

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 241*

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.

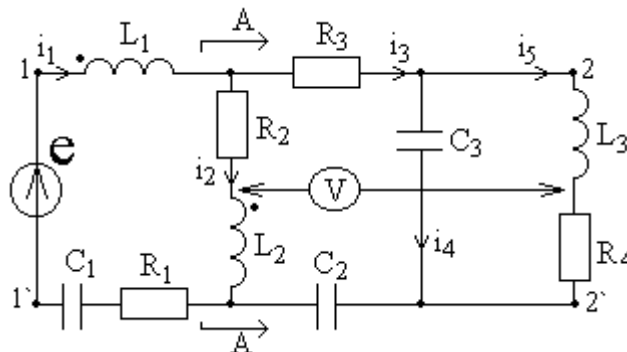
$$E := 120 \quad \psi := -30 \quad R_1 := 7 \quad R_2 := 9 \quad R_3 := 11 \quad R_4 := 13 \quad X_{L1} := 45 \quad X_{L2} := 50 \quad X_{L3} := 55$$

$$X_{C1} := 25 \quad X_{C2} := 30 \quad X_{C3} := 35 \quad X_M := 27 \quad f := 60$$

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

$$U = 103.923 - 60i$$

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



## Символічний метод

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

$$Z_1 = 7 + 20i$$

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

$$Z_2 = 9 + 50i$$

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

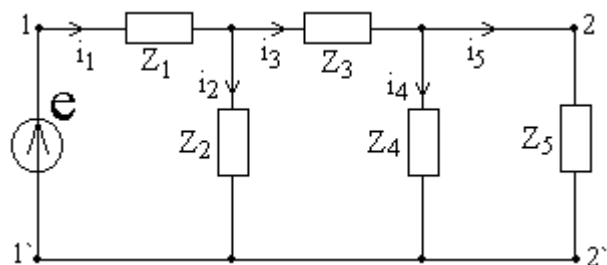
$$Z_3 = 11 - 30i$$

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

$$Z_4 = -35i$$

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

$$Z_5 = 13 + 55i$$



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

$$Z_{345} = 38.988 - 108.058i$$

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

$$Z_E = 45.67 + 87.142i$$

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

$$I_1 = -0.05 - 1.219i$$

$$F(I_1) = (1.22 \quad -92.341)$$

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

$$I_2 = -0.699 - 1.724i$$

$$F(I_2) = (1.86 \quad -112.077)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 0.649 + 0.505i$$

$$F(I_3) = (0.823 \quad 37.879)$$

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

$$I_4 = 1.044 + 1.646i$$

$$F(I_4) = (1.949 \quad 57.605)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -0.395 - 1.141i$$

$$F(I_5) = (1.207 \quad -109.097)$$

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 :

$$S_r := U \cdot I_1$$

$$S_r = 67.943 + 129.64i$$

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

$$P = 67.943$$

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

$$Q = 129.64i$$

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

$$V = 76.174$$

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

$$V = 76.174$$

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

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -30.467 + 1.246i$$

$$F(\phi_b) = (30.493 \quad 177.659)$$

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

$$\phi_c = -30.816 - 7.285i$$

$$F(\phi_c) = (31.666 \quad -166.699)$$

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

$$\phi_d = 55.374 - 42.243i$$

$$F(\phi_d) = (69.648 \quad -37.339)$$

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

$$\phi_e = 49.082 - 57.758i$$

$$F(\phi_e) = (75.796 \quad -49.642)$$

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

$$\phi_1 = 103.923 - 60i$$

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

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

$$\phi_A = 2.842 \times 10^{-14} - 1.421i \times 10^{-14}$$

$$F(\phi_A) = (3.178 \times 10^{-14} \quad -26.565)$$

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

$$\phi_k = -15.663 - 26.765i$$

$$F(\phi_k) = (31.011 \quad -120.336)$$

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

$$\phi_z = 41.939 - 63.314i$$

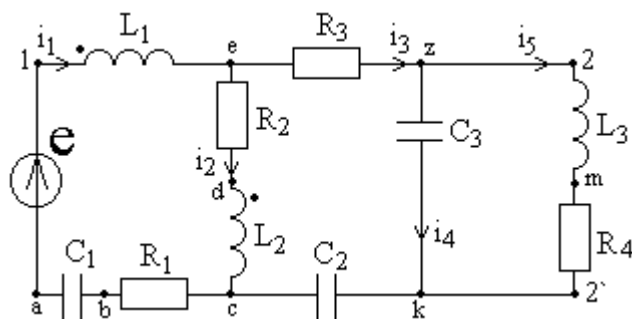
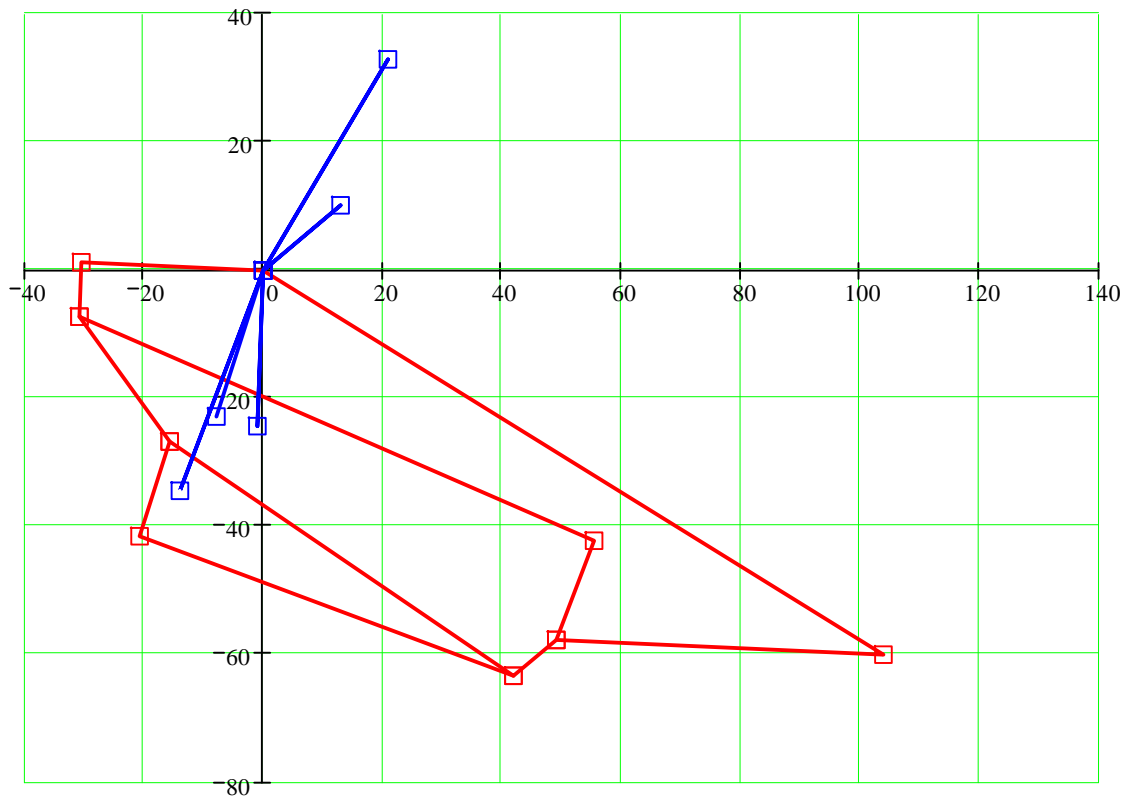
$$F(\phi_z) = (75.944 \quad -56.479)$$

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

$$\phi_m = -20.797 - 41.594i$$

$$F(\phi_m) = (46.503 \quad -116.565)$$

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



**Прийнявши активний опір R2 за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів.**

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

$$Z_3 = -30i$$

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

$$Z_4 = 11 + 55i$$

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

$$Z_5 = 13 - 35i$$

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

$$Z_E = 57.615 - 64.262i$$

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

$$R_E = 57.615$$

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

$$X_E = -64.262$$

Умова резонансу струмів на ділянці "ab" :

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

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

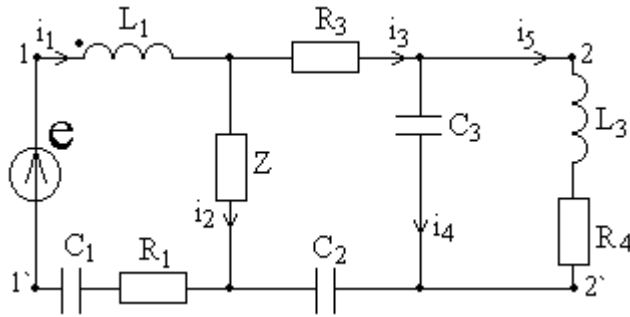
$$B_2 = 8.627 \times 10^{-3}$$

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

$$X_2 = 115.917$$

Додатний знак свідчить про індуктивний характер опору

**Розрахувати струми для резонансного стану кола;**



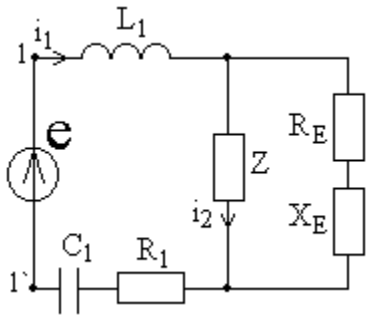
$$Z := \frac{(R_4 + X_{L3} \cdot i) \cdot (-X_{C3} \cdot i)}{R_4 + X_{L3} \cdot i - X_{C3} \cdot i} + R_3 - X_{C2} \cdot i$$

$$Z = 38.988 - 108.058i$$

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

$$R_E := \text{Re}(Z) \quad R_E = 38.988$$

$$X_E := |\text{Im}(Z)| \quad X_E = 108.058$$



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

$$B_X := \frac{-X_E}{R_E^2 + X_E^2} \quad B_X = -8.188 \times 10^{-3}$$

Реактивний опір вітки:  $X := \left| \frac{1}{B_X} \right| \quad X = 122.125$

**Розрахувати струми для резонансного стану кола**

$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i \quad Z_1 = 7 + 20i$$

$$Z_3 := R_3 - X_{C2} \cdot i \quad Z_3 = 11 - 30i$$

$$Z_4 := -X_{C3} \cdot i \quad Z_4 = -35i$$

$$Z_5 := R_4 + X_{L3} \cdot i \quad Z_5 = 13 + 55i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \quad Z_{345} = 38.988 - 108.058i$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left( \frac{61485}{569} + \frac{22184}{569} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left( \frac{22184}{569} - \frac{61485}{569} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 7 + 20 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-\left( 860790 \cdot X_N - 26167 \cdot X_N^2 - 52561943 - 5049449 \cdot i \cdot X_N + 50105 \cdot i \cdot X_N^2 - 150176980 \cdot i \right)}{\left( 7508849 - 122970 \cdot X_N + 569 \cdot X_N^2 \right)}$$

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

$$X_{VX}(X_N) := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-\left( -5049449 \cdot X_N + 50105 \cdot X_N^2 - 150176980 \right)}{\left( 7508849 - 122970 \cdot X_N + 569 \cdot X_N^2 \right)}$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, } 50 \end{array} \right. \rightarrow \left( \begin{array}{l} 124.79474766688224812877322794724133598142216970473 \\ -24.017400096779463975495111990749967854488729928257 \end{array} \right)$$

Отже резонанс кола неможливий при будь-яких опорах у другій вітці, так як:  $X_N = \begin{pmatrix} 124.795 \\ -24.017 \end{pmatrix}$

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = 124.795 \quad Z_{VX}(X_n) = 344.294$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 0.302 - 0.174i \quad F(I_1) = (0.349 \quad -30)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = -0.519 - 0.788i \quad F(I_2) = (0.944 \quad -123.393)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 0.821 + 0.614i \quad F(I_3) = (1.025 \quad 36.767)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = 1.341 + 2.025i \quad F(I_4) = (2.429 \quad 56.492)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -0.52 - 1.412i \quad F(I_5) = (1.504 \quad -110.209)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 41.825$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 41.825$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = -1.421 \times 10^{-14}$$

При  $X_n := X_{N_1} \quad X_n = -24.017 \quad Z_{VX}(X_n) = 8.186$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 12.695 - 7.33i \quad F(I_1) = (14.659 \quad -30)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 10.934 - 5.477i \quad F(I_2) = (12.229 \quad -26.607)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 1.762 - 1.853i \quad F(I_3) = (2.557 \quad -46.446)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = 5.411 - 2.724i \quad F(I_4) = (6.057 \quad -26.721)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -3.649 + 0.871i \quad F(I_5) = (3.751 \quad 166.578)$$

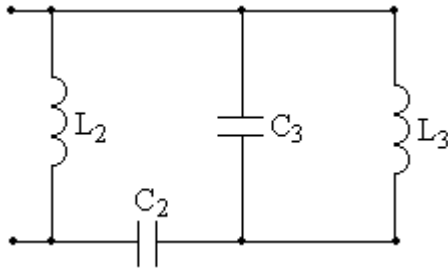
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 1.759 \times 10^3$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.759 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = 5.684 \times 10^{-13}$$

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

**закоротити**



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

$$L_3 = 0.146$$

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

$$C_2 = 8.842 \times 10^{-5}$$

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

$$C_3 = 7.579 \times 10^{-5}$$

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

$$L_2 = 0.133$$

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

Знаходимо нулі:  $Z(p) = 0$

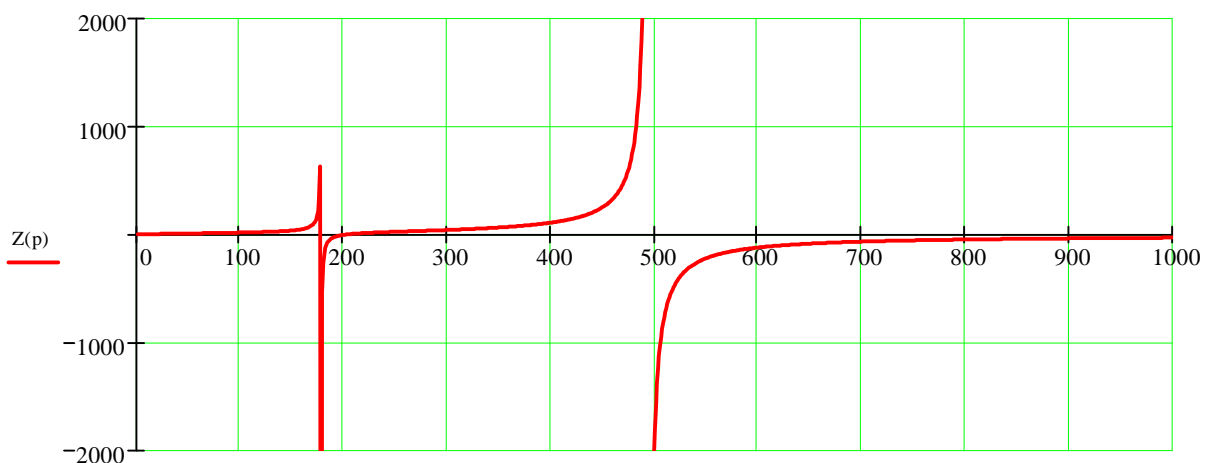
$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 204. \\ -204. \end{pmatrix}$$

$$w_1 := \begin{pmatrix} w_{10} \\ w_{11} \end{pmatrix} \quad w_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 204 \end{pmatrix}$$

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

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 493.4897765 \\ -493.4897765 \\ 177.9558956 \\ -177.9558956 \end{pmatrix}$$

$$w := \begin{pmatrix} w_0 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad w = \begin{pmatrix} 493.49 \\ 177.956 \end{pmatrix}$$



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

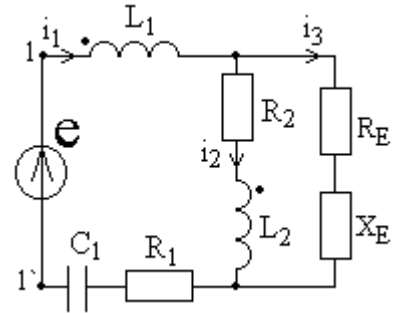
2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;

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

$$\begin{aligned} Z_3 &:= R_3 - X_{C2} \cdot i & Z_3 &= 11 - 30i \\ Z_4 &:= -X_{C3} \cdot i & Z_4 &= -35i \\ Z_5 &:= R_4 + X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 13 + 55i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 & Z_{345} &= 38.988 - 108.058i \end{aligned}$$



$$R_E := \operatorname{Re}(Z_{345}) \quad R_E = 38.988 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_{345}) \quad X_E = -108.058$$

Знайдемо контурні та міжконтурні опори схеми:

$$\begin{aligned} Z_{11} &:= R_1 + R_2 + X_{L2} \cdot i + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i + 2 \cdot X_M \cdot i & Z_{11} &= 16 + 124i \\ Z_{22} &:= R_E + X_E \cdot i + X_{L2} \cdot i + R_2 & Z_{22} &= 47.988 - 58.058i \\ Z_{12} &:= R_2 + X_{L2} \cdot i + X_M \cdot i & Z_{21} &:= Z_{12} & Z_{12} &= 9 + 77i \\ U &= 103.923 - 60i & F(U) &= (120 \quad -30) \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned} I_1 \cdot (Z_{11}) - I_3 \cdot (Z_{12}) &= U \\ -I_1 \cdot (Z_{21}) + I_3 \cdot (Z_{22}) &= 0 \\ \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} &:= \operatorname{Find}(I_1, I_3) & I_2 &:= I_1 - I_3 & I_1 &= -0.057 - 0.63i & F(I_1) &= (0.633 \quad -95.168) \\ & & I_2 &= -0.566 - 1.036i & I_2 &= -0.566 - 1.036i & F(I_2) &= (1.181 \quad -118.642) \\ & & I_3 &= 0.509 + 0.406i & I_3 &= 0.509 + 0.406i & F(I_3) &= (0.651 \quad 38.59) \\ I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 &= 0.81 + 1.313i & I_4 &= 0.81 + 1.313i & F(I_4) &= (1.543 \quad 58.315) \\ I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 &= -0.301 - 0.907i & I_5 &= -0.301 - 0.907i & F(I_5) &= (0.956 \quad -108.386) \end{aligned}$$

### Баланс потужностей електричного кола :

$$\begin{aligned} S_r &:= U \cdot \overline{I_1} & S_r &= 31.886 + 68.908i \\ P_r &:= \operatorname{Re}(S_r) & P_r &= 31.886 & Q_r &:= \operatorname{Im}(S_r) & Q_r &= 68.908 \\ S_{M1} &:= \overline{I_1} \cdot I_2 \cdot X_M \cdot i & S_{M1} &= 8.035 + 18.504i & F(S_{M1}) &= (20.173 \quad 66.527) \\ S_{M2} &:= \overline{I_2} \cdot I_1 \cdot X_M \cdot i & S_{M2} &= -8.035 + 18.504i & F(S_{M2}) &= (20.173 \quad 113.473) \\ S_{KC} &:= (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i + R_1 - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (R_2 + X_{L2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot (R_E + X_E \cdot i) + S_{M1} + S_{M2} \\ S_{KC} &= 31.886 + 68.908i \end{aligned}$$

Знаходимо покази вольтметра:

$$\begin{aligned} V &:= \left| -I_2 \cdot (R_2 + X_M \cdot i) + I_3 \cdot (R_3 - X_{C2} \cdot i) + I_5 \cdot (X_{L3} \cdot i) \right| & V &= 43.567 \\ V &:= \left| I_2 \cdot i \cdot (X_{L2}) - I_3 \cdot [-i \cdot (X_{C2})] - I_5 \cdot (R_4) \right| & V &= 43.567 \end{aligned}$$



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

$$\phi_a := 0$$

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

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

$$\phi_{d'} := \phi_c + I_2 \cdot X_{L2} \cdot i$$

$$\phi_d := \phi_{d'} + I_1 \cdot X_M \cdot i$$

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

$$\phi_{l'} := \phi_e + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$$

$$\phi_l := \phi_{l'} + I_2 \cdot X_M \cdot i$$

$$\phi_A := \phi_l - U$$

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

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

$$\phi_e := \phi_z + I_3 \cdot R_3$$

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

$$\phi_z := \phi_m + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$$

$$\phi_b = -15.754 + 1.425i$$

$$\phi_c = -16.153 - 2.986i$$

$$\phi_{d'} = 35.664 - 31.287i$$

$$\phi_d = 52.679 - 32.826i$$

$$\phi_e = 47.585 - 42.153i$$

$$\phi_{l'} = 75.942 - 44.718i$$

$$\phi_l = 103.923 - 60i$$

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

$$\phi_k = -3.967 - 18.257i$$

$$\phi_z = 41.985 - 46.621i$$

$$\phi_e = 47.585 - 42.153i$$

$$\phi_m = -7.885 - 30.044i$$

$$\phi_z = 41.985 - 46.621i$$

$$F(\phi_b) = (15.818 \quad 174.832)$$

$$F(\phi_c) = (16.427 \quad -169.526)$$

$$F(\phi_{d'}) = (47.443 \quad -41.259)$$

$$F(\phi_d) = (62.069 \quad -31.928)$$

$$F(\phi_e) = (63.57 \quad -41.536)$$

$$F(\phi_{l'}) = (88.129 \quad -30.491)$$

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

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

$$F(\phi_k) = (18.683 \quad -102.26)$$

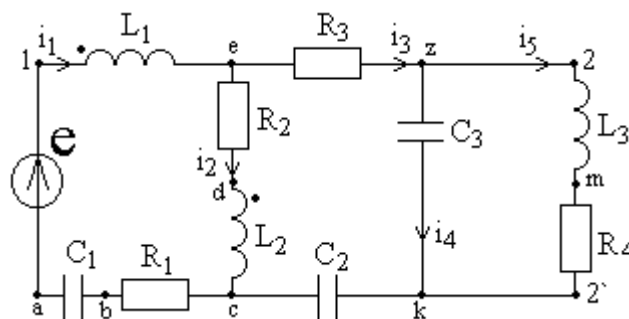
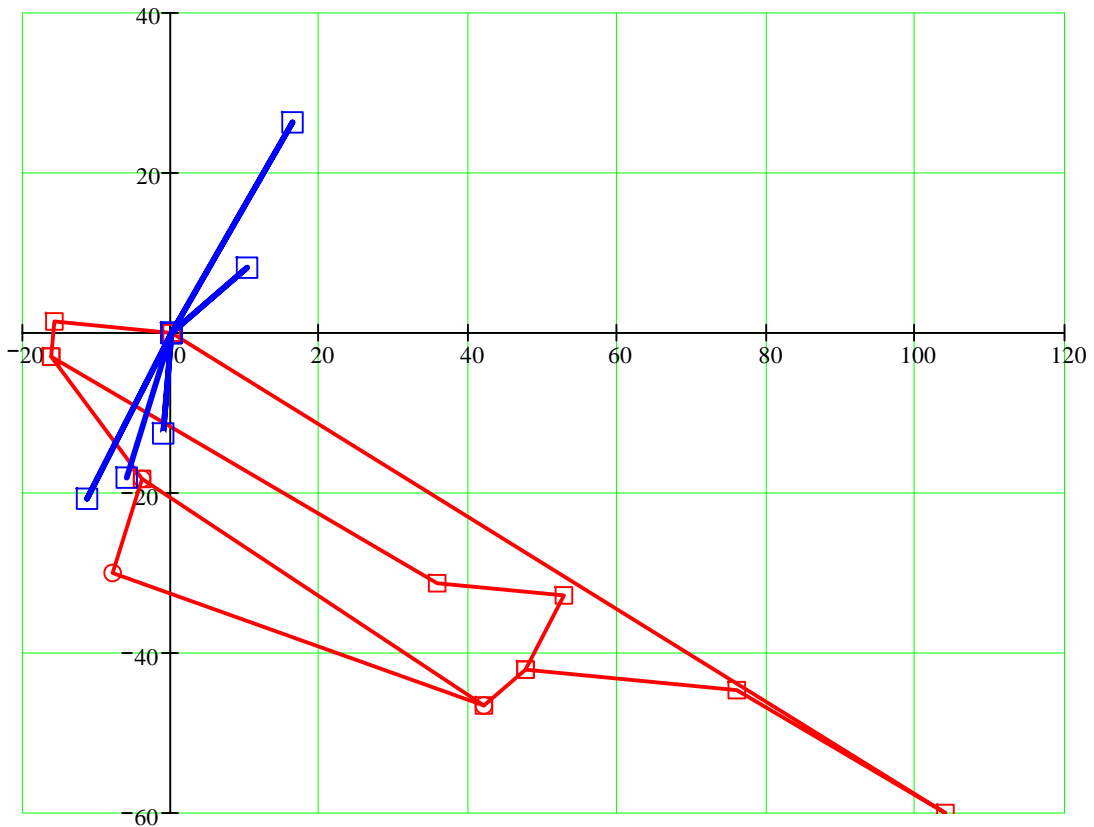
$$F(\phi_z) = (62.74 \quad -47.995)$$

$$F(\phi_e) = (63.57 \quad -41.536)$$

$$F(\phi_m) = (31.062 \quad -104.706)$$

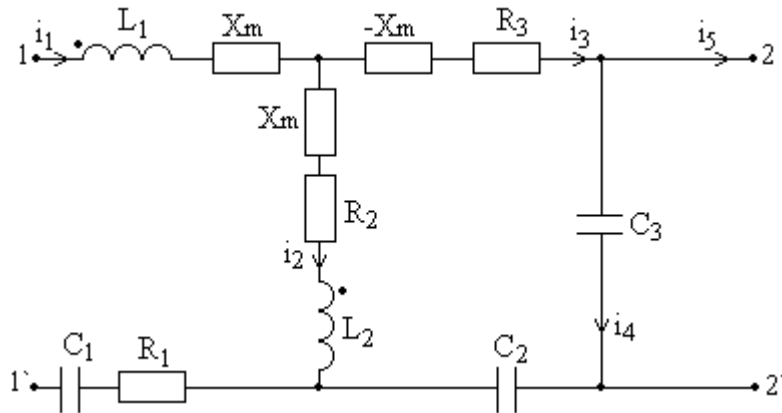
$$F(\phi_z) = (62.74 \quad -47.995)$$

**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" :

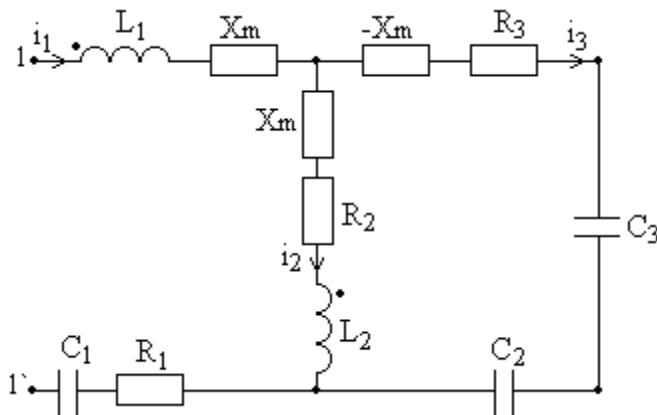
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + j \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \quad Z_1 = 7 + 47i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 9 + 77i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C3} + X_{C2}) \quad Z_3 = 11 - 92i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 236.4 + 220i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 14.991 - 62.808i$$

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

$$I_{10} = 0.109 - 0.355i$$

$$F(I_{10}) = (0.372 \quad -72.942)$$

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

$$I_{30} = 0.782 + 0.846i$$

$$F(I_{30}) = (1.152 \quad 47.261)$$

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

$$U_{20} = 29.621 - 27.371i$$

$$F(U_{20}) = (40.331 \quad -42.739)$$

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

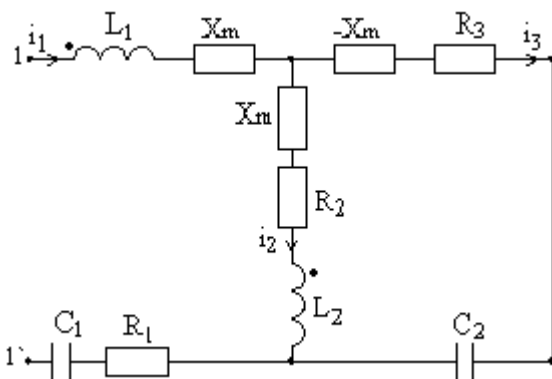
$$A = 2.902 + 0.656i$$

$$F(A) = (2.975 \quad 12.739)$$

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

$$C = 7.963 \times 10^{-3} - 4.635i \times 10^{-3} \quad F(C) = (9.214 \times 10^{-3} \quad -30.203)$$

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



$$Z_1 = 7 + 47i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 9 + 77i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C2}) \quad Z_3 = 11 - 57i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 127.55 - 56.85i$$

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

$$I_{1K} = 0.855 - 0.089i$$

$$F(I_{1K}) = (0.859 \quad -5.977)$$

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

$$I_{2K} = 1.99 + 1.261i$$

$$F(I_{2K}) = (2.355 \quad 32.356)$$

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

$$B = 23.639 - 45.133i$$

$$F(B) = (50.949 \quad -62.356)$$

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

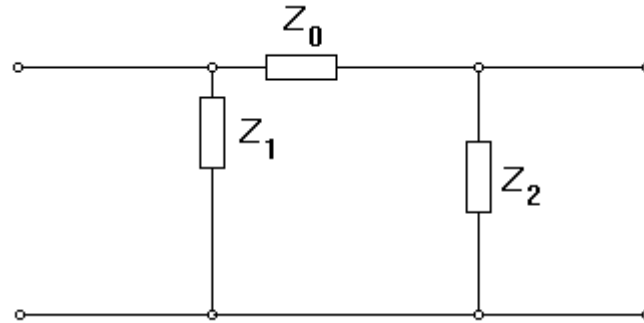
$$D = 0.286 - 0.226i$$

$$F(D) = (0.365 \quad -38.333)$$

### Перевірка

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

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



$$Z_0 := B$$

$$Z_0 = 23.639 - 45.133i$$

$$F(Z_0) = (50.949 \quad -62.356)$$

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

$$Y_1 = -2.566 \times 10^{-3} - 0.014i$$

$$F(Y_1) = (0.015 \quad -100.054)$$

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

$$Y_2 = 5.915 \times 10^{-3} + 0.039i$$

$$F(Y_2) = (0.039 \quad 81.387)$$

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

$$R_0 = 23.639$$

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

$$X_{C0} = 45.133$$

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

$$Z_1 = -11.878 + 66.994i$$

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

$$R_1 = -11.878$$

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

$$X_{L1} = 66.994$$

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

$$Z_2 = 3.792 - 25.035i$$

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

$$R_2 = 3.792$$

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

$$X_{C2} = 25.035$$

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

$$L_1 = 0.178$$

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

$$C_2 = 1.06 \times 10^{-4}$$

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

$$C_0 = 5.877 \times 10^{-5}$$