

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 121*

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

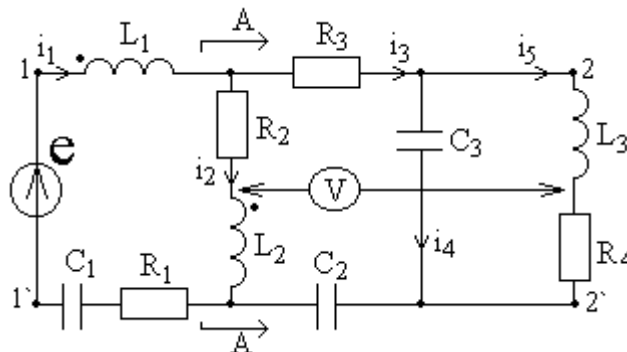
$$E := 100 \quad \psi := -20 \quad R_1 := 5 \quad R_2 := 7 \quad R_3 := 9 \quad R_4 := 12 \quad X_{L1} := 35 \quad X_{L2} := 40 \quad X_{L3} := 45$$

$$X_{C1} := 15 \quad X_{C2} := 20 \quad X_{C3} := 25 \quad X_M := 23 \quad f := 60$$

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

$$U = 93.969 - 34.202i$$

$$F(U) = (100 \quad -20)$$



## Символічний метод

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

$$Z_1 = 5 + 20i$$

$$Z_2 := R_2 + X_{L2} \cdot i$$

$$Z_2 = 7 + 40i$$

$$Z_3 := R_3 - X_{C2} \cdot i$$

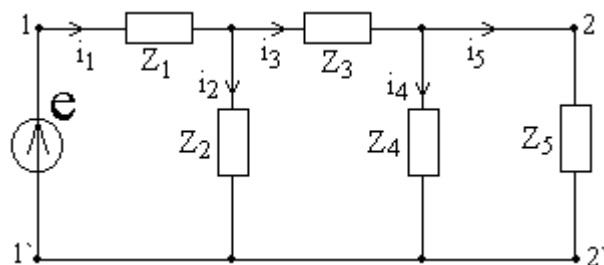
$$Z_3 = 9 - 20i$$

$$Z_4 := -X_{C3} \cdot i$$

$$Z_4 = -25i$$

$$Z_5 := R_4 + X_{L3} \cdot i$$

$$Z_5 = 12 + 45i$$



$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3$$

$$Z_{345} = 22.787 - 67.978i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_{345}}{Z_2 + Z_{345}} + Z_1$$

$$Z_E = 49.046 + 75.996i$$

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

$$I_1 = 0.246 - 1.078i$$

$$F(I_1) = (1.106 \quad -77.163)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + Z_2}$$

$$I_2 = -0.516 - 1.87i$$

$$F(I_2) = (1.94 \quad -105.425)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 0.762 + 0.792i$$

$$F(I_3) = (1.099 \quad 46.117)$$

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

$$I_4 = 1.025 + 1.94i$$

$$F(I_4) = (2.194 \quad 62.15)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -0.263 - 1.148i$$

$$F(I_5) = (1.178 \quad -102.919)$$

*Перевірка за першим законом Кіргофа:*

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

$$I_2 + I_4 + I_5 - I_1 = 0$$

### Баланс потужностей електричного кола :

$$S_r := U \cdot I_1$$

$$S_r = 59.952 + 92.895i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 59.952$$

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

$$Q = 92.895i$$

Знаходимо покази вольтметра:  $V := |-I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_5 \cdot i \cdot X_{L3}|$

$$V = 62.676$$

$$V := |I_2 \cdot i \cdot X_{L2} - I_3 \cdot (-j \cdot X_{C2}) - I_5 \cdot R_4|$$

$$V = 62.676$$

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

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -16.17 - 3.685i$$

$$F(\phi_b) = (16.584 \quad -167.163)$$

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

$$\phi_c = -14.941 - 9.075i$$

$$F(\phi_c) = (17.481 \quad -148.728)$$

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

$$\phi_d = 59.852 - 29.711i$$

$$F(\phi_d) = (66.82 \quad -26.4)$$

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

$$\phi_e = 56.24 - 42.8i$$

$$F(\phi_e) = (70.674 \quad -37.272)$$

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

$$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$$

$$F(\phi_1) = (100 \quad -20)$$

$$\phi_A := \phi_1 - U$$

$$\phi_A = -7.105i \times 10^{-15}$$

$$F(\phi_A) = (7.105 \times 10^{-15} \quad -90)$$

$$\phi_k := \phi_c + I_3 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$$

$$\phi_k = 0.896 - 24.306i$$

$$F(\phi_k) = (24.322 \quad -87.89)$$

$$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$$

$$\phi_z = 49.386 - 49.926i$$

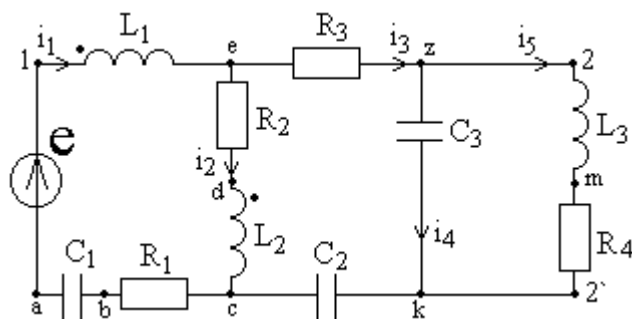
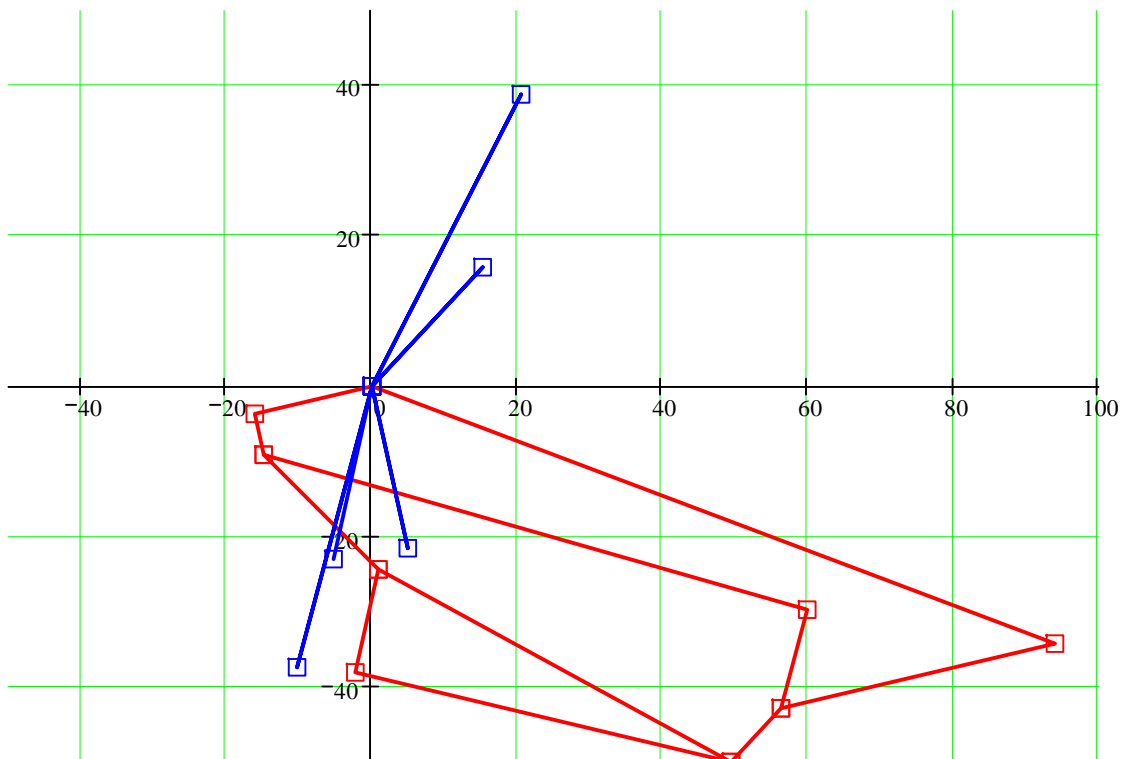
$$F(\phi_z) = (70.226 \quad -45.312)$$

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

$$\phi_m = -2.264 - 38.079i$$

$$F(\phi_m) = (38.146 \quad -93.402)$$

**Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:**



**Прийнявши активний опір  $R_2$  за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів.**

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

$$Z_3 = -20i$$

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

$$Z_4 = 9 + 45i$$

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

$$Z_5 = 12 - 25i$$

$$Z_E := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3$$

$$Z_E = 38.279 - 41.457i$$

$$R_E := \operatorname{Re}(Z_E)$$

$$R_E = 38.279$$

$$X_E := \operatorname{Im}(Z_E)$$

$$X_E = -41.457$$

Умова резонансу струмів на ділянці "ab" :

$$B_{ab} = B_2 + B_E \quad B_{ab} := 0 \quad B_2 = -B_E$$

$$B_2 := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2}$$

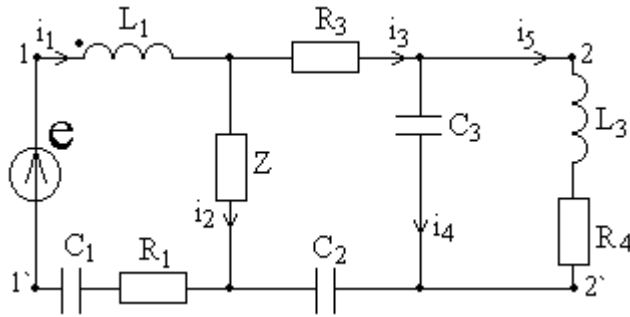
$$B_2 = 0.013$$

$$X_2 := \frac{1}{B_2}$$

$$X_2 = 76.802$$

Додатний знак свідчить про індуктивний характер опору

**Розрахувати струми для резонансного стану кола;**



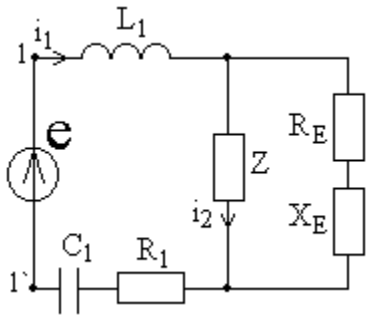
$$Z := \frac{(R_4 + X_{L3} \cdot i) \cdot (-X_{C3} \cdot i)}{R_4 + X_{L3} \cdot i - X_{C3} \cdot i} + R_3 - X_{C2} \cdot i$$

$$Z = 22.787 - 67.978i$$

$$Z = R_E - X_E \cdot i$$

$$R_E := \text{Re}(Z) \quad R_E = 22.787$$

$$X_E := |\text{Im}(Z)| \quad X_E = 67.978$$



За умовою резонансу:  $B_X = B_E = \frac{-X_E}{R_E^2 + X_E^2}$

$$B_X := \frac{-X_E}{R_E^2 + X_E^2} \quad B_X = -0.013$$

Реактивний опір вітки:  $X := \left| \frac{1}{B_X} \right| \quad X = 75.616$

**Розрахувати струми для резонансного стану кола**

$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i \quad Z_1 = 5 + 20i$$

$$Z_3 := R_3 - X_{C2} \cdot i \quad Z_3 = 9 - 20i$$

$$Z_4 := -X_{C3} \cdot i \quad Z_4 = -25i$$

$$Z_5 := R_4 + X_{L3} \cdot i \quad Z_5 = 12 + 45i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \quad Z_{345} = 22.787 - 67.978i$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left( \frac{9245}{136} + \frac{3099}{136} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left( \frac{3099}{136} - \frac{9245}{136} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 5 + 20 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-\left( 369800 \cdot X_N - 15116 \cdot X_N^2 - 13981445 - 1317089 \cdot i \cdot X_N + 26100 \cdot i \cdot X_N^2 - 55925780 \cdot i \right)}{\left( 2796289 - 73960 \cdot X_N + 544 \cdot X_N^2 \right)}$$

Уявна частина вхідного опору, яка за умовою резонансу дорівнює нулю:

$$X_{VX}(X_N) := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-\left( -1317089 \cdot X_N + 26100 \cdot X_N^2 - 55925780 \right)}{\left( 2796289 - 73960 \cdot X_N + 544 \cdot X_N^2 \right)}$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, } 50 \end{array} \right. \rightarrow \left( \begin{array}{l} 77.951447088883237892875848301667518893578420489788 \\ -27.488267012254885402454392362970200885915585240746 \end{array} \right)$$

$$\text{Отже резонанс кола можливий: } X_N = \left( \begin{array}{l} 77.951 \\ -27.488 \end{array} \right)$$

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = 77.951$$

$$Z_{VX}(X_n) = 228.793$$

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

$$I_1 = 0.411 - 0.149i$$

$$F(I_1) = (0.437 \quad -20)$$

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

$$I_2 = -0.535 - 1.141i$$

$$F(I_2) = (1.26 \quad -115.107)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 0.945 + 0.991i$$

$$F(I_3) = (1.37 \quad 46.362)$$

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

$$I_4 = 1.267 + 2.424i$$

$$F(I_4) = (2.735 \quad 62.394)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -0.322 - 1.432i$$

$$F(I_5) = (1.468 \quad -102.675)$$

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

$$S_1 = 43.708$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 43.708$$

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

$$Q = -7.105 \times 10^{-14}$$

При

$$X_n := X_{N_1} \quad X_n = -27.488$$

$$Z_{VX}(X_n) = 6.787$$

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

$$I_1 = 13.845 - 5.039i$$

$$F(I_1) = (14.733 \quad -20)$$

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

$$I_2 = 10.401 - 2.766i$$

$$F(I_2) = (10.762 \quad -14.893)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 3.444 - 2.273i$$

$$F(I_3) = (4.126 \quad -33.425)$$

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

$$I_4 = 7.863 - 2.463i$$

$$F(I_4) = (8.239 \quad -17.392)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -4.419 + 0.19i$$

$$F(I_5) = (4.423 \quad 177.539)$$

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

$$S_1 = 1.473 \times 10^3$$

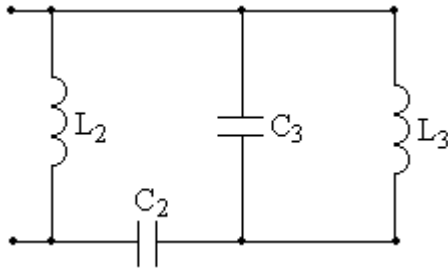
$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 1.473 \times 10^3$$

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

$$Q = -6.821 \times 10^{-13}$$

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



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

Знаходимо нулі:  $Z(p) = 0$

$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 188. \\ -188. \end{pmatrix}$$

$$w_1 := \begin{pmatrix} w_{10} \\ w_{11} \end{pmatrix} \quad w_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 188 \end{pmatrix}$$

**закортити**

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega}$$

$$L_3 = 0.119$$

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

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

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

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

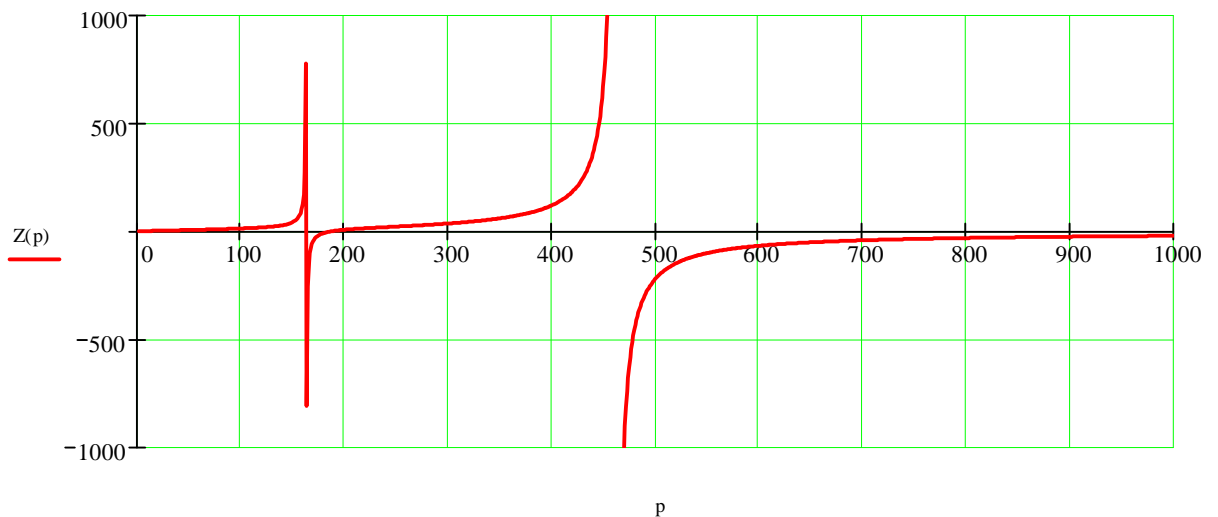
$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega}$$

$$L_2 = 0.106$$

Знаходимо полюси:  $\frac{1}{Z(p)} = 0$

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 460.9039327 \\ -460.9039327 \\ 162.5176649 \\ -162.5176649 \end{pmatrix}$$

$$w := \begin{pmatrix} w_0 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad w = \begin{pmatrix} 460.904 \\ 162.518 \end{pmatrix}$$



## 2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 ТА L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

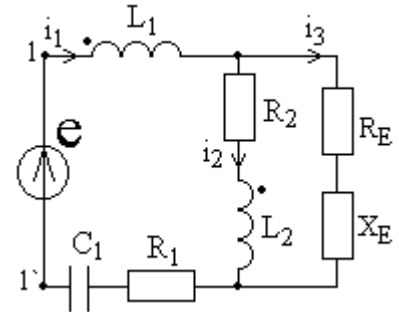
2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів, визначити покази вольметра;

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).

Спростимо схему до двох незалежних контурів

$$\begin{aligned} Z_3 &:= R_3 - X_{C2} \cdot i & Z_3 &= 9 - 20i \\ Z_4 &:= -X_{C3} \cdot i & Z_4 &= -25i \\ Z_5 &:= R_4 + X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 12 + 45i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 & Z_{345} &= 22.787 - 67.978i \end{aligned}$$



$$R_E := \operatorname{Re}(Z_{345}) \quad R_E = 22.787 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_{345}) \quad X_E = -67.978$$

Знайдемо контурні та міжконтурні опори схеми:

$$\begin{aligned} Z_{11} &:= R_1 + R_2 + X_{L2} \cdot i + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i + 2 \cdot X_M \cdot i & Z_{11} &= 12 + 106i \\ Z_{22} &:= R_E + X_E \cdot i + X_{L2} \cdot i + R_2 & Z_{22} &= 29.787 - 27.978i \\ Z_{12} &:= R_2 + X_{L2} \cdot i + X_M \cdot i & Z_{21} &:= Z_{12} & Z_{12} &= 7 + 63i \\ U &= 93.969 - 34.202i & F(U) &= (100 \quad -20) \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned} I_1 \cdot (Z_{11}) - I_3 \cdot (Z_{12}) &= U \\ -I_1 \cdot (Z_{21}) + I_3 \cdot (Z_{22}) &= 0 \\ \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} &:= \operatorname{Find}(I_1, I_3) & I_2 &:= I_1 - I_3 & I_1 &= 0.111 - 0.533i & F(I_1) &= (0.545 \quad -78.198) \\ & & I_2 &= -0.447 - 1.168i & I_2 &= -0.447 - 1.168i & F(I_2) &= (1.251 \quad -110.93) \\ & & I_3 &= 0.558 + 0.635i & I_3 &= 0.558 + 0.635i & F(I_3) &= (0.845 \quad 48.668) \\ I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 &= 0.721 + 1.526i & I_4 &= 0.721 + 1.526i & F(I_4) &= (1.688 \quad 64.7) \\ I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 &= -0.163 - 0.891i & I_5 &= -0.163 - 0.891i & F(I_5) &= (0.906 \quad -100.368) \end{aligned}$$

### Баланс потужностей електричного кола :

$$\begin{aligned} S_r &:= U \cdot \overline{I_1} & S_r &= 28.721 + 46.318i \\ P_r &:= \operatorname{Re}(S_r) & P_r &= 28.721 & Q_r &:= \operatorname{Im}(S_r) & Q_r &= 46.318 \\ S_{M1} &:= \overline{I_1} \cdot I_2 \cdot X_M \cdot i & S_{M1} &= 8.478 + 13.189i & F(S_{M1}) &= (15.679 \quad 57.268) \\ S_{M2} &:= \overline{I_2} \cdot I_1 \cdot X_M \cdot i & S_{M2} &= -8.478 + 13.189i & F(S_{M2}) &= (15.679 \quad 122.732) \\ S_{KC} &:= (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i + R_1 - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (R_2 + X_{L2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot (R_E + X_E \cdot i) + S_{M1} + S_{M2} \\ S_{KC} &= 28.721 + 46.318i \end{aligned}$$

Знаходимо покази вольметра:

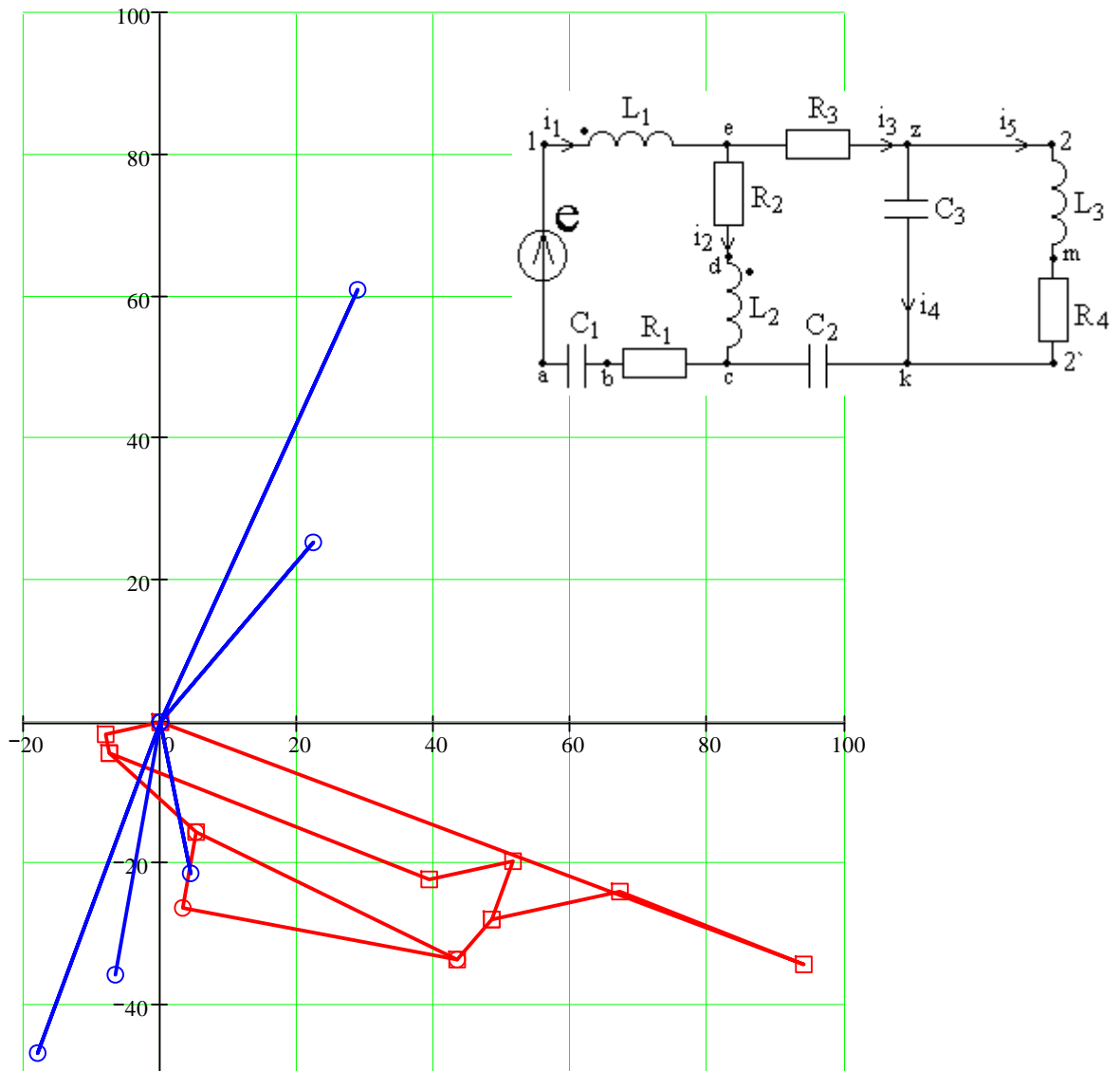
$$\begin{aligned} V &:= \left| -I_2 \cdot (R_2 + X_M \cdot i) + I_3 \cdot (R_3 - X_M \cdot i) + I_5 \cdot (X_{L3} \cdot i) \right| & V &= 36.212 \\ V &:= \left| I_2 \cdot i \cdot (X_{L2}) - I_3 \cdot [-i \cdot (X_{C2})] - I_5 \cdot (R_4) \right| & V &= 36.212 \end{aligned}$$



**Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:**

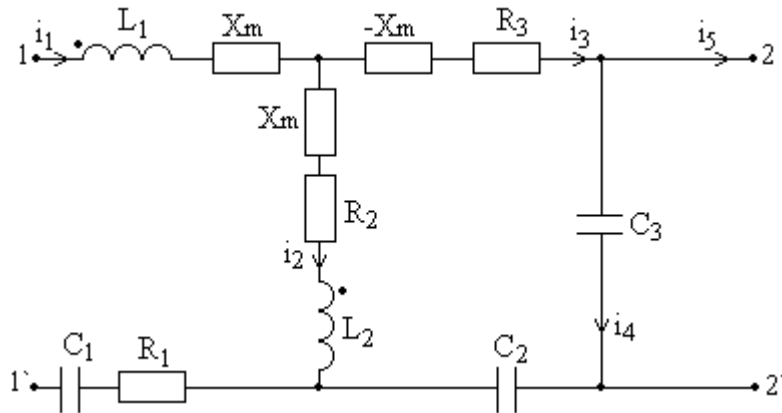
$\phi_a := 0$		
$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$	$\phi_b = -8.002 - 1.672i$	$F(\phi_b) = (8.175 \quad -168.198)$
$\phi_c := \phi_b + I_1 \cdot R_1$	$\phi_c = -7.445 - 4.339i$	$F(\phi_c) = (8.617 \quad -149.763)$
$\phi_{d'} := \phi_c + I_2 \cdot X_{L2} \cdot i$	$\phi_{d'} = 39.285 - 22.212i$	$F(\phi_{d'}) = (45.13 \quad -29.484)$
$\phi_d := \phi_{d'} + I_1 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_d = 51.555 - 19.649i$	$F(\phi_d) = (55.173 \quad -20.863)$
$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot R_2$	$\phi_e = 48.428 - 27.826i$	$F(\phi_e) = (55.853 \quad -29.882)$
$\phi_{1'} := \phi_e + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$	$\phi_{1'} = 67.099 - 23.925i$	$F(\phi_{1'}) = (71.237 \quad -19.624)$
$\phi_1 := \phi_{1'} + I_2 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$	$F(\phi_1) = (100 \quad -20)$
$\phi_A := \phi_1 - U$	$\phi_A = 1.421i \times 10^{-14}$	$F(\phi_A) = (1.421 \times 10^{-14} \quad 90)$
$\phi_k := \phi_c + I_3 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$	$\phi_k = 5.251 - 15.505i$	$F(\phi_k) = (16.37 \quad -71.292)$
$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$	$\phi_z = 43.403 - 33.539i$	$F(\phi_z) = (54.852 \quad -37.695)$
$\phi_e := \phi_z + I_3 \cdot R_3$	$\phi_e = 48.428 - 27.826i$	$F(\phi_e) = (55.853 \quad -29.882)$
$\phi_m := \phi_k + I_5 \cdot R_4$	$\phi_m = 3.294 - 26.201i$	$F(\phi_m) = (26.407 \quad -82.835)$
$\phi_z := \phi_m + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$	$\phi_z = 43.403 - 33.539i$	$F(\phi_z) = (54.852 \quad -37.695)$

**Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:**



ВІДКИНУВШИ ВІТКУ МІЖ ЗАТИСКАЧАМИ 2-2", ВИКОНАТИ ЕКВІВАЛЕНТУВАННЯ  
ВЗАЄМОІНДУКТИВНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ВІТОК. ОДЕРЖАНУ СХЕМУ РОЗГЛЯДАТИ ЯК  
ЧОТИРИПОЛЮСНИК З ЗАТИСКАЧАМИ 1-1" ТА 2-2" :

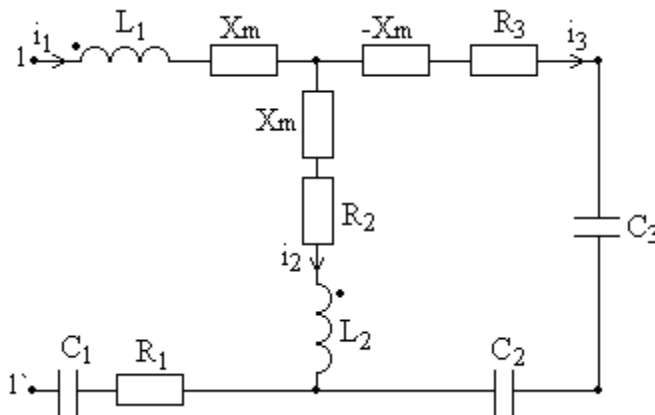
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника **A, B, C, D**



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

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

Неробочий хід:  $I_2 = 0$   $U_{10} := U$



$$Z_1 := R_1 + j \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \quad Z_1 = 5 + 43i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 7 + 63i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C3} + X_{C2}) \quad Z_3 = 9 - 68i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 250.897 + 125.53i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 11.918 - 42.443i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}}$$

$$I_{10} = 0.245 - 0.259i$$

$$F(I_{10}) = (0.356 \quad -46.58)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

$$I_{30} = 0.784 + 1.096i$$

$$F(I_{30}) = (1.348 \quad 54.434)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (-X_{C3} \cdot i)$$

$$U_{20} = 27.41 - 19.599i$$

$$F(U_{20}) = (33.697 \quad -35.566)$$

$$A := \frac{U}{U_{20}}$$

$$A = 2.859 + 0.796i$$

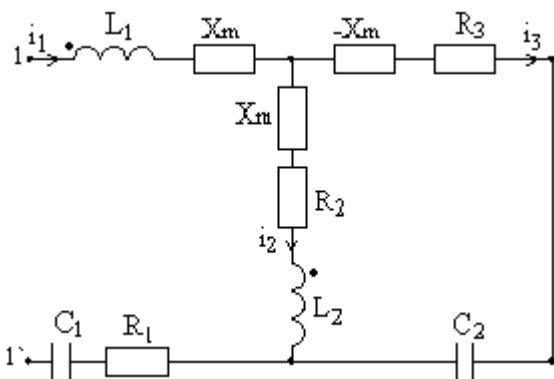
$$F(A) = (2.968 \quad 15.566)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}}$$

$$C = 0.01 - 2.021i \times 10^{-3}$$

$$F(C) = (0.011 \quad -11.014)$$

Коротке замикання:  $U_2 = 0$   $U_K := U$



$$Z_1 = 5 + 43i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 7 + 63i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C2}) \quad Z_3 = 9 - 43i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 80.72 - 35.024i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K}$$

$$I_{1K} = 1.134 + 0.069i$$

$$F(I_{1K}) = (1.136 \quad 3.456)$$

$$I_{2K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

$$I_{2K} = 2.282 + 1.644i$$

$$F(I_{2K}) = (2.813 \quad 35.776)$$

$$B := \frac{U}{I_{2K}}$$

$$B = 19.997 - 29.397i$$

$$F(B) = (35.554 \quad -55.776)$$

$$D := \frac{I_{1K}}{I_{2K}}$$

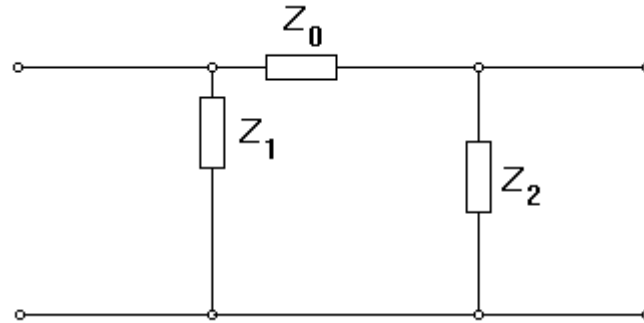
$$D = 0.341 - 0.216i$$

$$F(D) = (0.404 \quad -32.32)$$

### Перевірка

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

### Расчитать параметры R,L,C П - схемы замещения.



$$Z_0 := B$$

$$Z_0 = 19.997 - 29.397i$$

$$F(Z_0) = (35.554 \quad -55.776)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B}$$

$$Y_1 = -5.394 \times 10^{-3} - 0.019i$$

$$F(Y_1) = (0.019 \quad -106.063)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B}$$

$$Y_2 = 0.011 + 0.056i$$

$$F(Y_2) = (0.057 \quad 78.968)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0)$$

$$R_0 = 19.997$$

$$X_{C0} := -\operatorname{Im}(Z_0)$$

$$X_{C0} = 29.397$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1}$$

$$Z_1 = -14.194 + 49.296i$$

$$R_1 := \operatorname{Re}(Z_1)$$

$$R_1 = -14.194$$

$$X_{L1} := \operatorname{Im}(Z_1)$$

$$X_{L1} = 49.296$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2}$$

$$Z_2 = 3.364 - 17.256i$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(Z_2)$$

$$R_2 = 3.364$$

$$X_{C2} := -\operatorname{Im}(Z_2)$$

$$X_{C2} = 17.256$$

$$L_1 := \frac{X_{L1}}{\omega}$$

$$L_1 = 0.131$$

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

$$C_2 = 1.537 \times 10^{-4}$$

$$C_0 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C0}}$$

$$C_0 = 9.023 \times 10^{-5}$$