

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 325*

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.

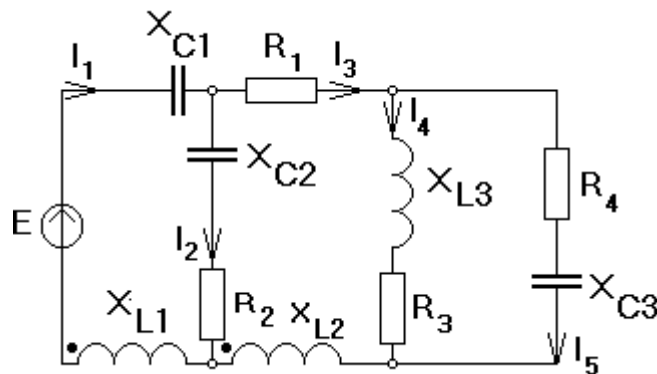
#### 2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ $L_1$ ТА $L_2$ (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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" :

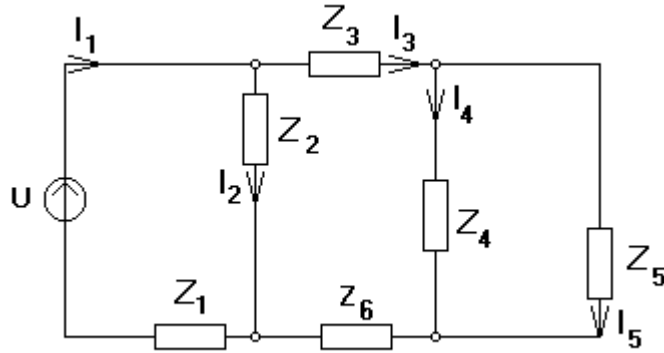
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти  $A, B, C, D$  чотиріполюсника;
- 3.2. Розрахувати параметри  $R, L, C$  віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 140 & \psi &:= -45 & R_1 &:= 9 & R_2 &:= 11 & R_3 &:= 13 & R_4 &:= 15 \\ X_{L1} &:= 35 & X_{L2} &:= 40 & X_{L3} &:= 45 & X_{C1} &:= 15 & X_{C2} &:= 20 & X_{C3} &:= 25 \\ X_M &:= 23 & f &:= 60 & & & & & & & & \\ U &:= E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & U = 98.995 - 98.995i & F(U) = (140 \quad -45) \end{aligned}$$



## Для електричного кола без взаємної індукції:

**Розрахувати всі струми символьним методом**



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

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 13 + 45 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 11 - 20 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 15 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 9$$

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

$$Z_E := \frac{\left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 16.628 + 7.113i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 2.88 - 7.185i \quad F(I_1) = (7.741 \quad -68.159)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} \quad I_2 = 5.067 - 5.023i \quad F(I_2) = (7.135 \quad -44.746)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left( Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)} \quad I_3 = -2.187 - 2.163i \quad F(I_3) = (3.076 \quad -135.324)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4} \quad I_4 = -1.679 + 1.994i \quad F(I_4) = (2.606 \quad 130.102)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad I_5 = -0.508 - 4.156i \quad F(I_5) = (4.187 \quad -96.975)$$

**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:**

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

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

$$I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = 1.421 \times 10^{-14} + 7.105i \times 10^{-15}$$

**Перевірка за балансом потужностей**

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 996.4 + 426.216i$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 996.4$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 426.216$$

## Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_b = 251.485 + 100.795i \quad F(\phi_b) = (270.933 \quad 21.841)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = 307.225 + 45.548i \quad F(\phi_c) = (310.583 \quad 8.433)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_d = 206.774 - 55.797i \quad F(\phi_d) = (214.17 \quad -15.101)$$

$$\phi_l := \phi_d + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_l = 98.995 - 98.995i \quad F(\phi_l) = (140 \quad -45)$$

$$\phi_{l'} := \phi_l - U \quad \phi_{l'} = 1.421i \times 10^{-14}$$

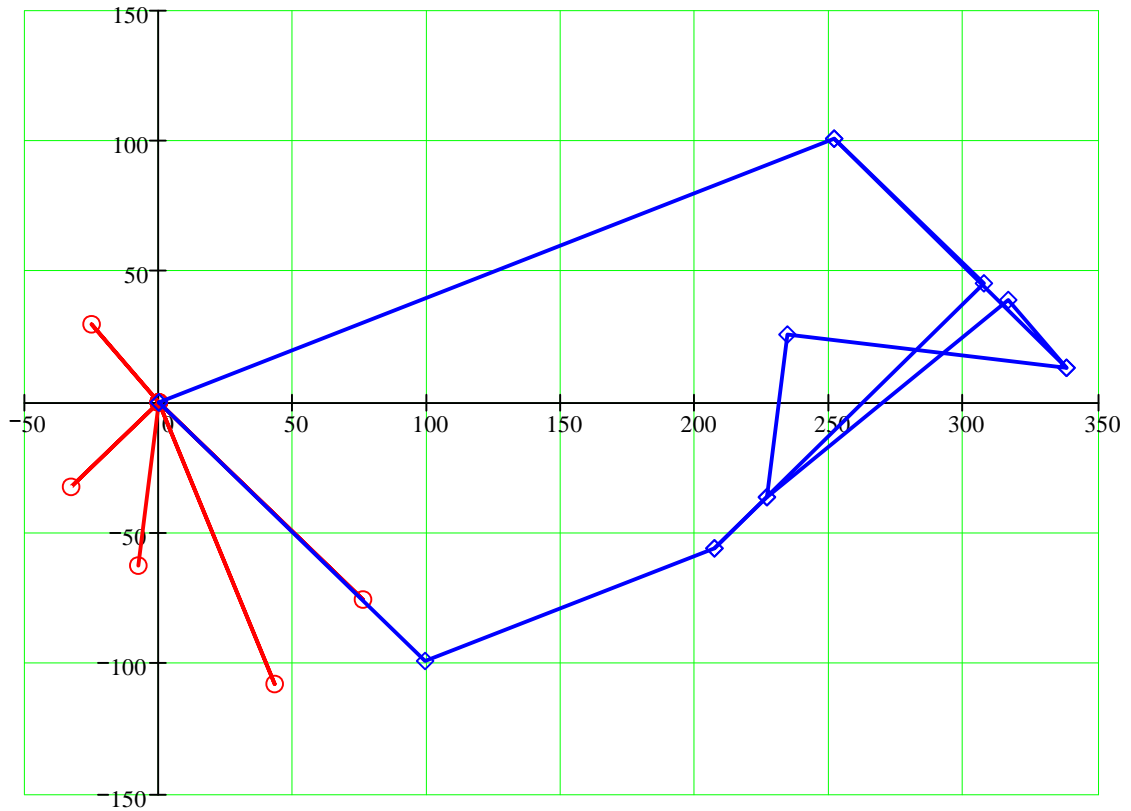
$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_e = 337.996 + 13.301i \quad F(\phi_e) = (338.258 \quad 2.254)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_m = 316.171 + 39.217i \quad F(\phi_m) = (318.594 \quad 7.071)$$

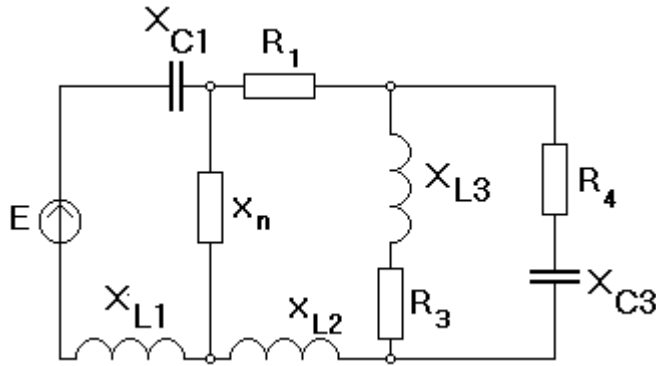
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_n = 226.461 - 36.332i \quad F(\phi_n) = (229.357 \quad -9.115)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_k = 234.088 + 26.013i \quad F(\phi_k) = (235.529 \quad 6.341)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = 226.461 - 36.332i \quad F(\phi_n) = (229.357 \quad -9.115)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 46.128 + 25.98i$$

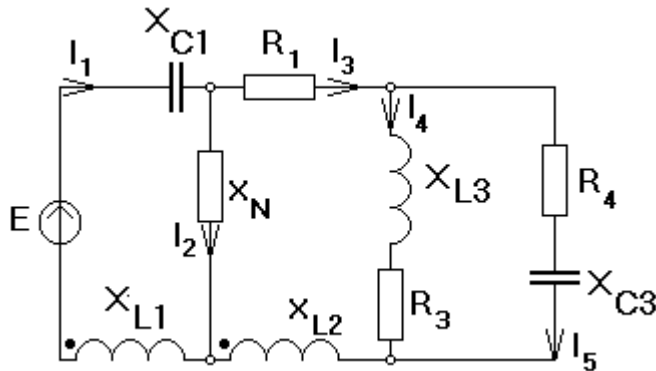
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 46.128 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = 25.98$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -9.269 \times 10^{-3} \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -107.883$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 20i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 9 + 40i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 13 + 45i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 15 - 25i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 46.128 + 25.98i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(13654 \cdot X_N^2 + 1137221 \cdot i \cdot X_N + 13610 \cdot i \cdot X_N^2 + 16592420 \cdot i)}{(829621 + 15380 \cdot X_N + 296 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -18.836774672205376970 \\ -64.720976980990802310 \end{pmatrix} \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці  $X_N = \begin{pmatrix} -18.837 \\ -64.721 \end{pmatrix}$  який носить ємнісний характер ( $X_{N0} = -18.837$ ). ( $X_{N1} = -64.721$ )

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -18.837 \quad Z_{VX}(X_n) = 7.512$$

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

$$I_1 = 13.178 - 13.178i$$

$$F(I_1) = (18.637 \quad -45)$$

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

$$I_2 = 19.247 - 8.737i$$

$$F(I_2) = (21.138 \quad -24.414)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -6.069 - 4.442i$$

$$F(I_3) = (7.521 \quad -143.802)$$

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

$$I_4 = -3.341 + 5.426i$$

$$F(I_4) = (6.372 \quad 121.624)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -2.728 - 9.868i$$

$$F(I_5) = (10.238 \quad -105.453)$$

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

$$S_1 = 2.609 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 2.609 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = -1.819 \times 10^{-12}$$

При  $X_n := X_{N1} \quad X_n = -64.721 \quad Z_{VX}(X_n) = 53.248$

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

$$I_1 = 1.859 - 1.859i$$

$$F(I_1) = (2.629 \quad -45)$$

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

$$I_2 = 2.104 + 0.955i$$

$$F(I_2) = (2.311 \quad 24.414)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -0.245 - 2.814i$$

$$F(I_3) = (2.825 \quad -94.975)$$

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

$$I_4 = -2.36 + 0.397i$$

$$F(I_4) = (2.393 \quad 170.452)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 2.115 - 3.211i$$

$$F(I_5) = (3.845 \quad -56.626)$$

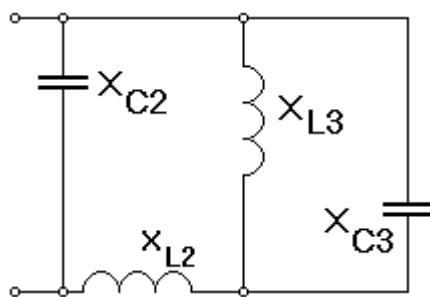
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 368.087$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 368.087$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = -1.705 \times 10^{-13}$$

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



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

$$L_2 = 0.106$$

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

$$L_3 = 0.119$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{2400 \cdot \pi}$$

$$C_2 = 1.326 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 1.061 \times 10^{-4}$$

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

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

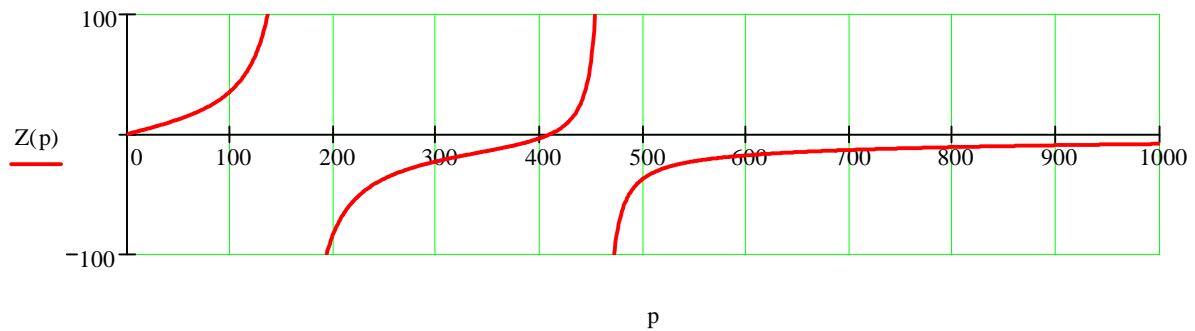
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 409.6135 \\ -409.6135 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 409.613 \\ -409.613 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (409.613 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

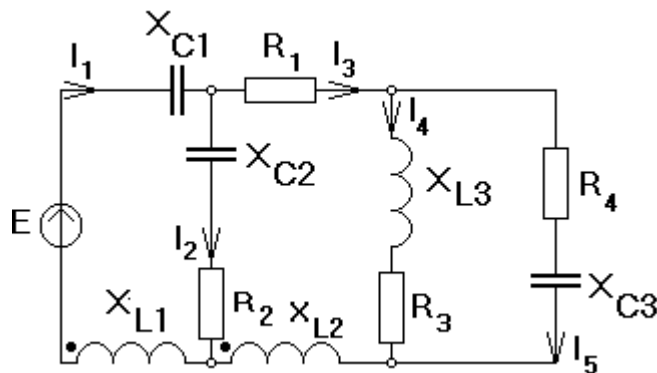
$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 460.90393265 \\ -460.90393265 \\ 162.51766478 \\ -162.51766478 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 460.904 \\ -460.904 \\ 162.518 \\ -162.518 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{1_0} \\ \omega_{1_2} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 460.904 \\ 162.518 \end{pmatrix}$$



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

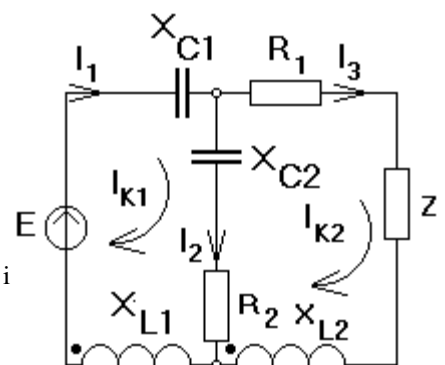
- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

імпеданс



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

$$Z = 37.128 - 14.02i$$



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

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 11 - 43 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 57.12838 + 5.979730 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 1.4595164147527336639 - 2.7754750445441983820 \cdot i \\ -1.9575259307186866378 - 1.4280810131611867464 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 1.46 - 2.775i$$

$$I_{K2} = -1.958 - 1.428i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 1.46 - 2.775i$$

$$F(I_1) = (3.136 \ -62.262)$$

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

$$I_2 = 3.417 - 1.347i$$

$$F(I_2) = (3.673 \ -21.52)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = -1.958 - 1.428i$$

$$F(I_3) = (2.423 \ -143.888)$$

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

$$I_4 = -1.074 + 1.75i$$

$$F(I_4) = (2.053 \ 121.538)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z}{R_4 - i \cdot X_{C3}} \quad I_5 = -0.884 - 3.178i \quad F(I_5) = (3.298 \quad -105.539)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

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

$$S_{M1} := I_1 \cdot \overline{I_3} \cdot i \cdot X_M \quad S_{M1} = -172.9 + 25.451i \quad F(S_{M1}) = (174.763 \quad 171.626)$$

$$S_{M2} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot i \cdot X_M \quad S_{M2} = 172.9 + 25.451i \quad F(S_{M2}) = (174.763 \quad 8.374)$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 419.243 + 130.273i$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 419.243$$

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

$$Q := Q + S_{M1} + S_{M2} \quad Q = 130.273i$$

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

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (i \cdot X_{L1}) \quad \phi_b = 97.142 + 51.083i \quad F(\phi_b) = (109.754 \quad 27.738)$$

$$\phi_{b'} := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_M \quad \phi_{b'} = 129.987 + 6.06i \quad F(\phi_{b'}) = (130.129 \quad 2.669)$$

$$\phi_c := \phi_{b'} + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = 167.575 - 8.761i \quad F(\phi_c) = (167.804 \quad -2.993)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_d = 140.627 - 77.102i \quad F(\phi_d) = (160.377 \quad -28.735)$$

$$\phi_1 := \phi_d - I_1 \cdot i \cdot X_{C1} \quad \phi_1 = 98.995 - 98.995i \quad F(\phi_1) = (140 \quad -45)$$

$$\phi_{1'} := \phi_1 - U \quad \phi_{1'} = -1.421 \times 10^{-14} - 2.842i \times 10^{-14}$$

$$\phi_{e'} := \phi_{b'} + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_{e'} = 187.111 - 72.241i \quad F(\phi_{e'}) = (200.572 \quad -21.111)$$

$$\phi_e := \phi_{e'} + I_1 \cdot i \cdot X_M \quad \phi_e = 250.947 - 38.672i \quad F(\phi_e) = (253.909 \quad -8.761)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_m = 236.986 - 15.925i \quad F(\phi_m) = (237.521 \quad -3.844)$$

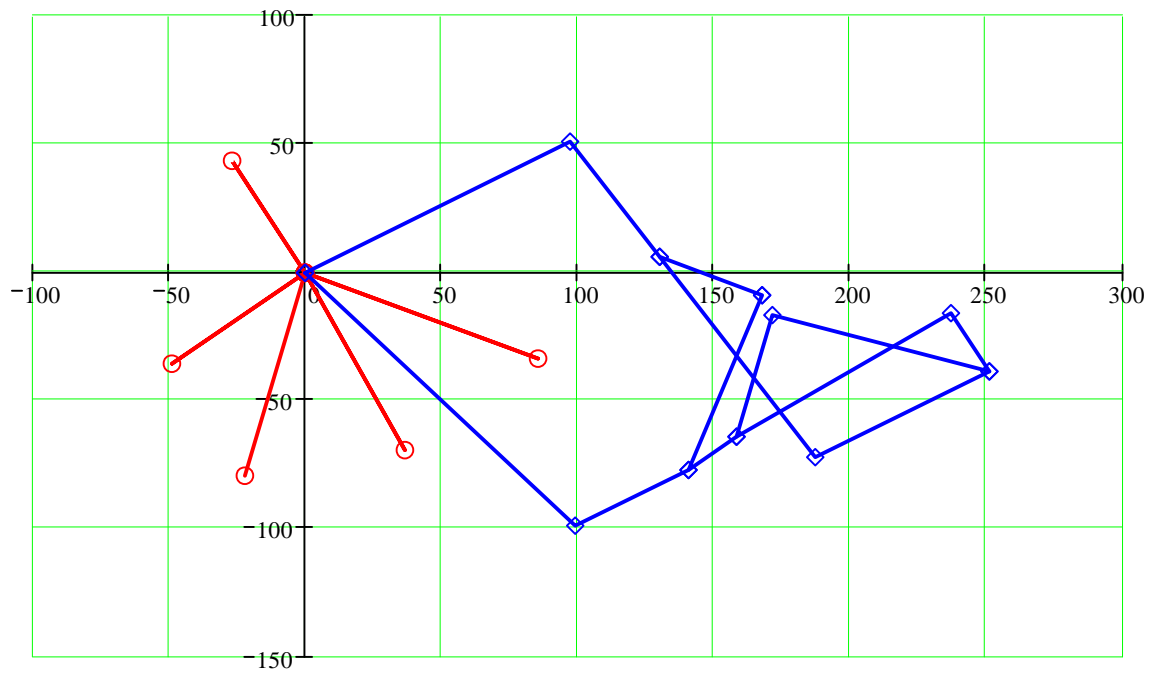
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_n = 158.245 - 64.249i \quad F(\phi_n) = (170.791 \quad -22.098)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_k = 171.499 - 16.581i \quad F(\phi_k) = (172.299 \quad -5.522)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = 158.245 - 64.249i \quad F(\phi_n) = (170.791 \quad -22.098)$$

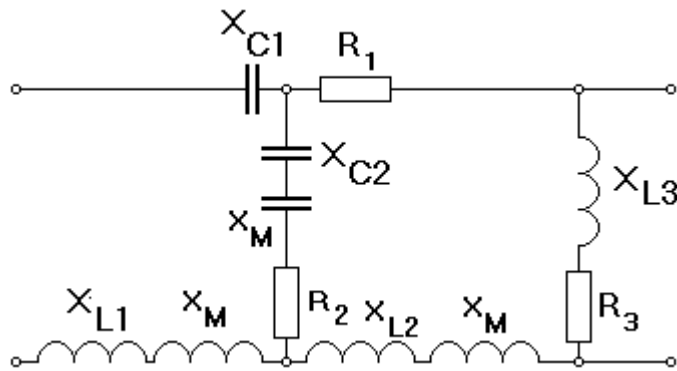
$$\phi_d := \phi_n + I_3 \cdot R_1 \quad \phi_d = 140.627 - 77.102i \quad F(\phi_d) = (160.377 \quad -28.735)$$





**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":**

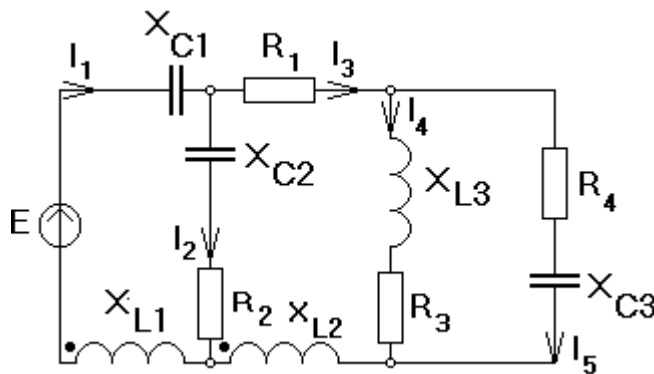
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 43 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 11 - 43 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 22 + 108 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 33.302 - 15.262i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_E} \quad I_{10} = 3.583 - 1.331i$$

$$F(I_{10}) = (3.822 \quad -20.379)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -2.174 - 0.83i$$

$$F(I_{30}) = (2.327 \quad -159.113)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 9.071 - 108.615i$$

$$F(U_{20}) = (108.993 \quad -85.226)$$

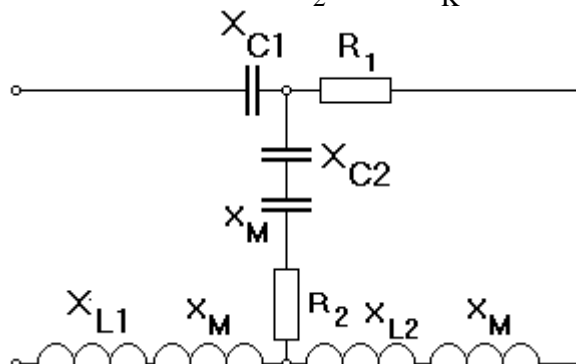
$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.981 + 0.83i$$

$$F(A) = (1.284 \quad 40.226)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.015 + 0.032i$$

$$F(C) = (0.035 \quad 64.848)$$

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 43 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 11 - 43 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 9 + 63 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 77.85 - 19.55i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 1.497 - 0.896i \quad F(I_{1K}) = (1.744 \quad -30.903)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -2.407 - 1.304i \quad F(I_{3K}) = (2.737 \quad -151.554)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -14.574 + 49.03i \quad F(B) = (51.151 \quad 106.554)$$

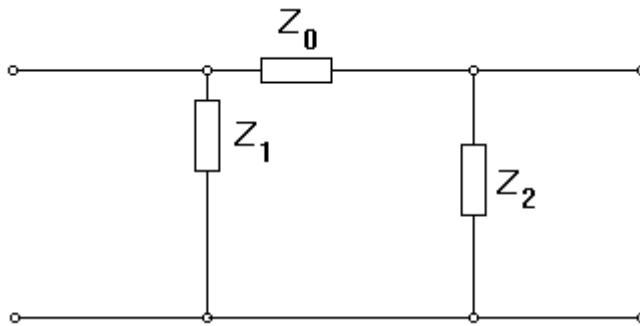
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.325 + 0.548i \quad F(D) = (0.637 \quad 120.651)$$

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

$$F(A) = (1.284 \quad 40.226) \quad F(B) = (51.151 \quad 106.554)$$

$$F(C) = (0.035 \quad 64.848) \quad F(D) = (0.637 \quad 120.651)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -14.574 + 49.03i \quad F(Z_0) = (51.151 \quad 106.554)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.018 + 0.022i \quad F(Y_1) = (0.028 \quad 50.967)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.016 - 4.259i \times 10^{-3} \quad F(Y_2) = (0.016 \quad -15.222)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -14.574 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 49.03$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 22.467 - 27.711i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 22.467 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 27.711$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 59.483 + 16.185i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 59.483 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 16.185$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 9.572 \times 10^{-5} \quad L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 0.043$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.13$$