

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 865

Виконав: _____

Перевірив: _____

Київ 2006

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 закоротити.

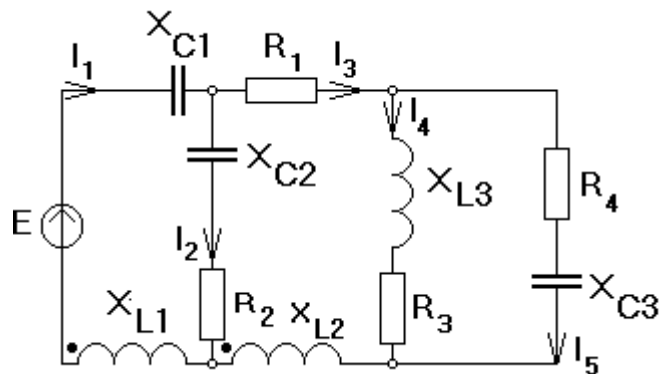
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L_1 ТА L_2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів;
- 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" :

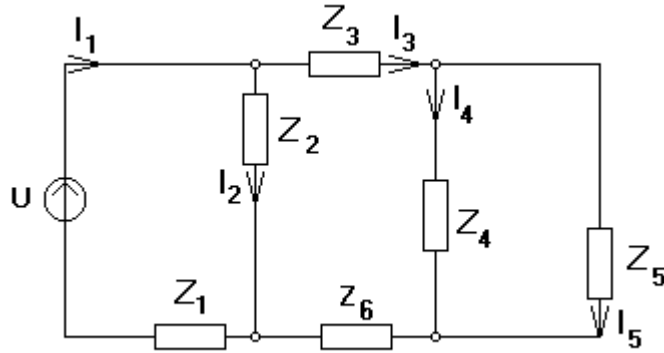
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти A, B, C, D чотиріполюсника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 240 & \psi &:= 70 & R_1 &:= 18 & R_2 &:= 16 & R_3 &:= 14 & R_4 &:= 12 \\ X_{L1} &:= 40 & X_{L2} &:= 35 & X_{L3} &:= 25 & X_{C1} &:= 15 & X_{C2} &:= 10 & X_{C3} &:= 8 \\ X_M &:= 20 & f &:= 50 & & & & & & & & \\ U &:= E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & U = 82.085 + 225.526i & F(U) = (240 \ 70) \end{aligned}$$



Для електричного кола без взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символьним методом



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 25 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 16 - 10 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 18$$

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 14 + 25 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 12 - 8 \cdot i$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L2} \rightarrow 35 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 16.064 + 21.744i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 8.514 + 2.515i \quad F(I_1) = (8.878 \quad 16.457)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} \quad I_2 = 6.159 + 4.642i \quad F(I_2) = (7.712 \quad 37.004)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left(Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)} \quad I_3 = 2.355 - 2.127i \quad F(I_3) = (3.173 \quad -42.083)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4} \quad I_4 = -0.478 - 1.393i \quad F(I_4) = (1.473 \quad -108.952)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad I_5 = 2.833 - 0.733i \quad F(I_5) = (2.927 \quad -14.511)$$

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:

$$-I_1 \cdot [i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) = -1.421i \times 10^{-14}$$

$$I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (R_1 + i \cdot X_{L2}) = 7.105i \times 10^{-15}$$

$$I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = -3.553i \times 10^{-15}$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 1.266 \times 10^3 + 1.714i \times 10^3$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 1.266 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 1.714 \times 10^3$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_b = -100.599 + 340.558i \quad F(\phi_b) = (355.106 \quad 106.457)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = -2.057 + 414.825i \quad F(\phi_c) = (414.83 \quad 90.284)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_d = 44.36 + 353.235i \quad F(\phi_d) = (356.01 \quad 82.842)$$

$$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_1 = 82.085 + 225.526i \quad F(\phi_1) = (240 \quad 70)$$

$$\phi_{1'} := \phi_1 - U \quad \phi_{1'} = 2.842i \times 10^{-14}$$

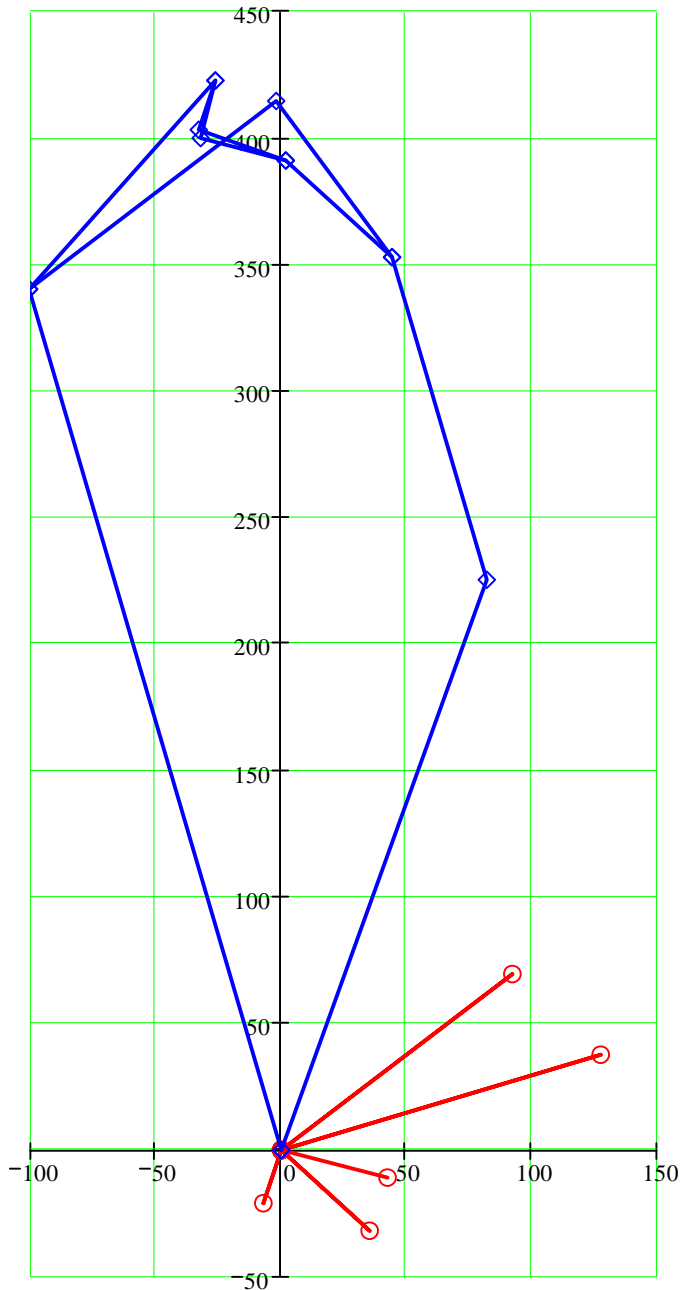
$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_e = -26.165 + 422.984i \quad F(\phi_e) = (423.792 \quad 93.54)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_m = -32.864 + 403.477i \quad F(\phi_m) = (404.813 \quad 94.657)$$

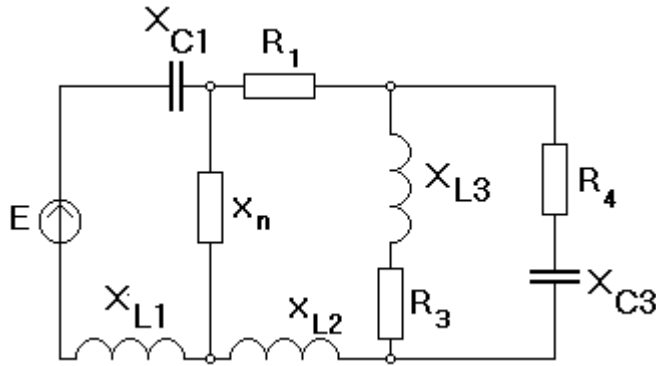
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_n = 1.97 + 391.516i \quad F(\phi_n) = (391.521 \quad 89.712)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_k = -32.032 + 400.316i \quad F(\phi_k) = (401.596 \quad 94.575)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = 1.97 + 391.516i \quad F(\phi_n) = (391.521 \quad 89.712)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 31.227 + 33.582i$$

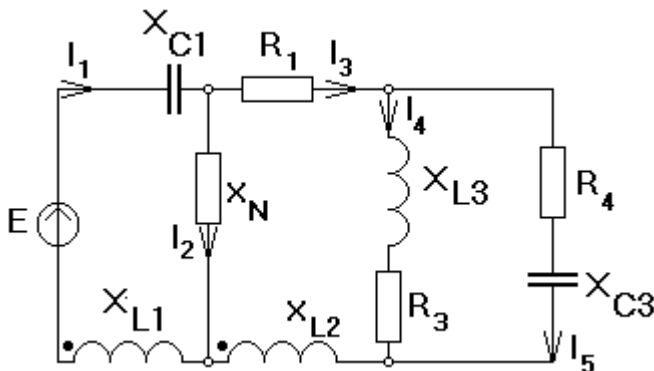
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \text{Re}(Z_E) \quad R_E = 31.227 \quad X_E := \text{Im}(Z_E) \quad X_E = 33.582$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.016 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -62.619$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 25i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 18 + 35i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 14 + 25i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 12 - 8i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 31.227 + 33.582i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(30134 \cdot X_N^2 + 3649647 \cdot i \cdot X_N + 56532 \cdot i \cdot X_N^2 + 50732425 \cdot i)}{(2029297 + 64814 \cdot X_N + 965 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left(\begin{array}{l} -20.256417779587008894 \\ -44.302539978850690108 \end{array} \right) \quad X_N := \left(\begin{array}{l} X_{N0} \\ X_{N1} \end{array} \right)$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -20.256 \\ -44.303 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N0} = -20.256$). ($X_{N1} = -44.303$)

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -20.256 \quad Z_{VX}(X_n) = 11.116$$

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

$$I_1 = 7.385 + 20.289i$$

$$F(I_1) = (21.591 \quad 70)$$

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

$$I_2 = -2.02 + 29.092i$$

$$F(I_2) = (29.162 \quad 93.971)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 9.404 - 8.803i$$

$$F(I_3) = (12.882 \quad -43.11)$$

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

$$I_4 = -2.043 - 5.621i$$

$$F(I_4) = (5.981 \quad -109.979)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 11.448 - 3.183i$$

$$F(I_5) = (11.882 \quad -15.537)$$

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

$$S_1 = 5.182 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 5.182 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 2.956 \times 10^{-12}$$

При $X_n := X_{N1} \quad X_n = -44.303 \quad Z_{VX}(X_n) = 56.227$

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

$$I_1 = 1.46 + 4.011i$$

$$F(I_1) = (4.268 \quad 70)$$

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

$$I_2 = -4.267 + 4.116i$$

$$F(I_2) = (5.929 \quad 136.029)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 5.727 - 0.105i$$

$$F(I_3) = (5.728 \quad -1.053)$$

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

$$I_4 = 1 - 2.464i$$

$$F(I_4) = (2.659 \quad -67.921)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 4.727 + 2.359i$$

$$F(I_5) = (5.283 \quad 26.52)$$

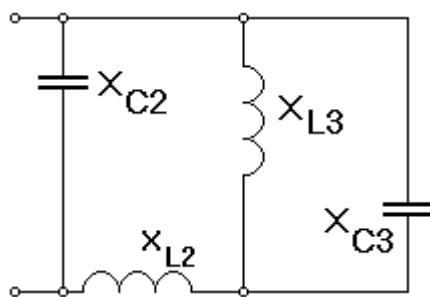
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 1.024 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.024 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = -5.684 \times 10^{-13}$$

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



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

$$L_2 = 0.111$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{4 \cdot \pi}$$

$$L_3 = 0.08$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{1000 \cdot \pi}$$

$$C_2 = 3.183 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{800 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 3.979 \times 10^{-4}$$

$$Z(p) := \frac{\left(\frac{-1}{p \cdot C_3} \cdot p \cdot L_3 \right)}{\frac{p \cdot L_3 + \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 + \frac{-1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2} \cdot \frac{-1}{p \cdot C_2}$$

$$Z(p) := \frac{\frac{-1}{p \cdot C_2} + \frac{\frac{-1}{p \cdot C_3} \cdot p \cdot L_3}{p \cdot L_3 + \frac{-1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2}{1}$$

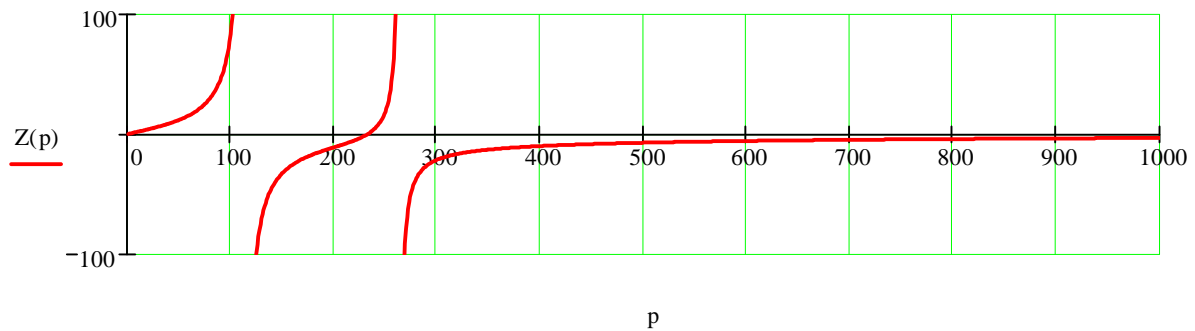
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 232.6840 \\ -232.6840 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 232.684 \\ -232.684 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (232.684 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

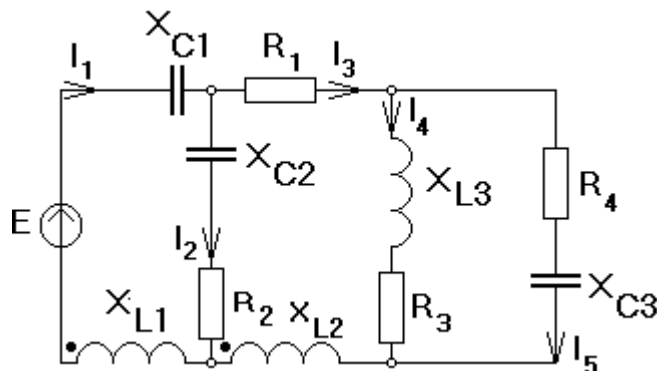
$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 263.68978246 \\ -263.68978246 \\ 113.17419405 \\ -113.17419405 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 263.69 \\ -263.69 \\ 113.174 \\ -113.174 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{1_0} \\ \omega_{1_2} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 263.69 \\ 113.174 \end{pmatrix}$$



При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

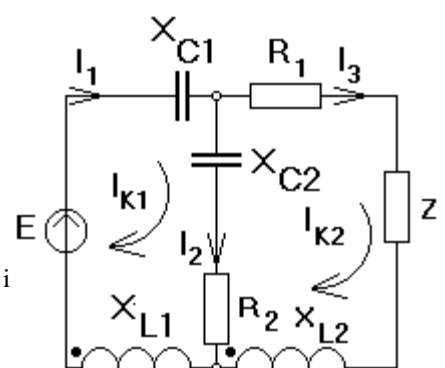
- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

і фазову діаграму напруг



$$Z := \frac{(R_4 - i \cdot X_{C3}) \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3})}{R_4 + R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})}$$

$$Z = 13.227 - 1.418i$$



$$Z_{11} := R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}) \rightarrow 16 + 15 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 16 - 30 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 47.22694 + 23.58238 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 4.5920427995692600162 + 3.0525287886817489775 \cdot i \\ 2.0447685885126961275 - 2.9038792950493902791 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 4.592 + 3.053i$$

$$I_{K2} = 2.045 - 2.904i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 4.592 + 3.053i$$

$$F(I_1) = (5.514 \ 33.614)$$

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

$$I_2 = 2.547 + 5.956i$$

$$F(I_2) = (6.478 \ 66.846)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = 2.045 - 2.904i$$

$$F(I_3) = (3.552 \ -54.849)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z}{R_3 + i \cdot X_{L3}}$$

$$I_4 = -0.867 - 1.403i$$

$$F(I_4) = (1.649 \ -121.717)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z}{R_4 - i \cdot X_{C3}}$$

$$I_5 = 2.912 - 1.501i$$

$$F(I_5) = (3.276 \quad -27.276)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

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

$$S_{M1} := I_1 \cdot \overline{I_3} \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M1} = -391.529 + 10.51i$$

$$F(S_{M1}) = (391.67 \quad 178.462)$$

$$S_{M2} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M2} = 391.529 + 10.51i$$

$$F(S_{M2}) = (391.67 \quad 1.538)$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 1.065 \times 10^3 + 785.06i$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 1.065 \times 10^3$$

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

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

$$Q = 785.06i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (i \cdot X_{L1})$$

$$\phi_b = -122.101 + 183.682i$$

$$F(\phi_b) = (220.562 \quad 123.614)$$

$$\phi_{b'} := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_M$$

$$\phi_{b'} = -64.024 + 224.577i$$

$$F(\phi_{b'}) = (233.525 \quad 105.912)$$

$$\phi_c := \phi_{b'} + I_2 \cdot R_2$$

$$\phi_c = -23.267 + 319.88i$$

$$F(\phi_c) = (320.725 \quad 94.16)$$

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

$$\phi_d = 36.297 + 294.407i$$

$$F(\phi_d) = (296.636 \quad 82.972)$$

$$\phi_1 := \phi_d - I_1 \cdot i \cdot X_{C1}$$

$$\phi_1 = 82.085 + 225.526i$$

$$F(\phi_1) = (240 \quad 70)$$

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

$$\phi_{1'} = -2.842 \times 10^{-14} - 2.842i \times 10^{-14}$$

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

$$\phi_{e'} = 37.612 + 296.144i$$

$$F(\phi_{e'}) = (298.523 \quad 82.762)$$

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

$$\phi_e = -23.438 + 387.985i$$

$$F(\phi_e) = (388.692 \quad 93.457)$$

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

$$\phi_m = -35.574 + 368.348i$$

$$F(\phi_m) = (370.062 \quad 95.516)$$

$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3}$$

$$\phi_n = -0.509 + 346.677i$$

$$F(\phi_n) = (346.677 \quad 90.084)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3})$$

$$\phi_k = -35.448 + 364.692i$$

$$F(\phi_k) = (366.411 \quad 95.552)$$

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

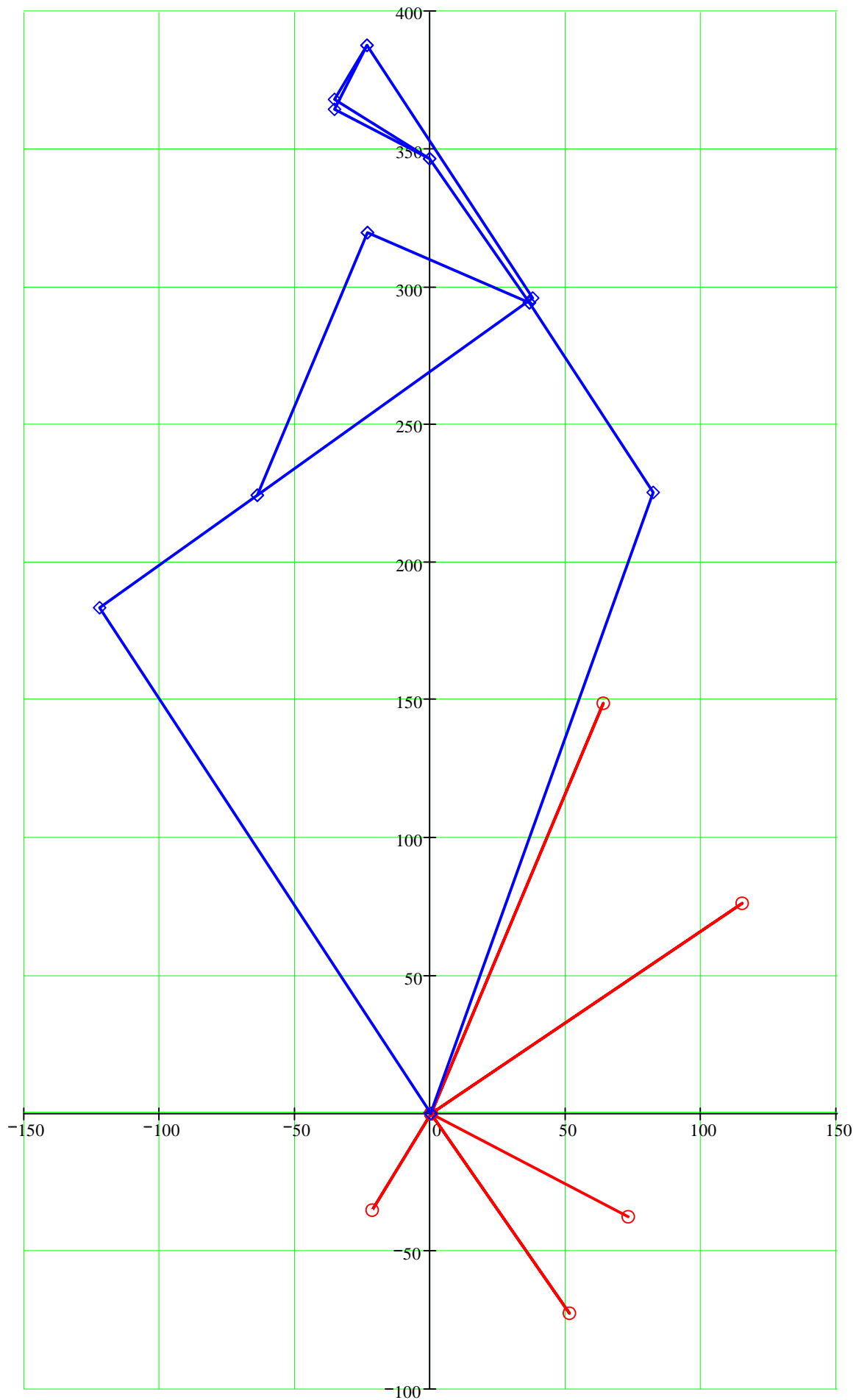
$$\phi_n = -0.509 + 346.677i$$

$$F(\phi_n) = (346.677 \quad 90.084)$$

$$\phi_d := \phi_n + I_3 \cdot R_1$$

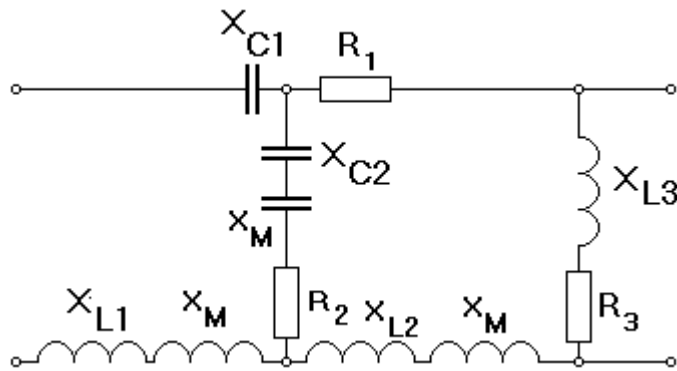
$$\phi_d = 36.297 + 294.407i$$

$$F(\phi_d) = (296.636 \quad 82.972)$$



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":

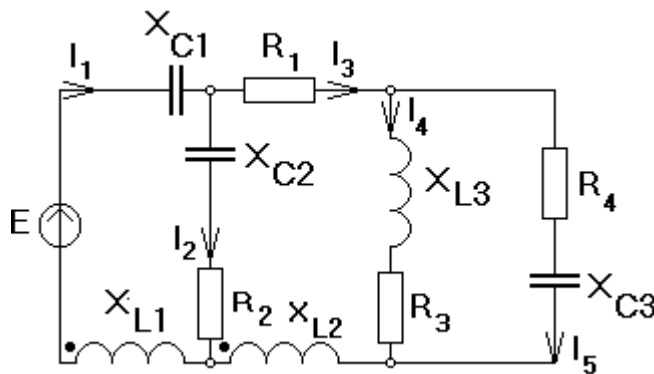
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 45 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 16 - 30 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 32 + 80 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 32.426 + 17.889i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_E} \quad I_{10} = 4.882 + 4.261i$$

$$F(I_{10}) = (6.481 \quad 41.115)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = 1.243 - 2.926i$$

$$F(I_{30}) = (3.179 \quad -66.982)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 90.55 - 9.886i$$

$$F(U_{20}) = (91.089 \quad -6.231)$$

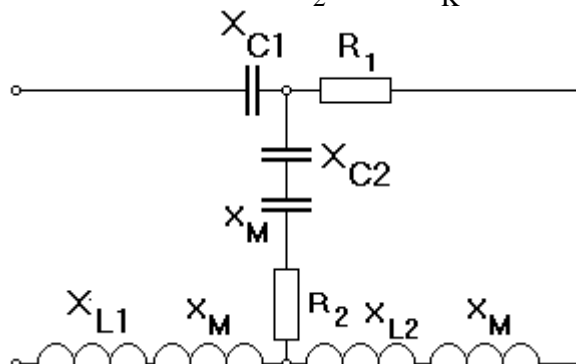
$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.627 + 2.559i$$

$$F(A) = (2.635 \quad 76.231)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.048 + 0.052i$$

$$F(C) = (0.071 \quad 47.345)$$

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 45 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 16 - 30 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 18 + 55 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 41.77 + 24.287i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 3.815 + 3.181i \quad F(I_{1K}) = (4.967 \quad 39.824)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = 2.095 - 3.41i \quad F(I_{3K}) = (4.002 \quad -58.43)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -37.277 + 46.981i \quad F(B) = (59.973 \quad 128.43)$$

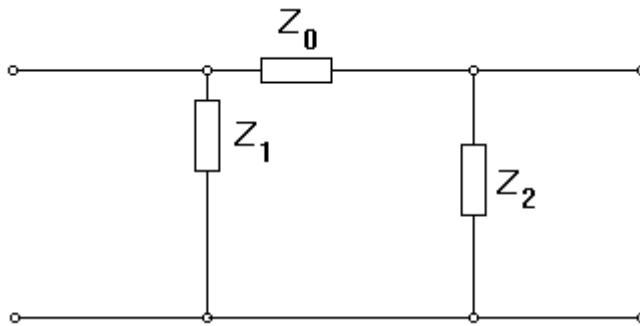
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.178 + 1.228i \quad F(D) = (1.241 \quad 98.254)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (2.635 \quad 76.231) \quad F(B) = (59.973 \quad 128.43)$$

$$F(C) = (0.071 \quad 47.345) \quad F(D) = (1.241 \quad 98.254)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -37.277 + 46.981i \quad F(Z_0) = (59.973 \quad 128.43)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.028 + 2.659i \times 10^{-3} \quad F(Y_1) = (0.028 \quad 5.376)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.037 - 0.022i \quad F(Y_2) = (0.043 \quad -30.14)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -37.277 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 46.981$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 35.08 - 3.301i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 35.08 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 3.301$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 20.055 + 11.644i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 20.055 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 11.644$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 9.643 \times 10^{-4} \quad L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 0.037$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.15$$