

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 413

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).

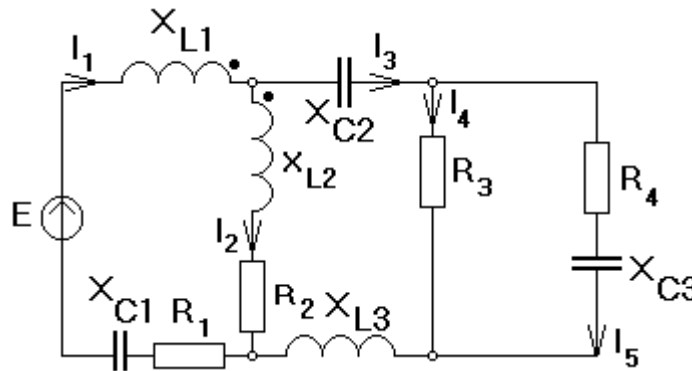
$$E := 160 \quad \psi := -60 \quad R_1 := 11 \quad R_2 := 13 \quad R_3 := 15 \quad R_4 := 17 \quad X_{L1} := 30 \quad X_{L2} := 35 \quad X_{L3} := 40$$

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

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

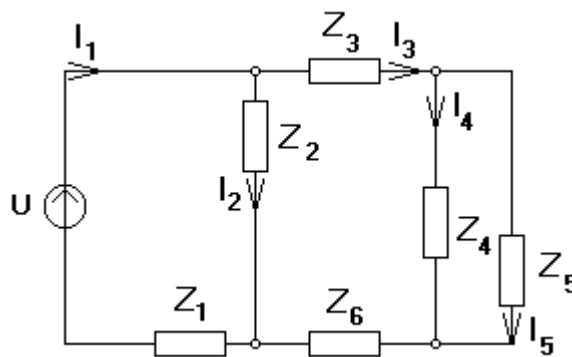
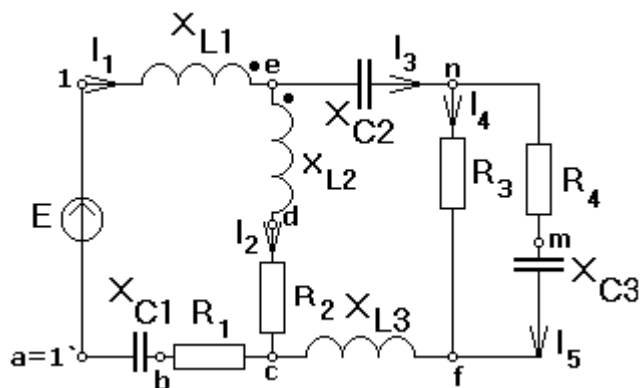
$$U = 80 - 138.564i$$

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



Для електричного кола без взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символьним методом



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

$$Z_4 := R_3 \rightarrow 15$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2}) \rightarrow 13 + 35 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 17 - 20 \cdot i$$

$$Z_3 := -i \cdot X_{C2} \rightarrow -15 \cdot i$$

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

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 16.682 + 33.467i$$

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

$$I_1 = -2.362 - 3.568i \quad F(I_1) = (4.279 \quad -123.506)$$

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

$$I_2 = -0.985 - 1.355i \quad F(I_2) = (1.675 \quad -126.004)$$

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

$$I_3 = -1.377 - 2.213i \quad F(I_3) = (2.606 \quad -121.901)$$

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

$$I_4 = -1.379 - 1.177i \quad F(I_4) = (1.813 \quad -139.531)$$

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

$$I_5 = 1.894 \times 10^{-3} - 1.036i \quad F(I_5) = (1.036 \quad -89.895)$$

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:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) = 2.132 \times 10^{-14} - 4.974i \times 10^{-14}$$

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

$$I_4 \cdot R_3 - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = 0$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 305.398 + 612.696i$$

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

$$P = 305.398$$

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

$$Q = 612.696$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -35.677 + 23.619i$$

$$F(\phi_b) = (42.787 \quad 146.494)$$

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

$$\phi_c = -61.658 - 15.625i$$

$$F(\phi_c) = (63.607 \quad -165.78)$$

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

$$\phi_d = -74.459 - 33.241i$$

$$F(\phi_d) = (81.543 \quad -155.942)$$

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

$$\phi_e = -27.031 - 67.706i$$

$$F(\phi_e) = (72.902 \quad -111.764)$$

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

$$\phi_1 = 80 - 138.564i$$

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

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

$$\phi_{1'} = -1.421 \times 10^{-14} + 5.684i \times 10^{-14}$$

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

$$\phi_f = 26.845 - 70.715i$$

$$F(\phi_f) = (75.639 \quad -69.212)$$

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

$$\phi_n = 6.158 - 88.365i$$

$$F(\phi_n) = (88.579 \quad -86.014)$$

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

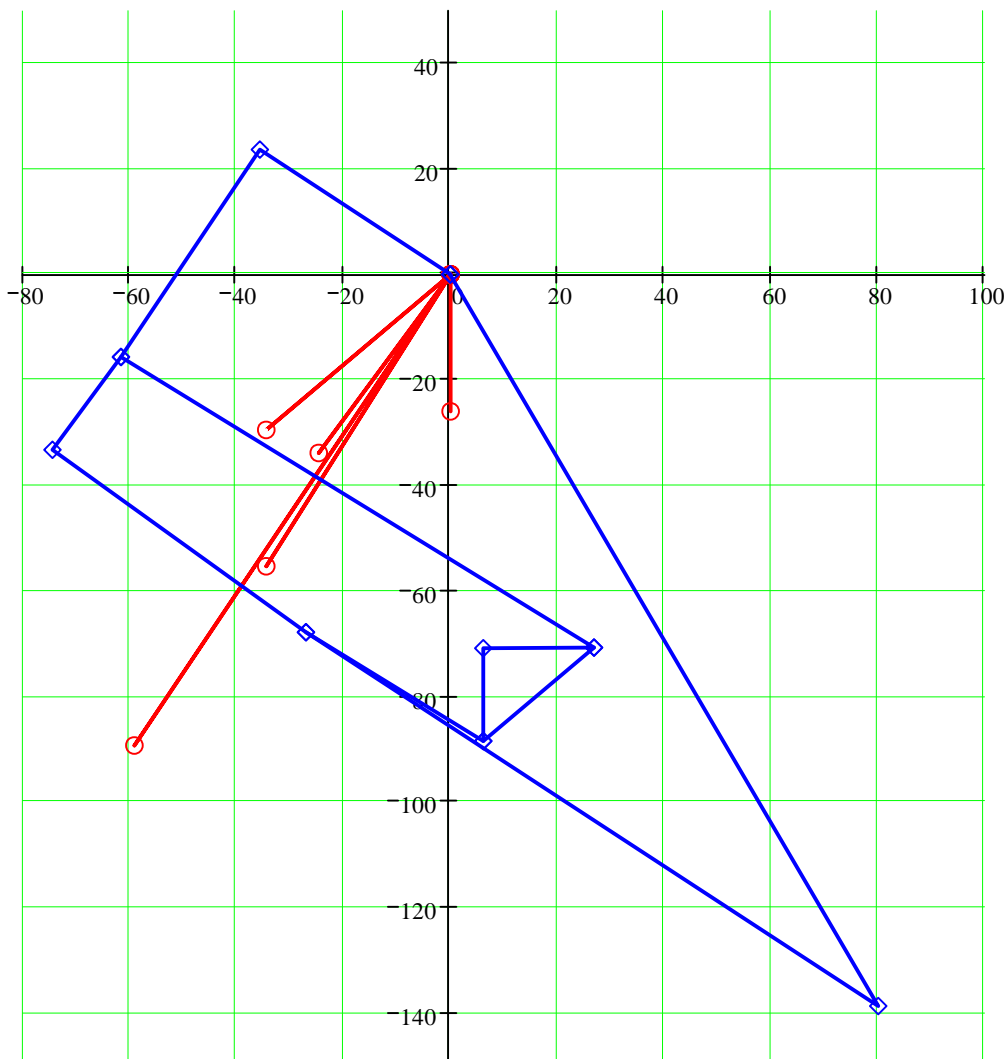
$$\phi_m = 6.126 - 70.753i$$

$$F(\phi_m) = (71.018 \quad -85.052)$$

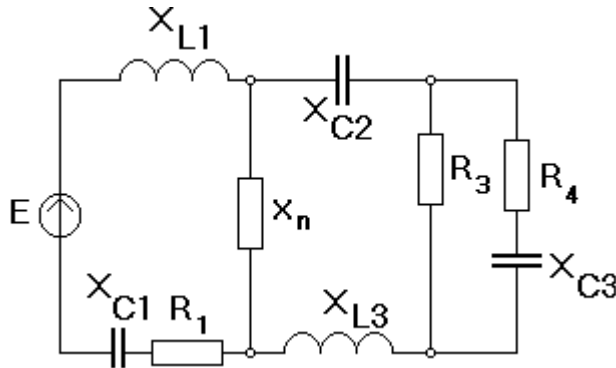
$$\phi_n := \phi_m + I_5 \cdot R_4$$

$$\phi_n = 6.158 - 88.365i$$

$$F(\phi_n) = (88.579 \quad -86.014)$$



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



$$Z_E := \frac{R_3 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (-X_{C3})} - i \cdot (X_{C2} + X_{L3}) \quad Z_E = 9.944 - 58.16i$$

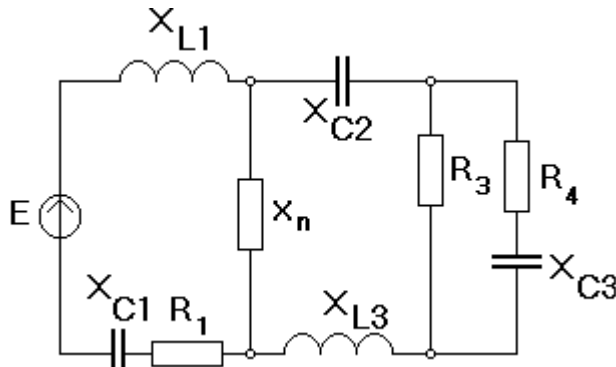
$$Z_E = R_E - j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 9.944 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = -58.16$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = 0.017 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = 59.86$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



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

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

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

$$Z_5 := R_4 - X_{C3} \cdot i \quad Z_5 = 17 - 20i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 \quad Z_{345} = 9.944 + 21.84i$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(684200 \cdot X_N + 29824 \cdot X_N^2 + 9020275 + 2064025 \cdot i \cdot X_N + 59580 \cdot i \cdot X_N^2 + 16400500 \cdot i)}{(820025 + 62200 \cdot X_N + 1424 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left(\begin{array}{l} -12.345076366348338612 \\ -22.297840719922221979 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N_0} \\ X_{N_1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -12.345 \\ -22.298 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N_0} = -12.345$). ($X_{N_1} = -22.298$)

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = -12.345 \quad Z_{VX}(X_n) = 19.017$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 4.207 - 7.286i \quad F(I_1) = (8.414 \quad -60)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 11.547 - 9.073i \quad F(I_2) = (14.685 \quad -38.157)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -7.34 + 1.786i \quad F(I_3) = (7.555 \quad 166.323)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -4.49 + 2.731i \quad F(I_4) = (5.255 \quad 148.693)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -2.851 - 0.944i \quad F(I_5) = (3.003 \quad -161.671)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 1.346 \times 10^3$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.346 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L3} - X_{C2}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = -3.979 \times 10^{-13}$$

При $X_n := X_{N1} \quad X_n = -22.298 \quad Z_{VX}(X_n) = 60.894$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 1.314 - 2.275i \quad F(I_1) = (2.627 \quad -60)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 6.27 + 0.899i \quad F(I_2) = (6.334 \quad 8.157)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -4.956 - 3.174i \quad F(I_3) = (5.886 \quad -147.363)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -3.954 - 1.06i \quad F(I_4) = (4.094 \quad -164.993)$$

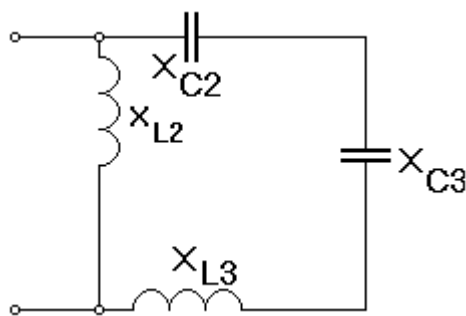
$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -1.002 - 2.114i \quad F(I_5) = (2.34 \quad -115.358)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 420.4$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 420.4$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L3} - X_{C2}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = -7.105 \times 10^{-14}$$

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



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

$$C_2 := \frac{1}{X_{C2} \cdot \omega} \rightarrow \frac{1}{1500 \cdot \pi} \quad C_2 = 2.122 \times 10^{-4}$$

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

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

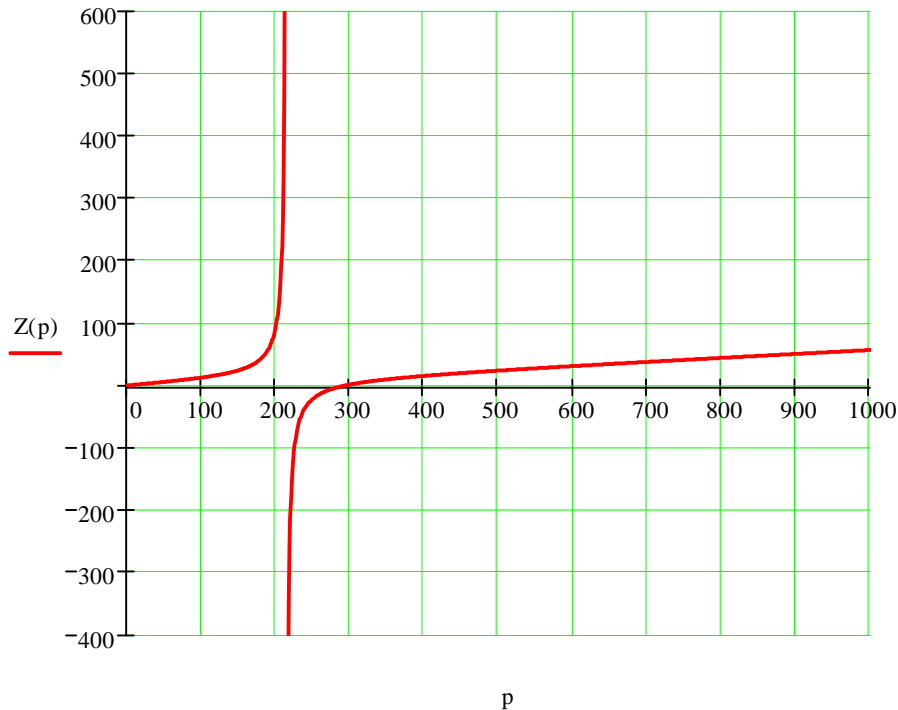
$$Z(p) := \frac{\left(\frac{-1}{C_2 \cdot p} - \frac{1}{C_3 \cdot p} + L_3 \cdot p \right) \cdot L_2 \cdot p}{L_2 \cdot p + \frac{-1}{C_2 \cdot p} - \frac{1}{C_3 \cdot p} + L_3 \cdot p} \rightarrow \frac{7}{20} \cdot \frac{\left(-3500 \cdot \frac{\pi}{p} + \frac{2}{5 \cdot \pi} \cdot p \right)}{\pi} \cdot \frac{p}{\left(\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot p - 3500 \cdot \frac{\pi}{p} \right)}$$

Знаходимо нулі:

$$p' := Z(p) \text{ solve, } p \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{25 \cdot 14^2 \cdot \pi} \\ \frac{1}{-25 \cdot 14^2 \cdot \pi} \\ 0 \end{pmatrix} \quad p' = \begin{pmatrix} 293.869 \\ -293.869 \\ 0 \end{pmatrix} \quad p' := \begin{pmatrix} p'_0 \\ p'_2 \end{pmatrix} \quad p' = \begin{pmatrix} 293.869 \\ 0 \end{pmatrix}$$

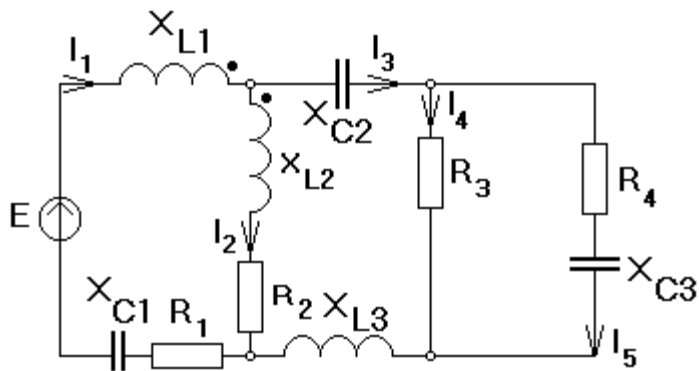
Знаходимо полюси:

$$p'' := \frac{1}{Z(p)} \text{ solve, } p \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{\frac{20}{3} \cdot 105^2 \cdot \pi} \\ \frac{-20}{3} \cdot 105^2 \cdot \pi \end{pmatrix} \quad p'' = \begin{pmatrix} 214.612 \\ -214.612 \end{pmatrix} \quad p'' := p''_0 \quad p'' = 214.612$$



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



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

$$Z = 9.944 - 3.16i$$

$$Z_{11} := R_1 + R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} + X_{L2} - 2 \cdot X_M) \rightarrow 24 + 15 \cdot i$$

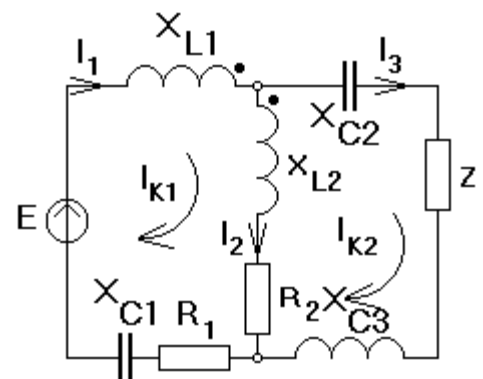
$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M) \rightarrow 13 + 15 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2} + X_{L3}) + Z \rightarrow \frac{2042}{89} + \frac{20235}{356} \cdot i$$

Given

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

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



$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \text{ float}, 15 \rightarrow \begin{pmatrix} -0.32530726764921 - 7.30589132970882 \cdot i \\ -0.867261682860205 - 2.20369315994894 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = -0.325 - 7.306i \quad I_{K2} = -0.867 - 2.204i$$

$$I_1 := I_{K1} \quad I_1 = -0.325 - 7.306i \quad F(I_1) = (7.313 \quad -92.55)$$

$$I_2 := I_{K1} - I_{K2} \quad I_2 = 0.542 - 5.102i \quad F(I_2) = (5.131 \quad -83.937)$$

$$I_3 := I_{K2} \quad I_3 = -0.867 - 2.204i \quad F(I_3) = (2.368 \quad -111.482)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{R_4 - i \cdot X_{C3}}{R_4 + R_3 + i \cdot (-X_{C3})} \quad I_4 = -1.039 - 1.278i \quad F(I_4) = (1.647 \quad -129.112)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = 0.172 - 0.926i \quad F(I_5) = (0.941 \quad -79.477)$$

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

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_M)] + U - I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M)] = 1.705 \times 10^{-13} + 3.766i \times 10^{-13}$$

$$I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M)] - I_4 \cdot R_3 - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2} + i \cdot X_M + i \cdot X_{L3}) = -2.558 \times 10^{-13} - 2.842i \times 10^{-14}$$

$$I_4 \cdot R_3 - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = -1.776 \times 10^{-15} + 3.553i \times 10^{-15}$$

$$S_{M1} := -I_1 \cdot \overline{I_2} \cdot i \cdot X_M \quad S_{M1} = -112.385 - 741.996i \quad F(S_{M1}) = (750.459 \quad -98.613)$$

$$S_{M2} := -I_1 \cdot I_2 \cdot i \cdot X_M \quad S_{M2} = 112.385 - 741.996i \quad F(S_{M2}) = (750.459 \quad -81.387)$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 986.309 + 629.547i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 986.309$$

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

$$Q := Q + S_{M1} + S_{M2} \quad Q = 629.547i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_b = -73.059 + 3.253i \quad F(\phi_b) = (73.131 \quad 177.45)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_1 \cdot R_1 \quad \phi_c = -76.637 - 77.112i \quad F(\phi_c) = (108.717 \quad -134.823)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_d = -69.592 - 143.44i \quad F(\phi_d) = (159.431 \quad -115.881)$$

$$\phi_{d'} := \phi_d + I_2 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_{d'} = 108.985 - 124.472i \quad F(\phi_{d'}) = (165.442 \quad -48.795)$$

$$\phi_e := \phi_{d'} - I_1 \cdot i \cdot X_M \quad \phi_e = -37.133 - 117.966i \quad F(\phi_e) = (123.672 \quad -107.473)$$

$$\phi_{e'} := \phi_e - I_2 \cdot i \cdot X_M \quad \phi_{e'} = -139.177 - 128.805i \quad F(\phi_{e'}) = (189.633 \quad -137.216)$$

$$\phi_1 := \phi_{e'} + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_1 = 80 - 138.564i \quad F(\phi_1) = (160 \quad -60)$$

$$\phi_{1'} := \phi_1 - U \quad \phi_{1'} = -1.279 \times 10^{-13} - 3.979i \times 10^{-13}$$

$$\phi_f := \phi_c + I_3 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_f = 11.51 - 111.802i \quad F(\phi_f) = (112.393 \quad -84.122)$$

$$\phi_n := \phi_f + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_n = -4.077 - 130.975i \quad F(\phi_n) = (131.038 \quad -91.783)$$

$$\phi_e := \phi_n + I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_e = -37.133 - 117.966i \quad F(\phi_e) = (123.672 \quad -107.473)$$

$$\phi_m := \phi_f + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_m = -7 - 115.241i \quad F(\phi_m) = (115.453 \quad -93.476)$$

$$\phi_n := \phi_m + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = -4.077 - 130.975i \quad F(\phi_n) = (131.038 \quad -91.783)$$

