

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 215*

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.

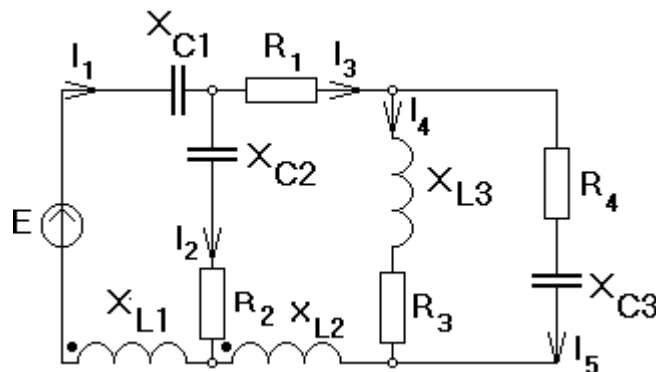
#### 2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ $L_1$ ТА $L_2$ (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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" :

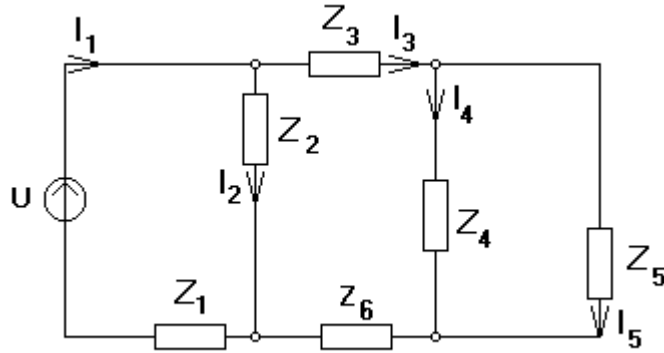
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти А, В, С, D чотириполосника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 120 & \psi &:= -30 & R_1 &:= 7 & R_2 &:= 9 & R_3 &:= 11 & R_4 &:= 13 \\ X_{L1} &:= 30 & X_{L2} &:= 35 & X_{L3} &:= 40 & X_{C1} &:= 10 & X_{C2} &:= 15 & X_{C3} &:= 20 \\ X_M &:= 20 & f &:= 50 & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \end{aligned}$$
$$U := E \cdot e^{j\psi \frac{\pi}{180}} \quad U = 103.923 - 60i \quad F(U) = (120 \quad -30)$$



## Для електричного кола без взаємної індукції:

**Розрахувати всі струми символьним методом**



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

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 11 + 40 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 9 - 15 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 13 - 20 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 7$$

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

$$Z_E := \frac{\left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 13.105 + 10.226i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 2.708 - 6.692i \quad F(I_1) = (7.219 \quad -67.967)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} \quad I_2 = 4.716 - 4.824i \quad F(I_2) = (6.747 \quad -45.647)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left( Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)} \quad I_3 = -2.008 - 1.868i \quad F(I_3) = (2.743 \quad -137.076)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4} \quad I_4 = -1.235 + 1.691i \quad F(I_4) = (2.094 \quad 126.142)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad I_5 = -0.773 - 3.559i \quad F(I_5) = (3.642 \quad -102.258)$$

*Перевірка за першим законом Кіргофа:*

$$I_1 - I_2 - I_3 = 1.332i \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad I_2 + I_5 + I_4 - I_1 = 0$$

*Перевірка за другим законом Кіргофа:*

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

$$I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (R_1 + i \cdot X_{L2}) = -2.842 \times 10^{-14} - 1.421i \times 10^{-14}$$

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

*Перевірка за балансом потужностей*

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 682.951 + 532.949i$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 682.951$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 532.949$$

## Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = 200.756 + 81.245i$$

$$F(\phi_b) = (216.572 \quad 22.033)$$

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

$$\phi_c = 243.203 + 37.828i$$

$$F(\phi_c) = (246.128 \quad 8.841)$$

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

$$\phi_d = 170.842 - 32.918i$$

$$F(\phi_d) = (173.984 \quad -10.906)$$

$$\phi_l := \phi_d + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1})$$

$$\phi_l = 103.923 - 60i$$

$$F(\phi_l) = (120 \quad -30)$$

$$\phi_{l'} := \phi_l - U$$

$$\phi_{l'} = -2.132i \times 10^{-14}$$

$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$\phi_e = 266.127 + 10.956i$$

$$F(\phi_e) = (266.352 \quad 2.357)$$

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

$$\phi_m = 252.541 + 29.558i$$

$$F(\phi_m) = (254.265 \quad 6.676)$$

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

$$\phi_n = 184.899 - 19.844i$$

$$F(\phi_n) = (185.961 \quad -6.126)$$

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

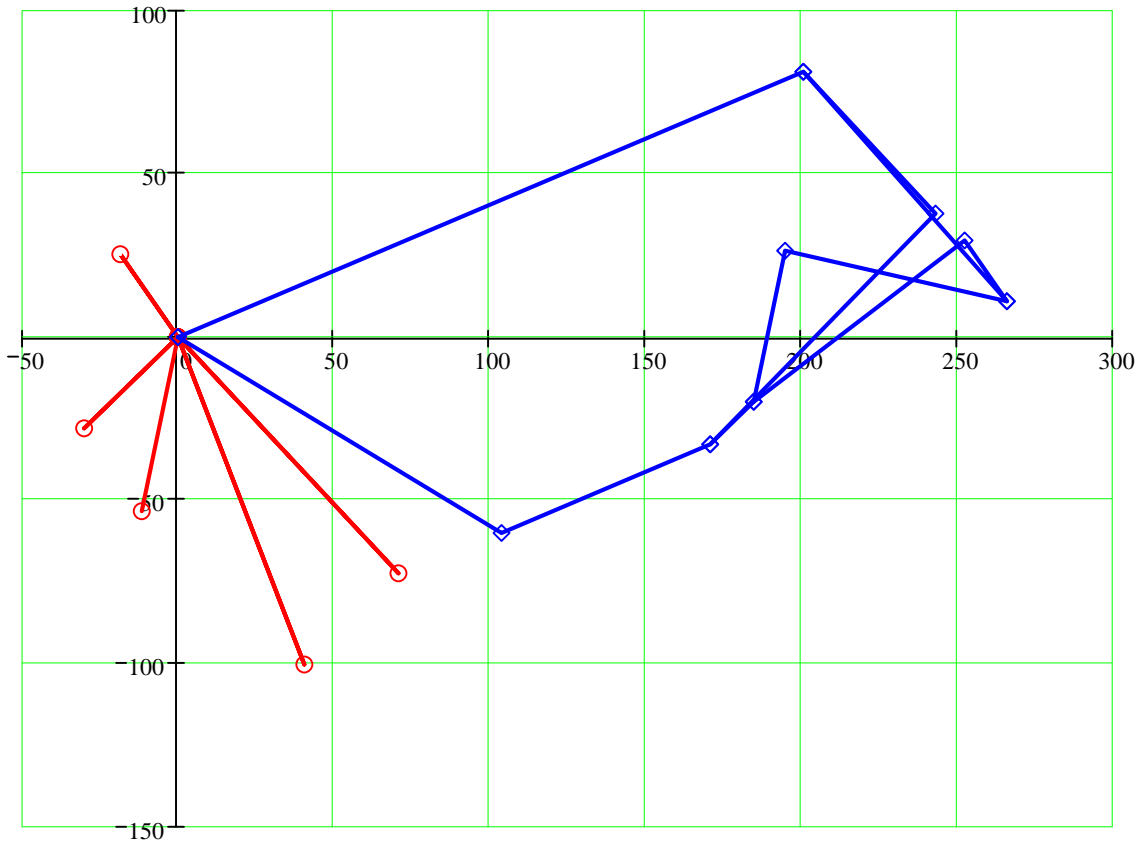
$$\phi_k = 194.951 + 26.42i$$

$$F(\phi_k) = (196.733 \quad 7.718)$$

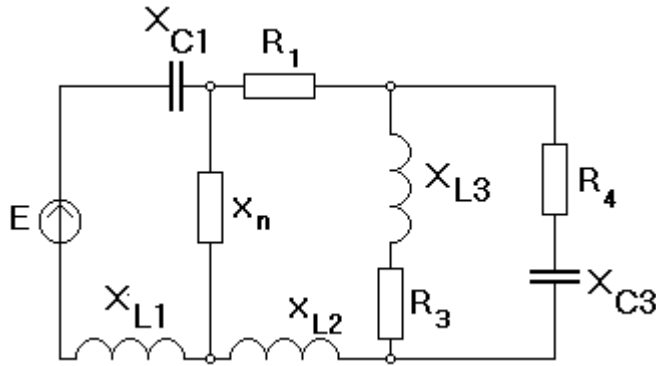
$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4$$

$$\phi_n = 184.899 - 19.844i$$

$$F(\phi_n) = (185.961 \quad -6.126)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 36.336 + 23.053i$$

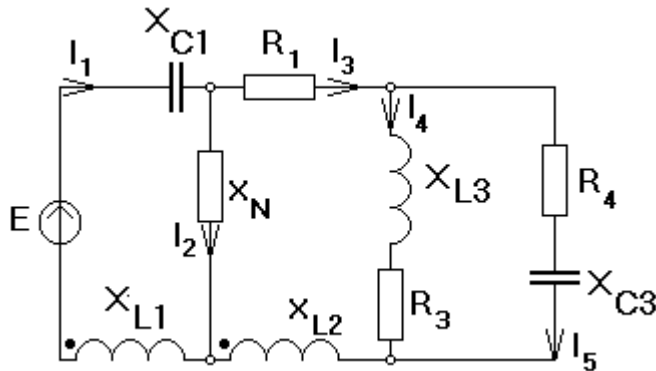
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \text{Re}(Z_E) \quad R_E = 36.336 \quad X_E := \text{Im}(Z_E) \quad X_E = 23.053$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.012 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -80.325$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 20i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 7 + 35i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 11 + 40i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 13 - 20i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 36.336 + 23.053i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(35464 \cdot X_N^2 + 2707321 \cdot i \cdot X_N + 42020 \cdot i \cdot X_N^2 + 36146420 \cdot i)}{(1807321 + 45000 \cdot X_N + 976 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left( \begin{array}{l} -18.889295567650746956 \\ -45.540047602268339194 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці  $X_N = \begin{pmatrix} -18.889 \\ -45.54 \end{pmatrix}$  який носить ємнісний характер ( $X_{N0} = -18.889$ ). ( $X_{N1} = -45.54$ )

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -18.889 \quad Z_{VX}(X_n) = 9.692$$

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

$$I_1 = 10.722 - 6.19i$$

$$F(I_1) = (12.381 \quad -30)$$

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

$$I_2 = 14.529 - 1.053i$$

$$F(I_2) = (14.567 \quad -4.144)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -3.807 - 5.138i$$

$$F(I_3) = (6.394 \quad -126.537)$$

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

$$I_4 = -3.552 + 3.35i$$

$$F(I_4) = (4.882 \quad 136.681)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -0.255 - 8.487i$$

$$F(I_5) = (8.491 \quad -91.719)$$

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

$$S_1 = 1.486 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.486 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 1.137 \times 10^{-12}$$

При  $X_n := X_{N1} \quad X_n = -45.54 \quad Z_{VX}(X_n) = 41.27$

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

$$I_1 = 2.518 - 1.454i$$

$$F(I_1) = (2.908 \quad -30)$$

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

$$I_2 = 2.423 + 1.644i$$

$$F(I_2) = (2.928 \quad 34.144)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 0.095 - 3.097i$$

$$F(I_3) = (3.099 \quad -88.248)$$

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

$$I_4 = -2.357 + 0.207i$$

$$F(I_4) = (2.366 \quad 174.97)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 2.452 - 3.305i$$

$$F(I_5) = (4.115 \quad -53.43)$$

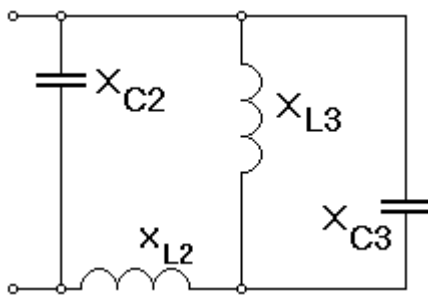
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 348.923$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 348.923$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 5.684 \times 10^{-14}$$

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



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

$$L_2 = 0.111$$

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

$$L_3 = 0.127$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{1500 \cdot \pi}$$

$$C_2 = 2.122 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{2000 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 1.592 \times 10^{-4}$$

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

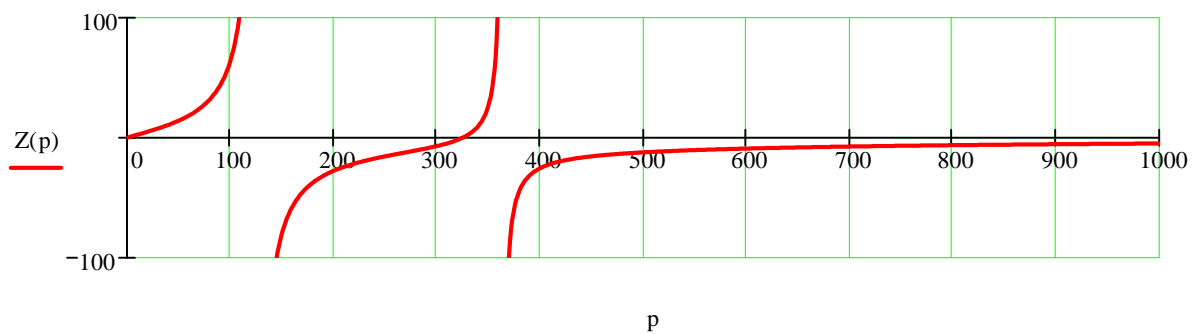
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 325.1860 \\ -325.1860 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 325.186 \\ -325.186 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (325.186 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 363.67878290 \\ -363.67878290 \\ 125.62566970 \\ -125.62566970 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 363.679 \\ -363.679 \\ 125.626 \\ -125.626 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{10} \\ \omega_{12} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 363.679 \\ 125.626 \end{pmatrix}$$

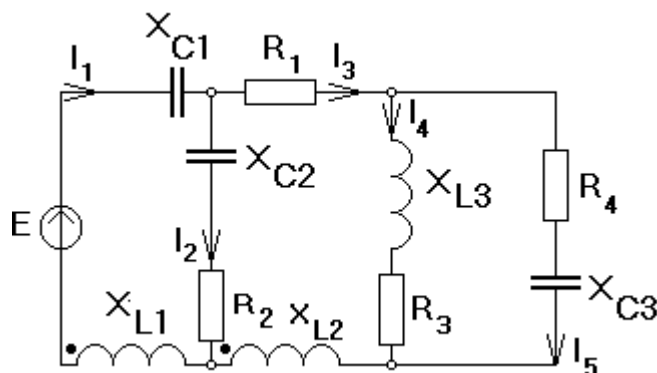


### При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольметра;

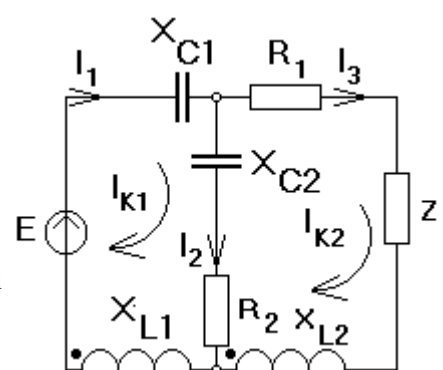
2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

і фазову діаграму напруг



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

$$Z = 29.336 - 11.947i$$



$$Z_{11} := R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}) \rightarrow 9 + 5 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 9 - 35 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 45.33607 + 8.053279 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 1.9383035718846349090 - 2.4370542117116246742 \cdot i \\ -1.7918594606647507942 - 1.6618945743608583689 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 1.938 - 2.437i$$

$$I_{K2} = -1.792 - 1.662i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 1.938 - 2.437i$$

$$F(I_1) = (3.114 \ -51.503)$$

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

$$I_2 = 3.73 - 0.775i$$

$$F(I_2) = (3.81 \ -11.739)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = -1.792 - 1.662i$$

$$F(I_3) = (2.444 \ -137.155)$$

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

$$I_4 = -1.098 + 1.508i$$

$$F(I_4) = (1.866 \ 126.063)$$

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

$$I_5 = -0.693 - 3.17i$$

$$F(I_5) = (3.245 \quad -102.337)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

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

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

$$S_{M1} = -151.762 + 11.539i$$

$$F(S_{M1}) = (152.2 \quad 175.652)$$

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

$$S_{M2} = 151.762 + 11.539i$$

$$F(S_{M2}) = (152.2 \quad 4.348)$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 347.658 + 136.968i$$

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

$$P = 347.658$$

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

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

$$Q = 136.968i$$

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

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = 73.112 + 58.149i$$

$$F(\phi_b) = (93.416 \quad 38.497)$$

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

$$\phi_{b'} = 106.35 + 22.312i$$

$$F(\phi_{b'}) = (108.665 \quad 11.849)$$

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

$$\phi_c = 139.921 + 15.335i$$

$$F(\phi_c) = (140.759 \quad 6.255)$$

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

$$\phi_d = 128.294 - 40.617i$$

$$F(\phi_d) = (134.57 \quad -17.567)$$

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

$$\phi_1 = 103.923 - 60i$$

$$F(\phi_1) = (120 \quad -30)$$

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

$$\phi_{1'} = 1.421 \times 10^{-14} - 7.105i \times F(\phi_{1'}) = (1.589 \times 10^{-14} \quad -26.565)$$

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

$$\phi_{e'} = 164.516 - 40.403i$$

$$F(\phi_{e'}) = (169.404 \quad -13.798)$$

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

$$\phi_e = 213.257 - 1.637i$$

$$F(\phi_e) = (213.263 \quad -0.44)$$

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

$$\phi_m = 201.174 + 14.956i$$

$$F(\phi_m) = (201.729 \quad 4.252)$$

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

$$\phi_n = 140.837 - 28.984i$$

$$F(\phi_n) = (143.788 \quad -11.629)$$

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

$$\phi_k = 149.851 + 12.23i$$

$$F(\phi_k) = (150.349 \quad 4.666)$$

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

$$\phi_n = 140.837 - 28.984i$$

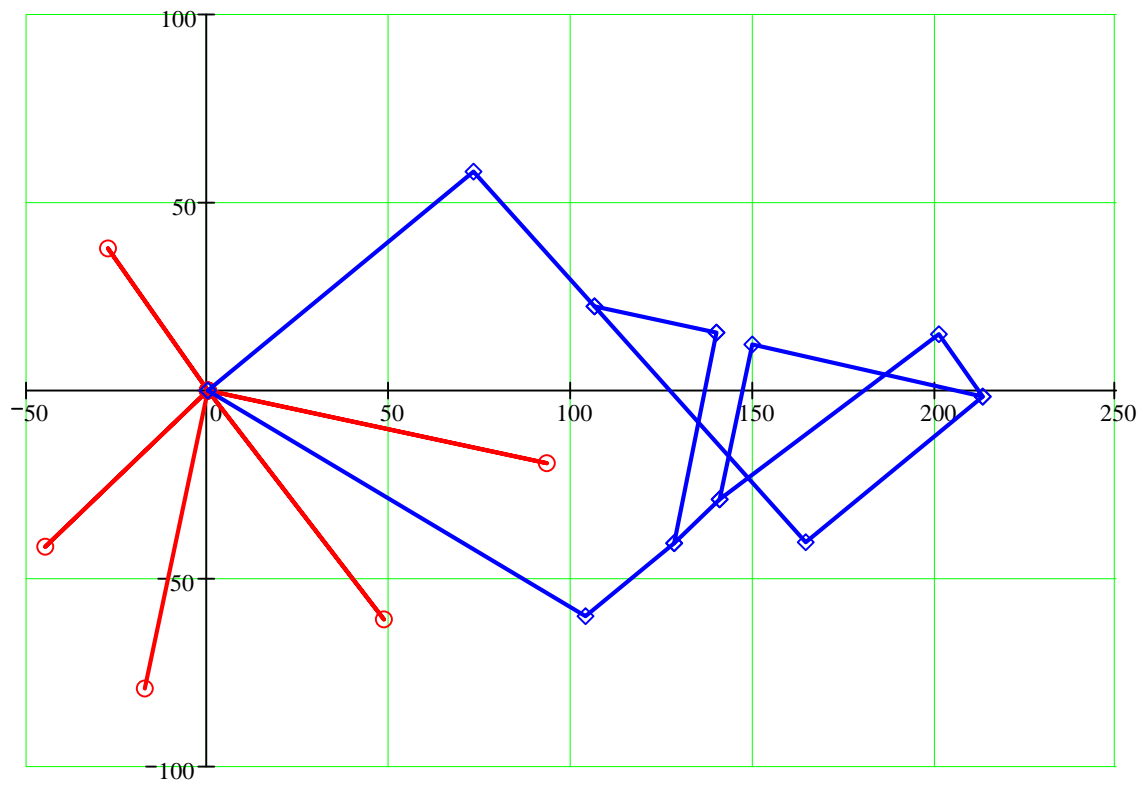
$$F(\phi_n) = (143.788 \quad -11.629)$$

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

$$\phi_d = 128.294 - 40.617i$$

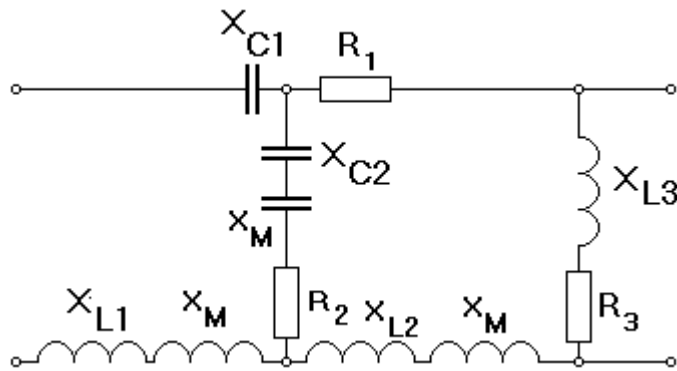
$$F(\phi_d) = (134.57 \quad -17.567)$$





**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":**

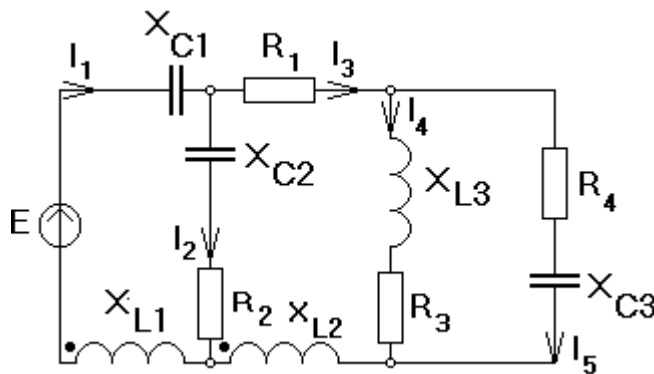
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 40 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 9 - 35 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 18 + 95 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 24.867 - 6.927i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_E} \quad I_{10} = 4.502 - 1.159i$$

$$F(I_{10}) = (4.649 \quad -14.435)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -2.329 - 1.047i$$

$$F(I_{30}) = (2.553 \quad -155.787)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 16.273 - 104.668i$$

$$F(U_{20}) = (105.926 \quad -81.163)$$

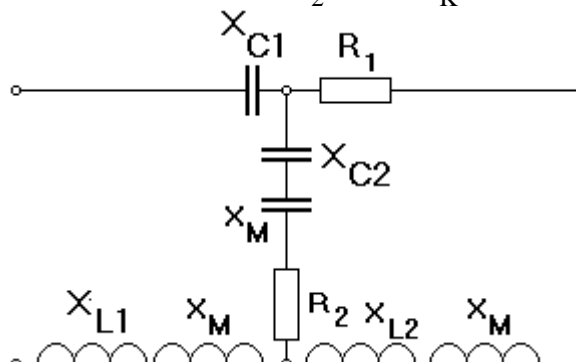
$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.71 + 0.882i$$

$$F(A) = (1.133 \quad 51.163)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.017 + 0.04i$$

$$F(C) = (0.044 \quad 66.728)$$

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 40 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 9 - 35 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 7 + 55 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 56.11 - 14.512i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 1.995 - 0.553i \quad F(I_{1K}) = (2.071 \quad -15.499)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -2.315 - 1.782i \quad F(I_{3K}) = (2.921 \quad -142.418)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -15.665 + 37.971i \quad F(B) = (41.075 \quad 112.418)$$

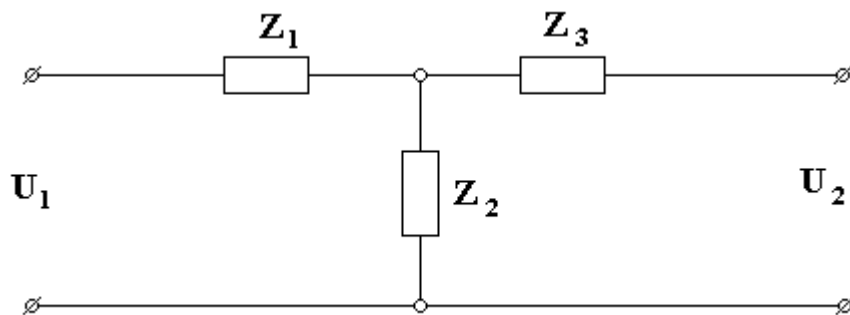
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.426 + 0.567i \quad F(D) = (0.709 \quad 126.919)$$

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

$$F(A) = (1.133 \quad 51.163) \quad F(B) = (41.075 \quad 112.418)$$

$$F(C) = (0.044 \quad 66.728) \quad F(D) = (0.709 \quad 126.919)$$

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



$$Z_1 := \frac{A - 1}{C} \quad Z_1 = 15.864 + 14.006i \quad F(Z_1) = (21.162 \quad 41.439)$$

$$Z_2 := \frac{1}{C} \quad Z_2 = 9 - 35i \quad F(Z_2) = (36.139 \quad -75.579)$$

$$Z_3 := \frac{D - 1}{C} \quad Z_3 = -0.975 + 34.945i \quad F(Z_3) = (34.958 \quad 91.598)$$

$$R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 15.864 \quad X_1 := \operatorname{Im}(Z_1) \quad X_1 = 14.006$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 9.003 \quad X_2 := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_2 = -20.932$$

$$R_3 := \operatorname{Re}(Z_3) \quad R_3 = -0.975 \quad X_3 := \operatorname{Im}(Z_3) \quad X_3 = 34.945$$

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

$$L_1 = 0.045 \quad C = 1.521 \times 10^{-4} \quad L_2 = 0.111$$