

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 755*

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 закоротити.

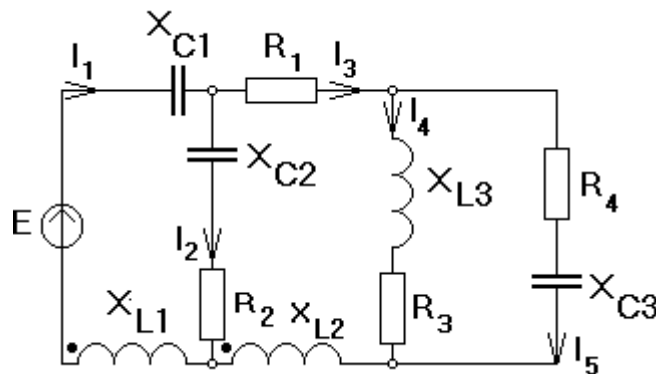
#### 2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ $L_1$ ТА $L_2$ (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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" :

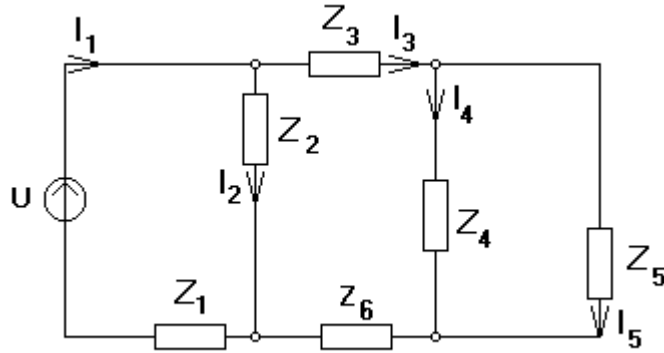
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти  $A, B, C, D$  чотиріполюсника;
- 3.2. Розрахувати параметри  $R, L, C$  віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 220 & \psi &:= 50 & R_1 &:= 16 & R_2 &:= 14 & R_3 &:= 12 & R_4 &:= 10 \\ X_{L1} &:= 50 & X_{L2} &:= 40 & X_{L3} &:= 35 & X_{C1} &:= 20 & X_{C2} &:= 15 & X_{C3} &:= 12 \\ X_M &:= 30 & f &:= 100 & & & & & & & & \\ U &:= E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & U = 141.413 + 168.53i & F(U) = (220 \ 50) \end{aligned}$$



## Для електричного кола без взаємної індукції:

**Розрахувати всі струми символьним методом**



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 30 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 14 - 15 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 16$$

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 12 + 35 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 10 - 12 \cdot i$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L2} \rightarrow 40 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 17.501 + 22.752i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 7.657 - 0.325i \quad F(I_1) = (7.664 \quad -2.433)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} \quad I_2 = 6.558 + 2.656i \quad F(I_2) = (7.076 \quad 22.045)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left( Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)} \quad I_3 = 1.099 - 2.981i \quad F(I_3) = (3.177 \quad -69.76)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4} \quad I_4 = -1.515 - 0.371i \quad F(I_4) = (1.559 \quad -166.227)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad I_5 = 2.614 - 2.61i \quad F(I_5) = (3.694 \quad -44.958)$$

**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:**

$$-I_1 \cdot [i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) = 0$$

$$I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (R_1 + i \cdot X_{L2}) = 2.842 \times 10^{-14} + 1.243i \times 10^{-14}$$

$$I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = -4.441 \times 10^{-15}$$

**Перевірка за балансом потужностей**

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 1.028 \times 10^3 + 1.337i \times 10^3$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 1.028 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 1.337 \times 10^3$$

## Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_b = 16.27 + 382.872i \quad F(\phi_b) = (383.218 \quad 87.567)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = 108.086 + 420.052i \quad F(\phi_c) = (433.735 \quad 75.57)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_d = 147.921 + 321.679i \quad F(\phi_d) = (354.059 \quad 65.305)$$

$$\phi_l := \phi_d + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_l = 141.413 + 168.53i \quad F(\phi_l) = (220 \quad 50)$$

$$\phi_{l'} := \phi_l - U \quad \phi_{l'} = -2.842 \times 10^{-14} + 2.842i \times 10^{-14}$$

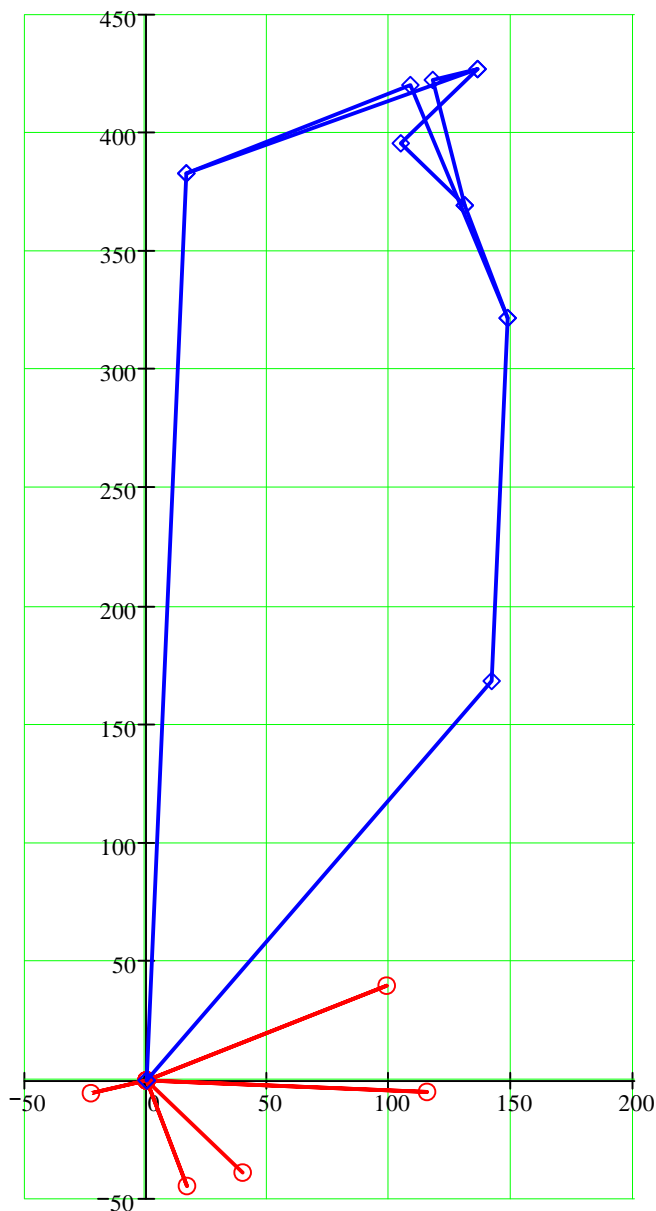
$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_e = 135.515 + 426.84i \quad F(\phi_e) = (447.836 \quad 72.386)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_m = 117.341 + 422.386i \quad F(\phi_m) = (438.382 \quad 74.474)$$

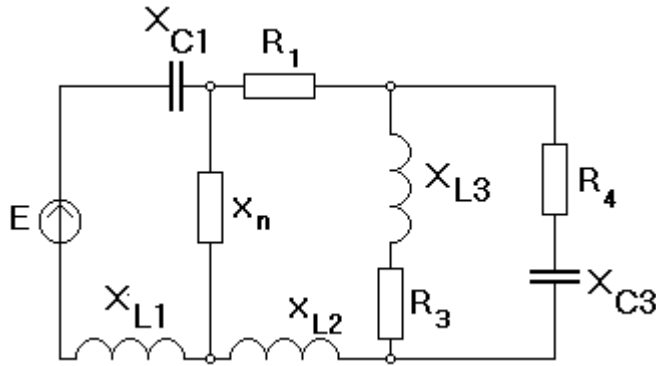
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_n = 130.334 + 369.377i \quad F(\phi_n) = (391.696 \quad 70.565)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_k = 104.197 + 395.475i \quad F(\phi_k) = (408.972 \quad 75.24)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = 130.334 + 369.377i \quad F(\phi_n) = (391.696 \quad 70.565)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 32.405 + 32.213i$$

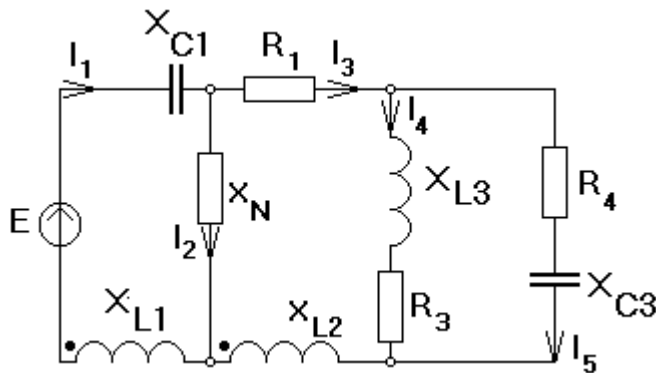
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \text{Re}(Z_E) \quad R_E = 32.405 \quad X_E := \text{Im}(Z_E) \quad X_E = 32.213$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.015 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -64.811$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 30i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 16 + 40i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 12 + 35i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 10 - 12i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 32.405 + 32.213i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 2 \cdot \frac{(16413 \cdot X_N^2 + 2036410 \cdot i \cdot X_N + 31511 \cdot i \cdot X_N^2 + 31723500 \cdot i)}{(2114900 + 65264 \cdot X_N + 1013 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left( \begin{array}{l} -26.199919114548054328 \\ -38.425449804242209390 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці  $X_N = \begin{pmatrix} -26.2 \\ -38.425 \end{pmatrix}$  який носить ємнісний характер ( $X_{N0} = -26.2$ ), ( $X_{N1} = -38.425$ )

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -26.2 \quad Z_{VX}(X_n) = 20.478$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 6.906 + 8.23i \quad F(I_1) = (10.743 \quad 50)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 1.475 + 14.821i \quad F(I_2) = (14.894 \quad 84.317)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 5.431 - 6.591i \quad F(I_3) = (8.54 \quad -50.513)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -3.514 - 2.284i \quad F(I_4) = (4.191 \quad -146.98)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = 8.945 - 4.307i \quad F(I_5) = (9.928 \quad -25.71)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 2.364 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 2.364 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 9.095 \times 10^{-13}$$

При  $X_n := X_{N1} \quad X_n = -38.425 \quad Z_{VX}(X_n) = 43.95$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 3.218 + 3.835i \quad F(I_1) = (5.006 \quad 50)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = -1.874 + 6.674i \quad F(I_2) = (6.932 \quad 105.683)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 5.091 - 2.839i \quad F(I_3) = (5.83 \quad -29.148)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -1.666 - 2.326i \quad F(I_4) = (2.861 \quad -125.615)$$

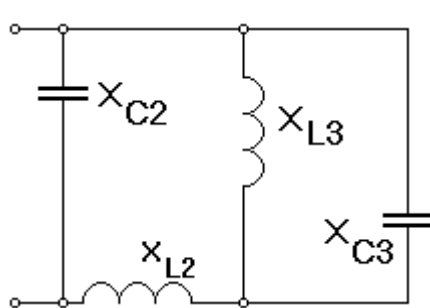
$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = 6.758 - 0.513i \quad F(I_5) = (6.777 \quad -4.345)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 1.101 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.101 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = -2.274 \times 10^{-13}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{5 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.064$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{7}{40 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.056$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi} \quad C_2 = 1.061 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{2400 \cdot \pi} \quad C_3 = 1.326 \times 10^{-4}$$

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

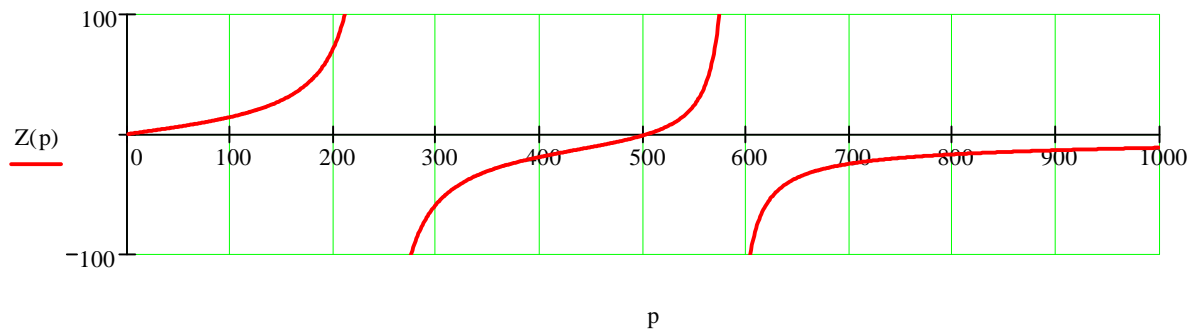
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 503.7755 \\ -503.7755 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 503.776 \\ -503.776 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (503.776 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

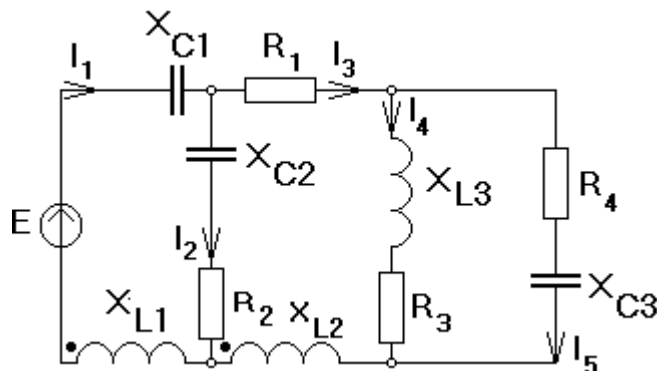
$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 586.08648921 \\ -586.08648921 \\ 241.52954408 \\ -241.52954408 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 586.086 \\ -586.086 \\ 241.53 \\ -241.53 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{1_0} \\ \omega_{1_2} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 586.086 \\ 241.53 \end{pmatrix}$$



### При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

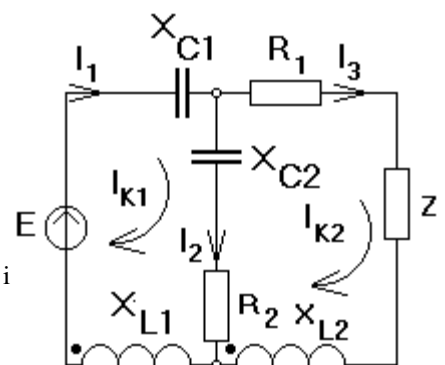
- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

і фазову діаграму напруг



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

$$Z = 16.405 - 7.787i$$



$$Z_{11} := R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}) \rightarrow 14 + 15 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 14 - 45 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 46.40474 + 17.21323 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 3.1421968814154529806 + 1.5092207309477934266 \cdot i \\ 1.2747394997069756719 - 3.0646040389185971304 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 3.142 + 1.509i$$

$$I_{K2} = 1.275 - 3.065i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 3.142 + 1.509i$$

$$F(I_1) = (3.486 \ 25.655)$$

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

$$I_2 = 1.867 + 4.574i$$

$$F(I_2) = (4.94 \ 67.79)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = 1.275 - 3.065i$$

$$F(I_3) = (3.319 \ -67.415)$$

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

$$I_4 = -1.565 - 0.452i$$

$$F(I_4) = (1.629 \ -163.882)$$

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

$$I_5 = 2.84 - 2.612i$$

$$F(I_5) = (3.859 \quad -42.613)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

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

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

$$S_{M1} = -346.604 - 18.59i$$

$$F(S_{M1}) = (347.102 \quad -176.93)$$

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

$$S_{M2} = 346.604 - 18.59i$$

$$F(S_{M2}) = (347.102 \quad -3.07)$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 698.697 + 316.13i$$

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

$$P = 698.697$$

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

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

$$Q = 316.13i$$

**Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг**

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -75.461 + 157.11i$$

$$F(\phi_b) = (174.292 \quad 115.655)$$

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

$$\phi_{b'} = 16.477 + 195.352i$$

$$F(\phi_{b'}) = (196.046 \quad 85.179)$$

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

$$\phi_c = 42.621 + 259.386i$$

$$F(\phi_c) = (262.864 \quad 80.669)$$

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

$$\phi_d = 111.229 + 231.374i$$

$$F(\phi_d) = (256.721 \quad 64.325)$$

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

$$\phi_1 = 141.413 + 168.53i$$

$$F(\phi_1) = (220 \quad 50)$$

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

$$\phi_{1'} = 2.842 \times 10^{-14} + 2.842i \times F(\phi_{1'}) = (4.019 \times 10^{-14} \quad 45)$$

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

$$\phi_{e'} = 139.061 + 246.342i$$

$$F(\phi_{e'}) = (282.882 \quad 60.555)$$

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

$$\phi_e = 93.785 + 340.608i$$

$$F(\phi_e) = (353.283 \quad 74.605)$$

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

$$\phi_m = 75.005 + 335.181i$$

$$F(\phi_m) = (343.47 \quad 77.386)$$

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

$$\phi_n = 90.833 + 280.407i$$

$$F(\phi_n) = (294.752 \quad 72.051)$$

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

$$\phi_k = 62.436 + 306.531i$$

$$F(\phi_k) = (312.825 \quad 78.487)$$

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

$$\phi_n = 90.833 + 280.407i$$

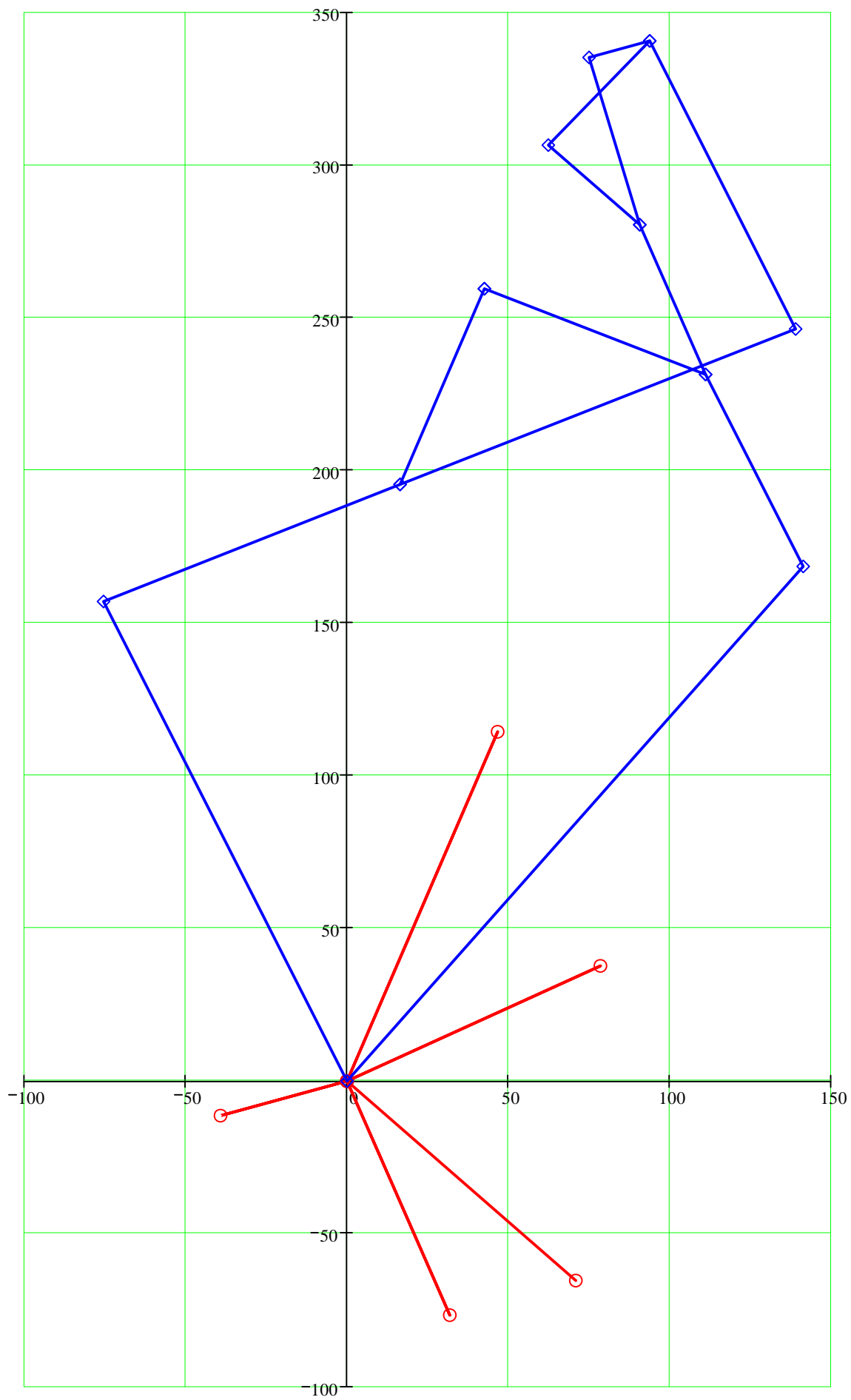
$$F(\phi_n) = (294.752 \quad 72.051)$$

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

$$\phi_d = 111.229 + 231.374i$$

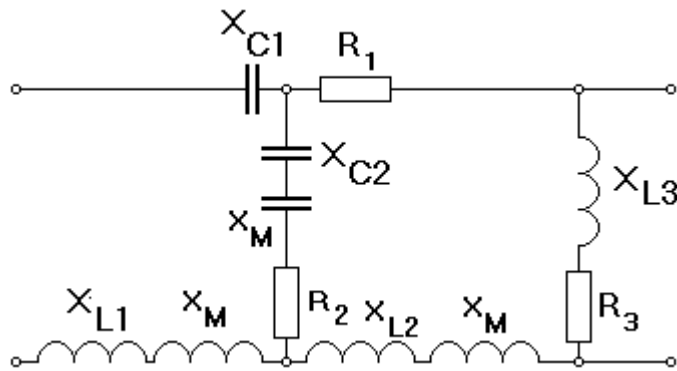
$$F(\phi_d) = (256.721 \quad 64.325)$$





**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":**

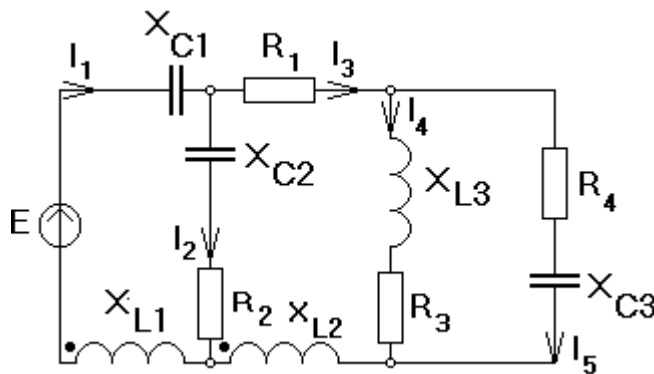
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 60 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 14 - 45 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 28 + 105 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 42.415 + 4.407i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_E} \quad I_{10} = 3.707 + 3.588i \quad F(I_{10}) = (5.159 \quad 44.068)$$

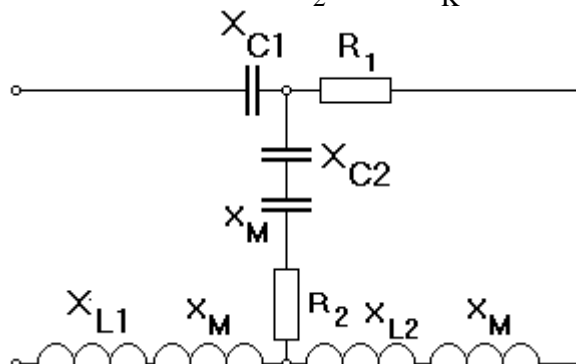
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = 0.367 - 3.299i \quad F(I_{30}) = (3.32 \quad -83.659)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 119.879 - 26.759i \quad F(U_{20}) = (122.83 \quad -12.583)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.825 + 1.59i \quad F(A) = (1.791 \quad 62.583)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.023 + 0.035i \quad F(C) = (0.042 \quad 56.651)$$

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 60 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 14 - 45 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 16 + 70 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 70.636 + 9.803i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 2.289 + 2.068i \quad F(I_{1K}) = (3.085 \quad 42.099)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = 1.247 - 3.508i \quad F(I_{3K}) = (3.723 \quad -70.425)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -29.925 + 50.955i \quad F(B) = (59.092 \quad 120.425)$$

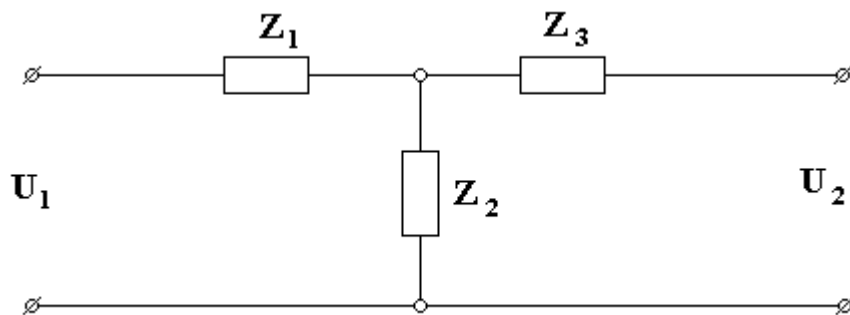
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.317 + 0.765i \quad F(D) = (0.829 \quad 112.524)$$

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

$$F(A) = (1.791 \quad 62.583) \quad F(B) = (59.092 \quad 120.425)$$

$$F(C) = (0.042 \quad 56.651) \quad F(D) = (0.829 \quad 112.524)$$

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



$$Z_1 := \frac{A - 1}{C} \quad Z_1 = 29.327 + 24.295i \quad F(Z_1) = (38.083 \quad 39.64)$$

$$Z_2 := \frac{1}{C} \quad Z_2 = 14 - 45i \quad F(Z_2) = (47.127 \quad -72.719)$$

$$Z_3 := \frac{D - 1}{C} \quad Z_3 = -2.02 + 36.219i \quad F(Z_3) = (36.276 \quad 93.192)$$

$$R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 29.327 \quad X_1 := \operatorname{Im}(Z_1) \quad X_1 = 24.295$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 13.088 \quad X_2 := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_2 = -19.888$$

$$R_3 := \operatorname{Re}(Z_3) \quad R_3 = -2.02 \quad X_3 := \operatorname{Im}(Z_3) \quad X_3 = 36.219$$

$$L_1 := \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad C := -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_2} \quad L_2 := \frac{X_3}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L_1 = 0.039 \quad C = 8.003 \times 10^{-5} \quad L_2 = 0.058$$