

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 314*

Виконав: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Перевірив: \_\_\_\_\_

### Умова завдання

В електричному колі діє джерело синусоїдної ЄРС:

#### Необхідно:

#### 1. ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА БЕЗ ВЗАЄМНОЇ ІНДУКЦІЇ:

- 1.1. Розрахувати вхідний струм методом провідностей;
- 1.2. Розрахувати струми віток символічним методом скласти баланс активних і реактивних потужностей кола;
- 1.3. Побудувати діаграму струмів і топографічну діаграму напруг, показати кут зсуву фаз;
- 1.4. Приймаючи активний опір  $R_2$  за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів;
- 1.5. Розрахувати струму для резонансного стану кола, 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 замкнути.

#### 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, 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).

#### 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 чотиріполюсника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

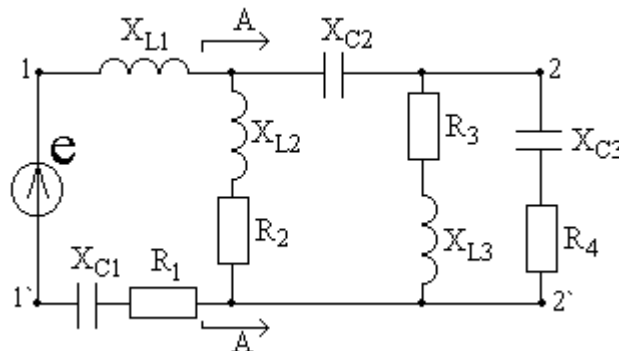
$$E := 140 \quad \psi := -45 \quad R_1 := 9 \quad R_2 := 11 \quad R_3 := 13 \quad R_4 := 15 \quad X_{L1} := 30 \quad X_{L2} := 35 \quad X_{L3} := 40$$

$$X_{C1} := 10 \quad X_{C2} := 15 \quad X_{C3} := 20 \quad X_M := 20 \quad f := 50$$

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

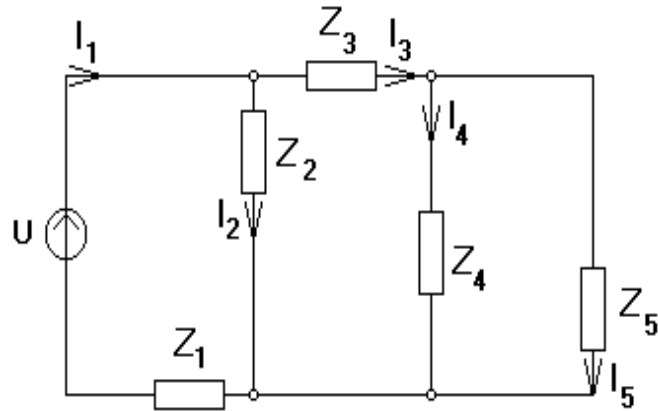
$$U = 98.995 - 98.995i$$

$$F(U) = (140 \quad -45)$$



**Для електричного кола без взаємної індукції:**

**Розрахувати всі струми символьним методом**



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 9 + 20 \cdot i$$

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 13 + 40 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2}) \rightarrow 11 + 35 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 15 - 20 \cdot i$$

$$Z_3 := -i \cdot X_{C2} \rightarrow -15 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 40.486 + 30.167i$$

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

$$I_1 = 0.401 - 2.744i$$

$$F(I_1) = (2.773 \quad -81.69)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3}$$

$$I_2 = -1.809 - 1.726i$$

$$F(I_2) = (2.501 \quad -136.348)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left( Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \right)}$$

$$I_3 = 2.21 - 1.018i$$

$$F(I_3) = (2.433 \quad -24.722)$$

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

$$I_4 = -0.702 - 1.623i$$

$$F(I_4) = (1.768 \quad -113.39)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5}$$

$$I_5 = 2.912 + 0.605i$$

$$F(I_5) = (2.974 \quad 11.736)$$

**Перевірка за першим законом Кіргофа:**

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

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

**Перевірка за другим законом Кіргофа:**

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) = 7.105 \times 10^{-15}$$

$$I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2}) = -3.553 \times 10^{-15} + 7.105i \times 10^{-15}$$

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

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot I_1$$

$$S_1 = 311.29 + 231.947i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 311.29$$

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

$$Q = 231.947$$

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

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_b = -27.438 - 4.007i \quad F(\phi_b) = (27.729 \quad -171.69)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_1 \cdot R_1 \quad \phi_c = -23.831 - 28.701i \quad F(\phi_c) = (37.305 \quad -129.703)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_d = -43.734 - 47.689i \quad F(\phi_d) = (64.706 \quad -132.523)$$

$$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_e = 16.682 - 111.017i \quad F(\phi_e) = (112.263 \quad -81.454)$$

$$\phi_1 := \phi_e + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_1 = 98.995 - 98.995i \quad F(\phi_1) = (140 \quad -45)$$

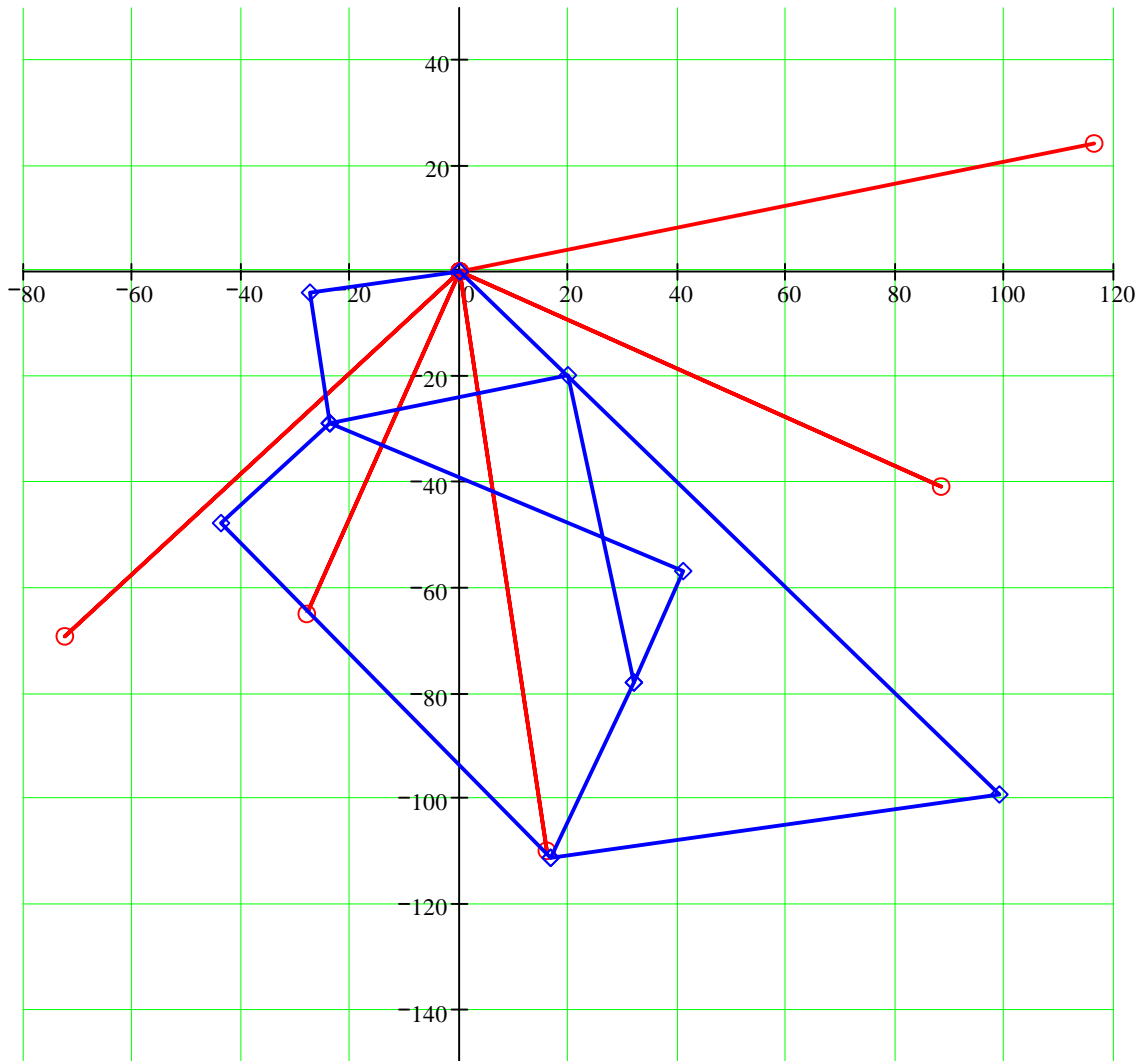
$$\phi_{1'} := \phi_1 - U \quad \phi_{1'} = -1.421 \times 10^{-14}$$

$$\phi_m := \phi_c + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_m = 41.069 - 56.773i \quad F(\phi_m) = (70.07 \quad -54.118)$$

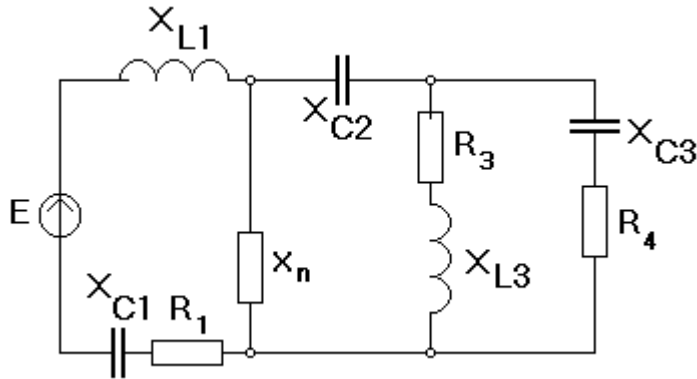
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_n = 31.946 - 77.865i \quad F(\phi_n) = (84.164 \quad -67.693)$$

$$\phi_k := \phi_c + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_k = 19.848 - 19.627i \quad F(\phi_k) = (27.913 \quad -44.681)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot i \cdot (-X_{C3}) \quad \phi_n = 31.946 - 77.865i \quad F(\phi_n) = (84.164 \quad -67.693)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} - i \cdot X_{C2} \quad Z_E = 29.274 - 23.767i$$

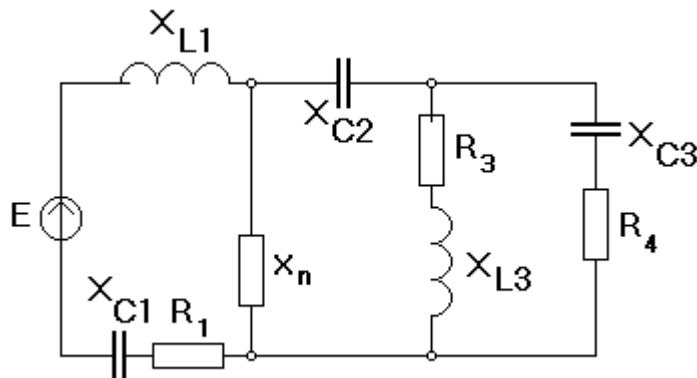
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 29.274 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = -23.767$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = 0.017 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = 59.823$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$Z_1 := -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i + R_1 \quad Z_1 = 9 + 20i$$

$$Z_3 := -X_{C2} \cdot i \quad Z_3 = -15i$$

$$Z_4 := R_3 + X_{L3} \cdot i \quad Z_4 = 13 + 40i$$

$$Z_5 := R_4 - X_{C3} \cdot i \quad Z_5 = 15 - 20i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 \quad Z_{345} = 29.274 - 23.767i$$

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

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

$$X_{VX}(X_N) := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \quad \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -5 \cdot \frac{(-111565 \cdot X_N + 892 \cdot X_N^2 - 6733700)}{(1683425 - 56280 \cdot X_N + 1184 \cdot X_N^2)}$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

$$X_N := X_{VX}(X_N) \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, 50} \end{array} \right. \rightarrow \left( \begin{array}{l} 169.58687510322688497574752144671429662793312326549 \\ -44.514005148069934303101781536400395282641643444866 \end{array} \right)$$

$$\text{Отже резонанс кола можливий при таких опорах у другій вітці: } X_N = \left( \begin{array}{l} 169.587 \\ -44.514 \end{array} \right)$$

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = 169.587$$

$$Z_{VX}(X_n) = 47.06$$

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

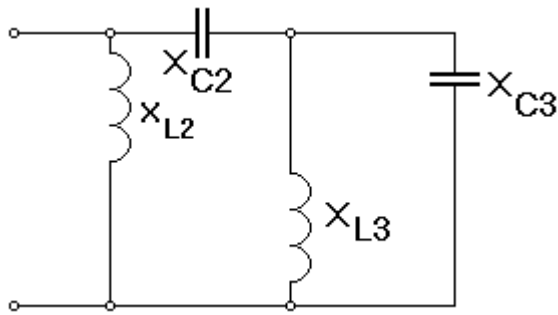
$$I_1 = 2.104 - 2.104i$$

$$F(I_1) = (2.975 \quad -45)$$

$$\begin{array}{lll}
I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 = -0.72 - 0.224i & F(I_2) = (0.754 \quad -162.721) \\
I_3 := I_1 - I_2 & I_3 = 2.824 - 1.88i & F(I_3) = (3.392 \quad -33.649) \\
I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 = -1.318 - 2.083i & F(I_4) = (2.465 \quad -122.316) \\
I_5 := I_3 - I_4 & I_5 = 4.141 + 0.203i & F(I_5) = (4.146 \quad 2.81) \\
S_1 := U \cdot \overline{I_1} & S_1 = 416.49 & \\
P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 & P = 416.49 & \\
Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) & & \\
& & Q = 1.705 \times 10^{-13}
\end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
\text{При } X_n := X_{N_1} & X_n = -44.514 & Z_{VX}(X_n) = 19.51 \\
I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} & I_1 = 5.074 - 5.074i & F(I_1) = (7.176 \quad -45) \\
I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 = 3.478 - 1.082i & F(I_2) = (3.642 \quad -17.279) \\
I_3 := I_1 - I_2 & I_3 = 1.596 - 3.992i & F(I_3) = (4.3 \quad -68.206) \\
I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 = -2.873 - 1.227i & F(I_4) = (3.124 \quad -156.874) \\
I_5 := I_3 - I_4 & I_5 = 4.469 - 2.765i & F(I_5) = (5.256 \quad -31.748) \\
S_1 := U \cdot \overline{I_1} & S_1 = 1.005 \times 10^3 & \\
P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 & P = 1.005 \times 10^3 & \\
Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) & & \\
& & Q = -1.137 \times 10^{-13}
\end{array}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{7}{20 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.111$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{2}{5 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.127$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{1500 \cdot \pi} \quad C_2 = 2.122 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{2000 \cdot \pi} \quad C_3 = 1.592 \times 10^{-4}$$

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

$$p \cdot L_2 + \frac{\frac{-1}{p \cdot C_3} \cdot p \cdot L_3}{p \cdot L_3 + \frac{-1}{p \cdot C_3}} + \frac{-1}{p \cdot C_2}$$

Знаходимо нулі:

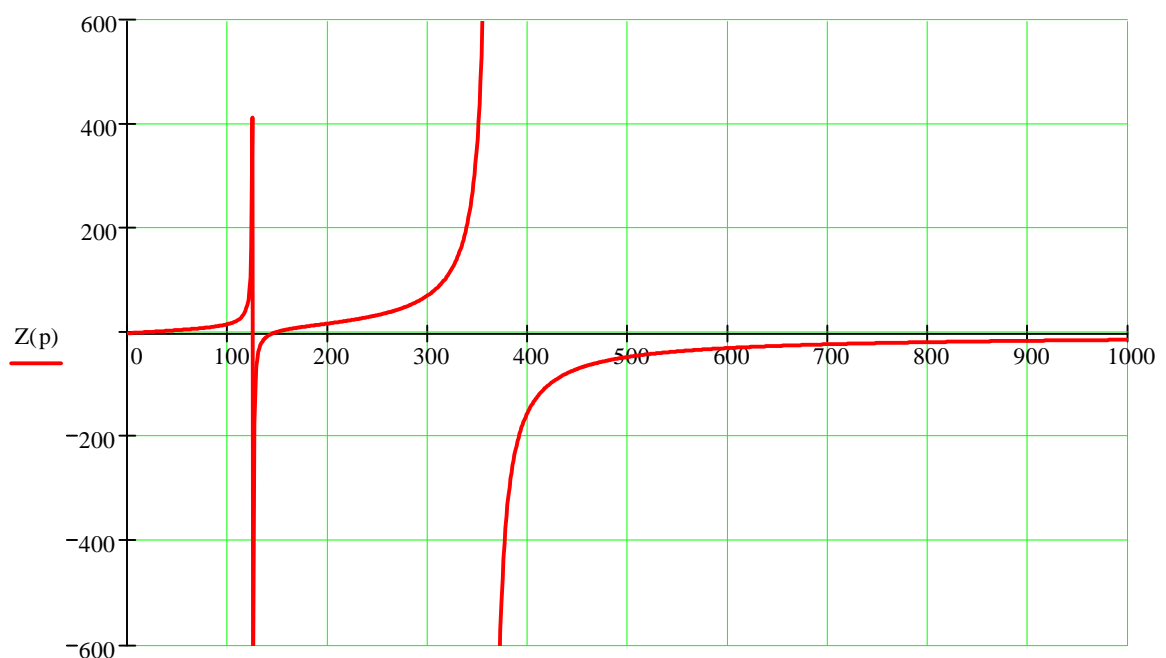
$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 145.42748120 \\ -145.42748120 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 0 \\ 145.427 \\ -145.427 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_1) \quad \omega = (0 \ 145.427 \ -145.427)$$

Знаходимо полюси:

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

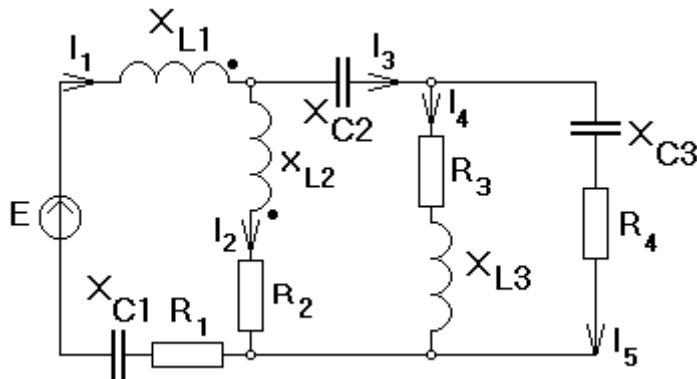
$$\omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{10} \\ \omega_{12} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 363.679 \\ 125.626 \end{pmatrix}$$





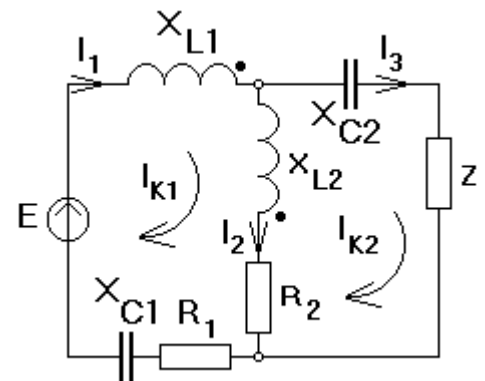
### При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

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



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

$$Z = 29.274 - 8.767i$$



$$Z_{11} := R_1 + R_2 + i \cdot (X_{L1} + 2 \cdot X_M - X_{C1} + X_{L2}) \rightarrow 20 + 95 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 11 + 55 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 40.27365 + 11.23311 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} .35256049127011001425 - 1.4670289085876276761 \cdot i \\ 1.9690982381127025606 - .46843502101582632600 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 0.353 - 1.467i$$

$$I_{K2} = 1.969 - 0.468i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 0.353 - 1.467i$$

$$F(I_1) = (1.509 \quad -76.487)$$

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

$$I_2 = -1.617 - 0.999i$$

$$F(I_2) = (1.9 \quad -148.295)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = 1.969 - 0.468i$$

$$F(I_3) = (2.024 \quad -13.382)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{R_4 - i \cdot X_{C3}}{R_4 + R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})}$$

$$I_4 = -0.307 - 1.438i$$

$$F(I_4) = (1.471 \quad -102.049)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 2.276 + 0.97i$$

$$F(I_5) = (2.474 \quad 23.077)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

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

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} + X_M)] + U - I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M)] = 7.105 \times 10^{-15}$$

$$I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M)] - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2} - i \cdot X_M) = 3.547 \times 10^{-6} + 3.092i \times 10^{-6}$$

$$I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = 0$$

$$S_{M1} := I_1 \cdot \bar{I}_2 \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M1} = -54.471 + 17.901i$$

$$F(S_{M1}) = (57.337 \quad 161.808)$$

$$S_{M2} := \bar{I}_1 \cdot I_2 \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M2} = 54.471 + 17.901i$$

$$F(S_{M2}) = (57.337 \quad 18.192)$$

# Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 180.13 + 110.327i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 180.13$$

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

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

$$Q = 110.327i$$

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

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -14.67 - 3.526i$$

$$F(\phi_b) = (15.088 \quad -166.487)$$

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

$$\phi_c = 43.352 - 11.576i$$

$$F(\phi_c) = (20.299 \quad -124.5)$$

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

$$\phi_d = -29.279 - 27.713i$$

$$F(\phi_d) = (40.315 \quad -136.574)$$

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

$$\phi_{e'} = 0.061 - 20.662i$$

$$F(\phi_{e'}) = (20.662 \quad -89.83)$$

$$\phi_e := \phi_{e'} + I_2 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$\phi_e = 35.012 - 77.241i$$

$$F(\phi_e) = (84.806 \quad -65.616)$$

$$\phi_{1''} := \phi_e + I_2 \cdot i \cdot X_M$$

$$\phi_{1''} = 54.984 - 109.572i$$

$$F(\phi_{1''}) = (122.594 \quad -63.352)$$

$$\phi_1 := \phi_{1''} + I_1 \cdot i \cdot X_{L1}$$

$$\phi_1 = 98.995 - 98.995i$$

$$F(\phi_1) = (140 \quad -45)$$

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

$$\phi_{1'} = -2.842 \times 10^{-14}$$

$$\phi_f := \phi_c + I_3 \cdot \text{Re}(Z)$$

$$\phi_f = 46.145 - 30.442i$$

$$F(\phi_f) = (55.282 \quad -33.412)$$

$$\phi_m := \phi_f + I_3 \cdot i \cdot \text{Im}(Z)$$

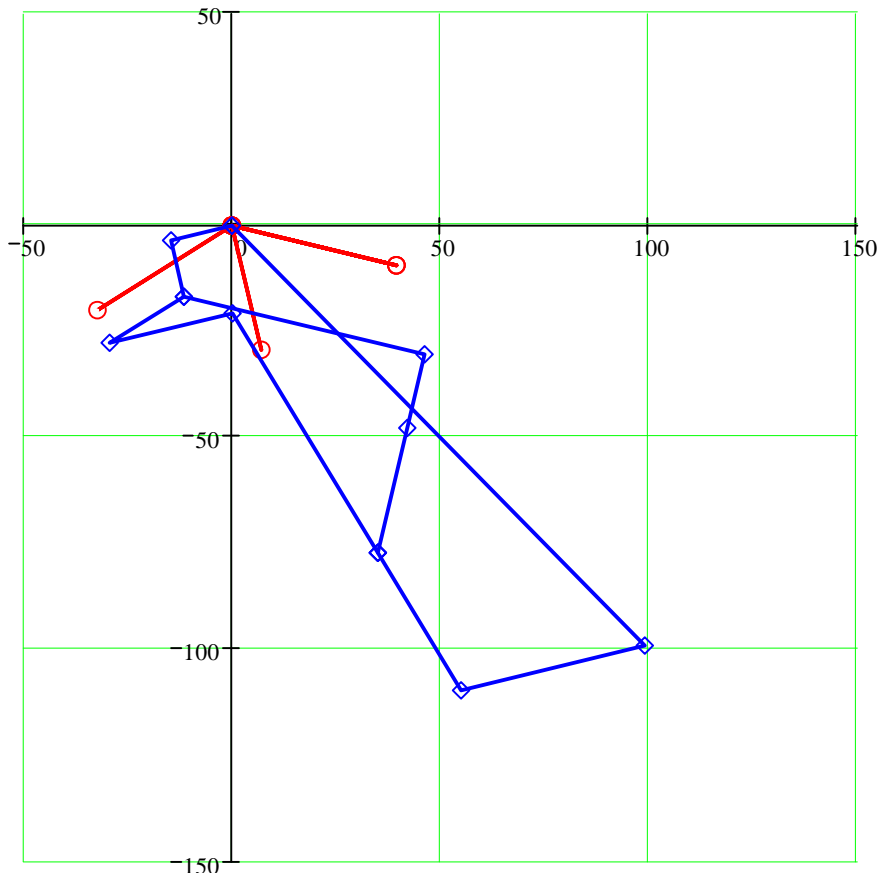
$$\phi_m = 42.039 - 47.705i$$

$$F(\phi_m) = (63.584 \quad -48.612)$$

$$\phi_e := \phi_m + I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2})$$

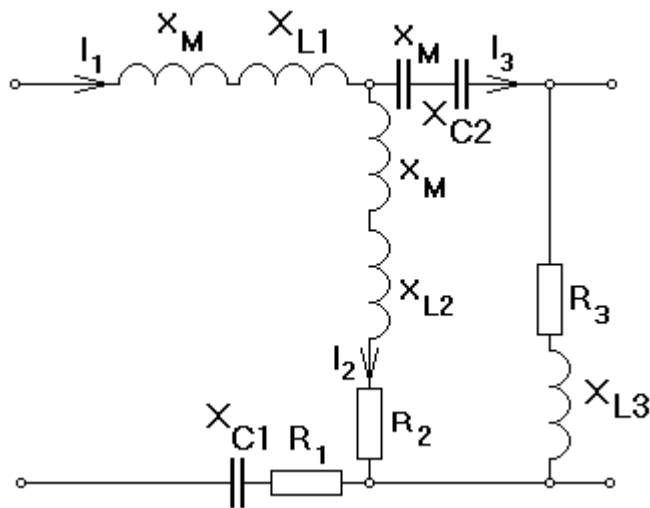
$$\phi_e = 35.012 - 77.241i$$

$$F(\phi_e) = (84.806 \quad -65.616)$$



**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":**

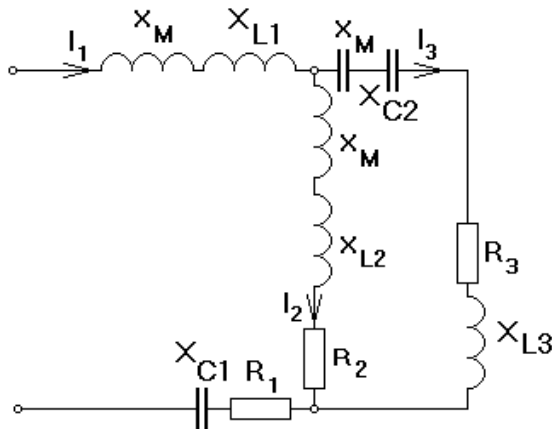
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 9 + 40 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 11 + 55 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C2} - X_M) \rightarrow 13 + 5 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 19.305 + 46.322i \quad Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \parallel Z_3 \quad Z_{20} = -307.486 + 1.956i \times 10^3$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = -1.062 - 2.58i \quad F(I_{10}) = (2.79 \quad -112.376)$$

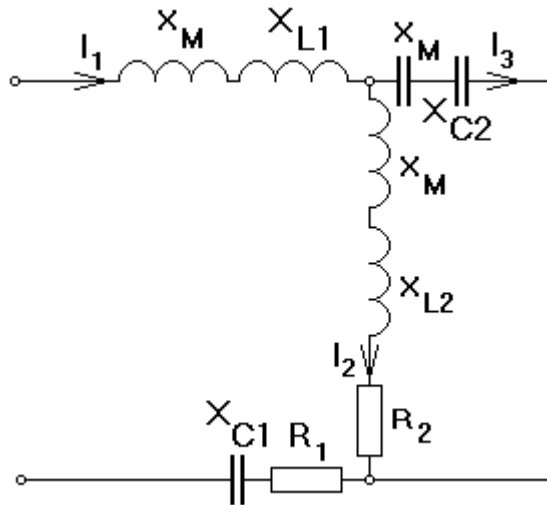
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -0.499 - 2.369i \quad F(I_{30}) = (2.421 \quad -101.885)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 88.297 - 50.75i \quad F(U_{20}) = (101.843 \quad -29.889)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 1.327 - 0.358i \quad F(A) = (1.375 \quad -15.111)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 3.581 \times 10^{-3} - 0.027i \quad F(C) = (0.027 \quad -82.487)$$

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 9 + 40 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 11 + 55 \cdot i$$

$$Z_3 := -i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow -35 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 34.864 - 42.025i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 2.553 + 0.238i$$

$$F(I_{1K}) = (2.564 \quad 5.321)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = 5.807 + 2.444i$$

$$F(I_{3K}) = (5.939 \quad 141.587)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = 8.388 - 20.577i$$

$$F(B) = (22.221 \quad -67.822)$$

$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = 0.388 - 0.122i$$

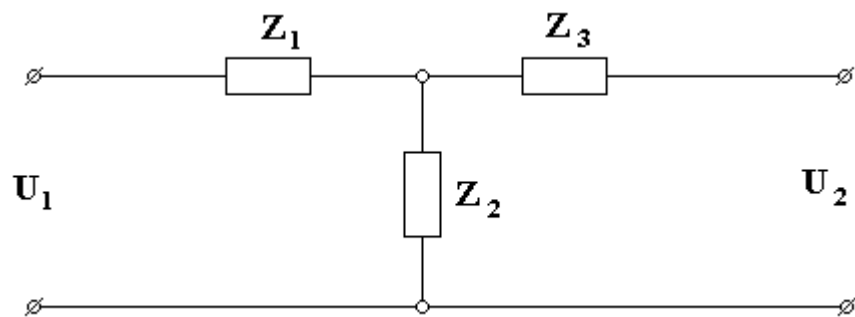
$$F(D) = (0.407 \quad -17.501)$$

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

$$F(A) = (1.375 \quad -15.111) \quad F(B) = (22.221 \quad -67.822)$$

$$F(C) = (0.027 \quad -82.487) \quad F(D) = (0.407 \quad -17.501)$$

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



$$Z_1 := \frac{A - 1}{C}$$

$$Z_1 = 14.532 + 10.129i$$

$$F(Z_1) = (17.714 \quad 34.879)$$

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

$$Z_2 = 4.773 + 36.193i$$

$$F(Z_2) = (36.506 \quad 82.487)$$

$$Z_3 := \frac{D - 1}{C}$$

$$Z_3 = 1.509 - 22.73i$$

$$F(Z_3) = (22.78 \quad -86.203)$$

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

$$R_1 = 14.532$$

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

$$R_2 = 4.773$$

$$R_3 := \operatorname{Re}(Z_3)$$

$$R_3 = 1.509$$

$$X_1 := \operatorname{Im}(Z_1)$$

$$X_2 := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_3 := -\operatorname{Im}(Z_3)$$

$$X_1 = 10.129$$

$$X_2 = 36.193$$

$$X_3 = 22.73$$

$$L_1 := \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L_2 := \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$C_3 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_3}$$

$$L_1 = 0.032$$

$$L_2 = 0.115$$

$$C_3 = 1.4 \times 10^{-4}$$