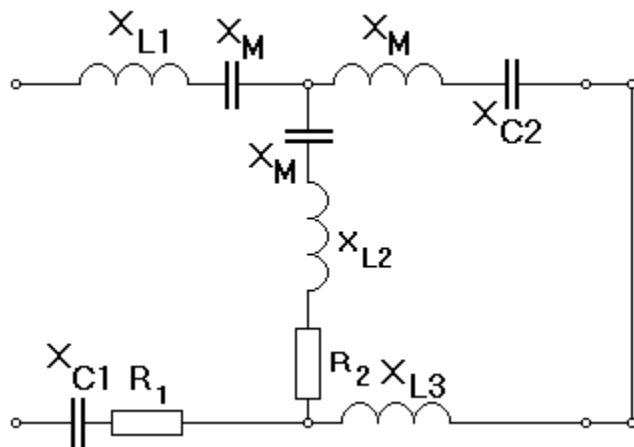
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -0.465 - 2.212i \quad F(I_{30}) = (2.261 \quad -101.874)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot R_3 \quad U_{20} = -6.977 - 33.186i \quad F(U_{20}) = (33.911 \quad -101.874)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 3.513 + 3.149i \quad F(A) = (4.718 \quad 41.874)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.214 + 0.054i \quad F(C) = (0.22 \quad 14.1)$$

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_M - X_{C1}) \rightarrow 11 - 3 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M) \rightarrow 13 + 17 \cdot i$$

$$Z_3 := i \cdot (X_{L3} - X_{C2} + X_M) \rightarrow 48 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 17.817 + 10.917i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = -0.2 - 7.655i \quad F(I_{1K}) = (7.657 \quad -91.498)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -1.145 - 2.191i \quad F(I_{3K}) = (2.472 \quad -117.593)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = 34.686 + 54.642i \quad F(B) = (64.721 \quad 57.593)$$

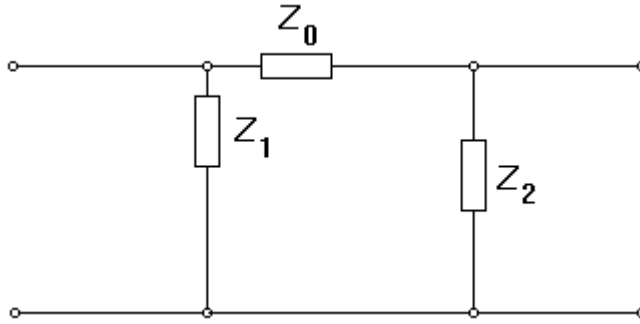
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = 2.782 + 1.362i \quad F(D) = (3.097 \quad 26.095)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (4.718 \quad 41.874) \quad F(B) = (59.241 \quad 58.701)$$

$$F(C) = (0.22 \quad 14.1) \quad F(D) = (3.097 \quad 26.095)$$

Розрахувати параметри R, L, C віток схеми "П" заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = 34.686 + 54.642i \quad F(Z_0) = (64.721 \quad 57.593)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.033 - 0.012i \quad F(Y_1) = (0.035 \quad -20.188)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.062 - 6.706i \times 10^{-3} \quad F(Y_2) = (0.062 \quad -6.184)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = 34.686 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 54.642$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 27.083 + 9.958i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 27.083 \quad X_{L1} := \operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{L1} = 9.958$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 15.969 + 1.73i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 15.969 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 1.73$$

$$L_1 := \frac{X_{L1}}{\omega} \quad L_1 = 0.026$$

$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 4.59 \times 10^{-3}$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.145$$

