

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 424*

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.

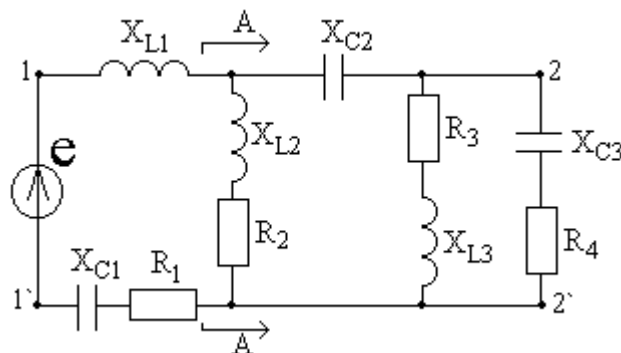
$$E := 160 \quad \psi := -60 \quad R_1 := 11 \quad R_2 := 13 \quad R_3 := 15 \quad R_4 := 17 \quad X_{L1} := 35 \quad X_{L2} := 40 \quad X_{L3} := 45$$

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

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

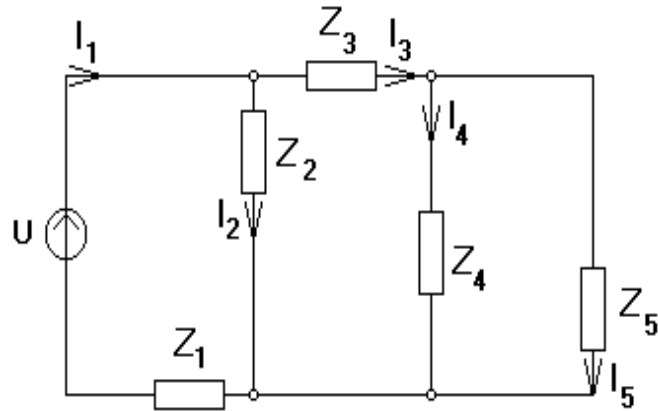
$$U = 80 - 138.564i$$

$$F(U) = (160 \quad -60)$$



**Для електричного кола без взаємної індукції:**

**Розрахувати всі струми символьним методом**



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 11 + 20 \cdot i$$

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 15 + 45 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2}) \rightarrow 13 + 40 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 17 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := -i \cdot X_{C2} \rightarrow -20 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 48.067 + 34.423i$$

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

$$I_1 = -0.264 - 2.693i$$

$$F(I_1) = (2.706 \quad -95.608)$$

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

$$I_2 = -2.13 - 1.418i$$

$$F(I_2) = (2.559 \quad -146.343)$$

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

$$I_3 = 1.866 - 1.275i$$

$$F(I_3) = (2.26 \quad -34.347)$$

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

$$I_4 = -0.963 - 1.533i$$

$$F(I_4) = (1.81 \quad -122.137)$$

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

$$I_5 = 2.829 + 0.258i$$

$$F(I_5) = (2.841 \quad 5.213)$$

**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:**

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) = -3.553 \times 10^{-15} - 1.421i \times 10^{-14}$$

$$I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2}) = -1.066 \times 10^{-14} + 7.105i \times 10^{-15}$$

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

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot I_1$$

$$S_1 = 352.044 + 252.113i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 352.044$$

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

$$Q = 252.113$$

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

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_b = -40.4 + 3.967i \quad F(\phi_b) = (40.595 \quad 174.392)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_1 \cdot R_1 \quad \phi_c = -43.309 - 25.66i \quad F(\phi_c) = (50.34 \quad -149.354)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_d = -71.002 - 44.099i \quad F(\phi_d) = (83.582 \quad -148.156)$$

$$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_e = -14.267 - 129.308i \quad F(\phi_e) = (130.092 \quad -96.296)$$

$$\phi_1 := \phi_e + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_1 = 80 - 138.564i \quad F(\phi_1) = (160 \quad -60)$$

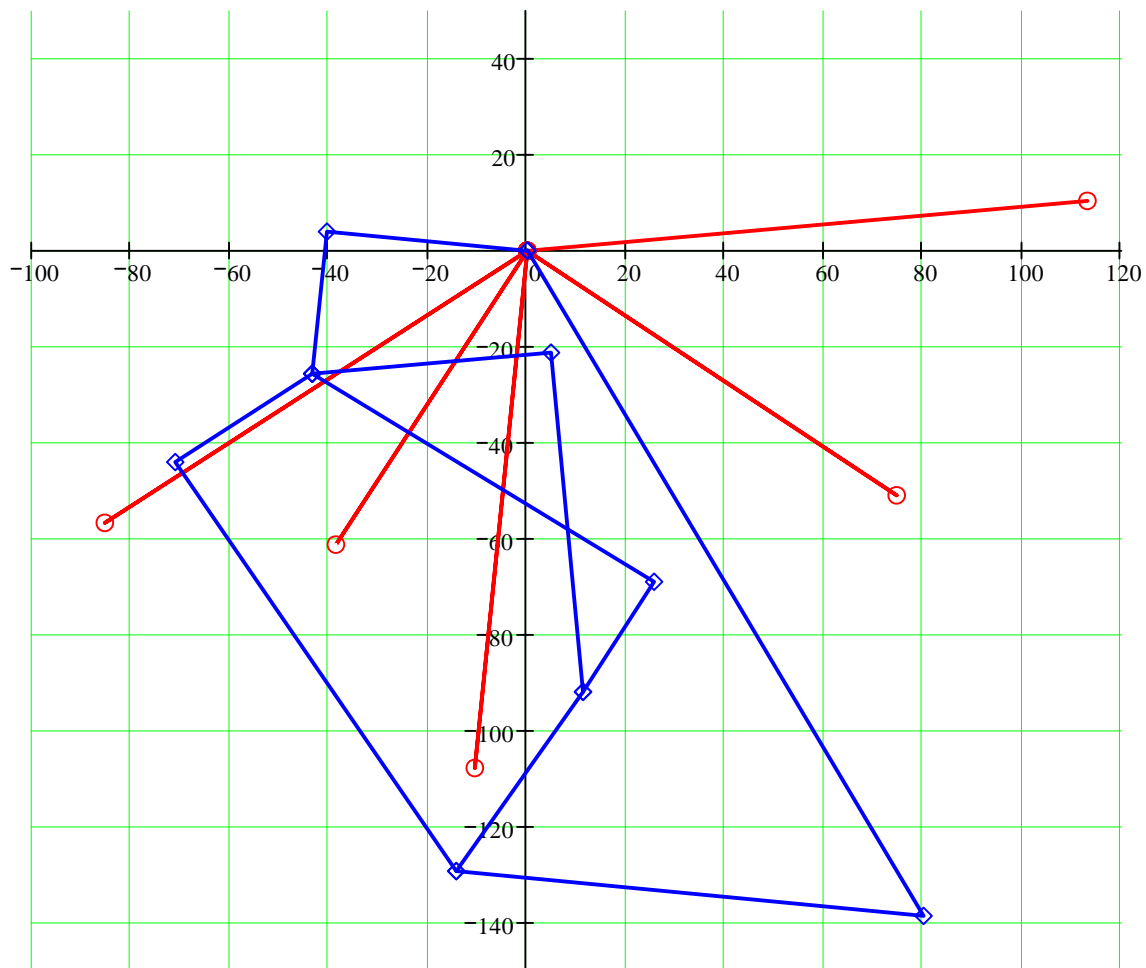
$$\phi_{1'} := \phi_1 - U \quad \phi_{1'} = -1.421 \times 10^{-14} + 2.842i \times 10^{-14}$$

$$\phi_m := \phi_c + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_m = 25.678 - 68.997i \quad F(\phi_m) = (73.62 \quad -69.587)$$

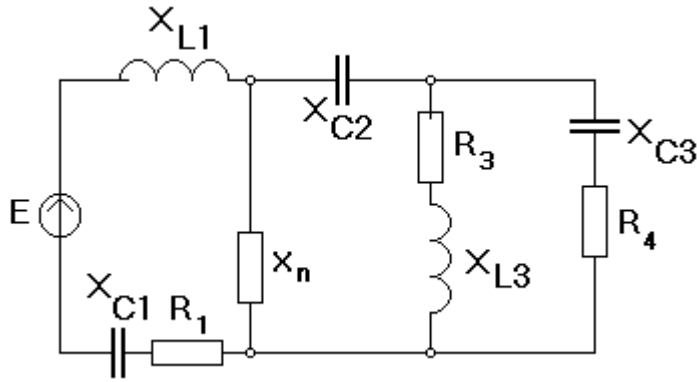
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_n = 11.232 - 91.993i \quad F(\phi_n) = (92.676 \quad -83.039)$$

$$\phi_k := \phi_c + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_k = 4.78 - 21.273i \quad F(\phi_k) = (21.803 \quad -77.335)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot i \cdot (-X_{C3}) \quad \phi_n = 11.232 - 91.993i \quad F(\phi_n) = (92.676 \quad -83.039)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} - i \cdot X_{C2} \quad Z_E = 36.489 - 30.618i$$

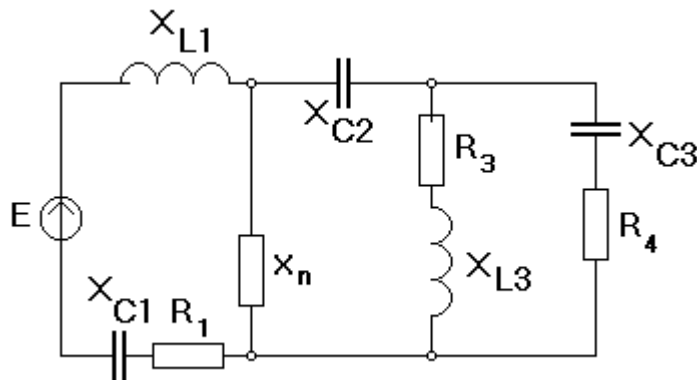
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 36.489 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = -30.618$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = 0.013 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = 74.103$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$Z_1 := -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i + R_1 \quad Z_1 = 11 + 20i$$

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

$$Z_4 := R_3 + X_{L3} \cdot i \quad Z_4 = 15 + 45i$$

$$Z_5 := R_4 - X_{C3} \cdot i \quad Z_5 = 17 - 25i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 \quad Z_{345} = 36.489 - 30.618i$$

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

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

$$X_{VX}(X_N) := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \quad \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -5 \cdot \frac{(-74345 \cdot X_N + 756 \cdot X_N^2 - 3230900)}{(807725 - 21800 \cdot X_N + 356 \cdot X_N^2)}$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

$$X_N := X_{VX}(X_N) \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, 50} \end{array} \right. \rightarrow \left( \begin{array}{l} 130.97072871930336581676909575181137894321569522450 \\ -32.630781629356275869679148661864288996125748134550 \end{array} \right)$$

Отже резонанс кола можливий при таких опорах у другій вітці:  $X_N = \begin{pmatrix} 130.971 \\ -32.631 \end{pmatrix}$

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = 130.971$$

$$Z_{VX}(X_n) = 65.894$$

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

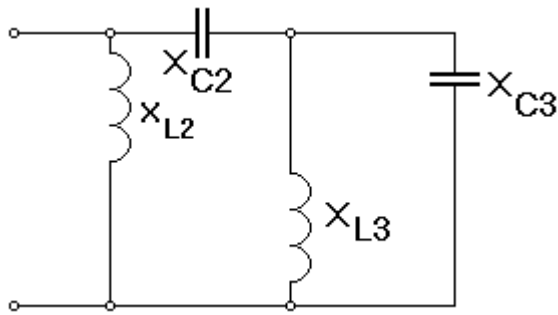
$$I_1 = 1.214 - 2.103i$$

$$F(I_1) = (2.428 \quad -60)$$

$$\begin{array}{lll}
I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 = -1.067 - 0.188i & F(I_2) = (1.083 \quad -170.019) \\
I_3 := I_1 - I_2 & I_3 = 2.281 - 1.915i & F(I_3) = (2.978 \quad -40.018) \\
I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 = -1.463 - 1.885i & F(I_4) = (2.386 \quad -127.808) \\
I_5 := I_3 - I_4 & I_5 = 3.744 - 0.03i & F(I_5) = (3.744 \quad -0.459) \\
S_1 := U \cdot \overline{I_1} & S_1 = 388.504 & \\
P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 & P = 388.504 & \\
Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) & & \\
& & Q = 5.684 \times 10^{-14}
\end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
\text{При } X_n := X_{N_1} \quad X_n = -32.631 \quad Z_{VX}(X_n) = 18.287 & & \\
I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} & I_1 = 4.375 - 7.577i & F(I_1) = (8.749 \quad -60) \\
I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 = 4.373 - 3.667i & F(I_2) = (5.708 \quad -39.981) \\
I_3 := I_1 - I_2 & I_3 = 1.295 \times 10^{-3} - 3.91i & F(I_3) = (3.91 \quad -89.981) \\
I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 = -3.13 - 0.122i & F(I_4) = (3.132 \quad -177.771) \\
I_5 := I_3 - I_4 & I_5 = 3.131 - 3.788i & F(I_5) = (4.915 \quad -50.421) \\
S_1 := U \cdot \overline{I_1} & S_1 = 1.4 \times 10^3 & \\
P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 & P = 1.4 \times 10^3 & \\
Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) & & \\
& & Q = 2.274 \times 10^{-13}
\end{array}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{3 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.106$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{3}{8 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.119$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{2400 \cdot \pi} \quad C_2 = 1.326 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi} \quad C_3 = 1.061 \times 10^{-4}$$

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

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

Знаходимо нулі:

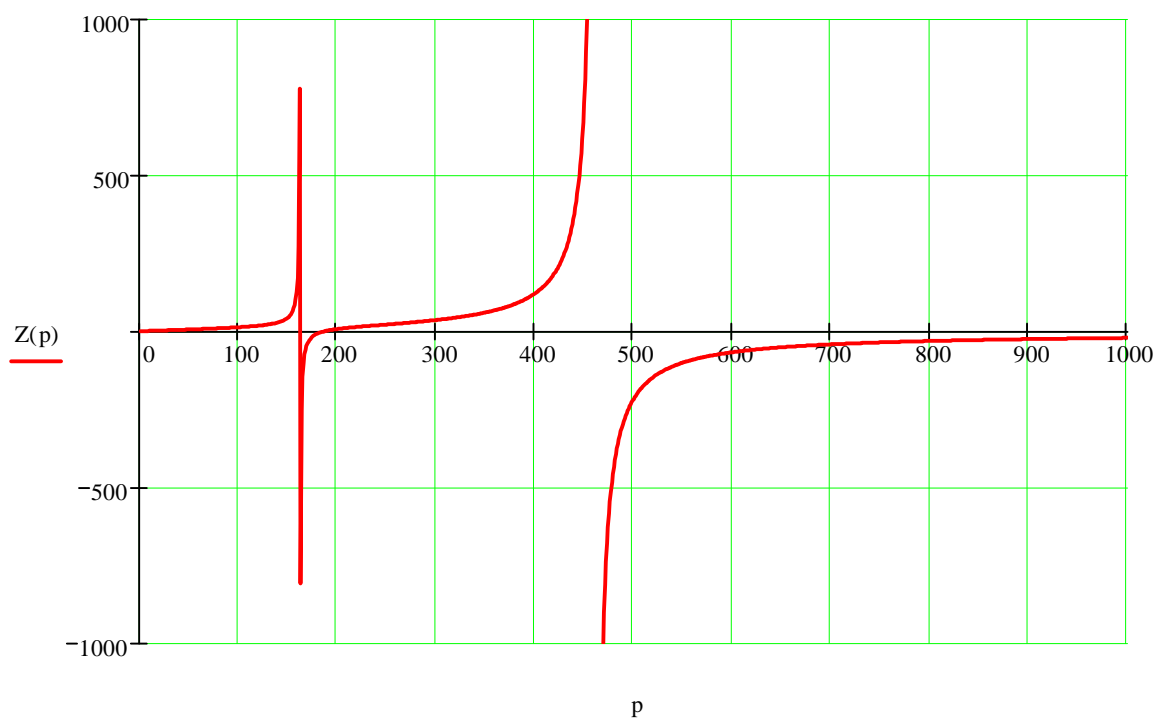
$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 187.32839283 \\ -187.32839283 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 0 \\ 187.328 \\ -187.328 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_1) \quad \omega = (0 \ 187.328)$$

Знаходимо полюси:

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

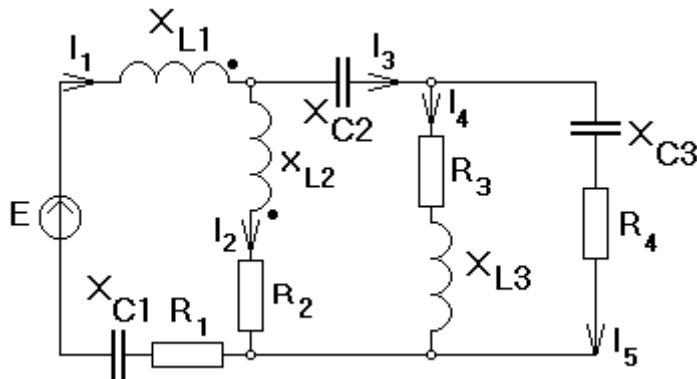
$$\omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{1_0} \\ \omega_{1_2} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 460.904 \\ 162.518 \end{pmatrix}$$





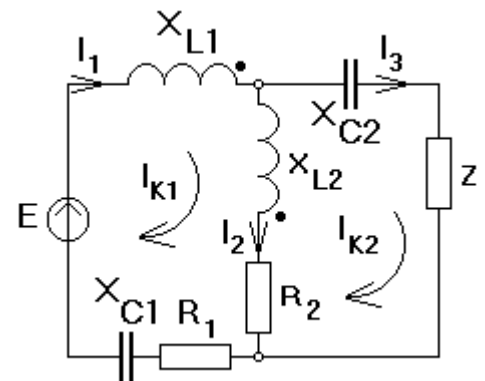
### При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

- 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;
- 3) Побудувати сімисну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг



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

$$Z = 36.489 - 10.618i$$



$$Z_{11} := R_1 + R_2 + i \cdot (X_{L1} + 2 \cdot X_M - X_{C1} + X_{L2}) \rightarrow 24 + 106 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 13 + 63 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z_{float, 7} \rightarrow 49.48876 + 9.382022 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} -7.8542507456528927291 \cdot 10^{-2} - 1.4538961584364385650 \cdot i \\ 1.6785166403565784413 - .80011517921698847467 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = -0.079 - 1.454i$$

$$I_{K2} = 1.679 - 0.8i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = -0.079 - 1.454i$$

$$F(I_1) = (1.456 \quad -93.092)$$

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

$$I_2 = -1.757 - 0.654i$$

$$F(I_2) = (1.875 \quad -159.59)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = 1.679 - 0.8i$$

$$F(I_3) = (1.859 \quad -25.486)$$

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

$$I_4 = -0.589 - 1.368i$$

$$F(I_4) = (1.49 \quad -113.276)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 2.267 + 0.568i$$

$$F(I_5) = (2.337 \quad 14.073)$$

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:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} + X_M)] + U - I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M)] = 2.132 \times 10^{-14} + 1.421i \times 10^{-14}$$

$$I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M)] - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2} - i \cdot X_M) = -7.167 \times 10^{-6} + 2.444i \times 10^{-6}$$

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

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

$$S_{M1} = -57.574 + 25.036i$$

$$F(S_{M1}) = (62.782 \quad 156.498)$$

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

$$S_{M2} = 57.574 + 25.036i$$

$$F(S_{M2}) = (62.782 \quad 23.502)$$

# Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 195.174 + 127.195i$$

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

$$P = 195.174$$

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

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

$$Q = 127.195i$$

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

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -21.808 + 1.178i$$

$$F(\phi_b) = (21.84 \quad 176.908)$$

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

$$\phi_c = -22.672 - 14.815i$$

$$F(\phi_c) = (27.083 \quad -146.838)$$

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

$$\phi_d = -45.514 - 23.314i$$

$$F(\phi_d) = (51.138 \quad -152.877)$$

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

$$\phi_{e'} = -12.075 - 25.12i$$

$$F(\phi_{e'}) = (27.872 \quad -115.672)$$

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

$$\phi_e = 14.077 - 95.403i$$

$$F(\phi_e) = (96.436 \quad -81.607)$$

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

$$\phi_{1''} = 29.114 - 135.815i$$

$$F(\phi_{1''}) = (138.9 \quad -77.901)$$

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

$$\phi_1 = 80 - 138.564i$$

$$F(\phi_1) = (160 \quad -60)$$

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

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

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

$$\phi_f = 38.575 - 44.01i$$

$$F(\phi_f) = (58.522 \quad -48.766)$$

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

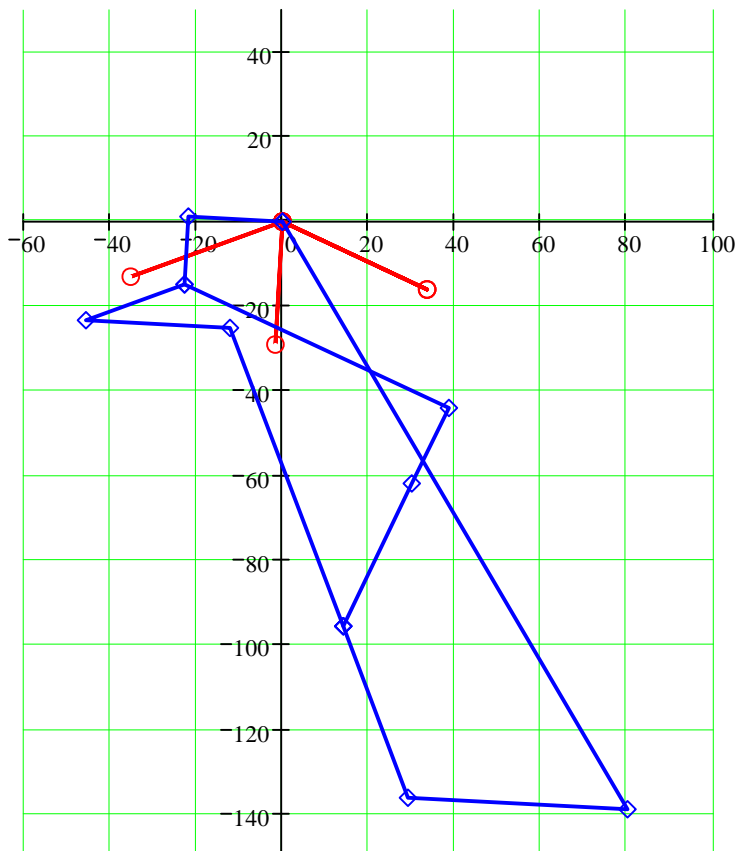
$$\phi_m = 30.079 - 61.832i$$

$$F(\phi_m) = (68.76 \quad -64.059)$$

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

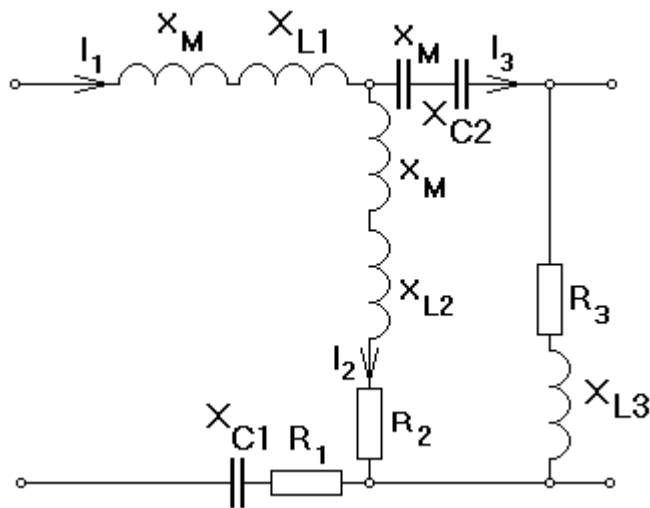
$$\phi_e = 14.077 - 95.403i$$

$$F(\phi_e) = (96.436 \quad -81.607)$$



**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":**

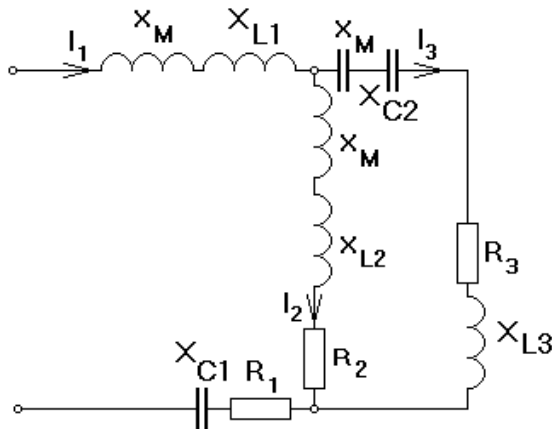
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 11 + 43 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 13 + 63 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C2} - X_M) \rightarrow 15 + 2 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 23.986 + 47.532i \quad Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot 6Z_3 \quad Z_{20} = 235.099 + 2.374i \times 10^3$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = -1.647 - 2.514i \quad F(I_{10}) = (3.005 \quad -123.223)$$

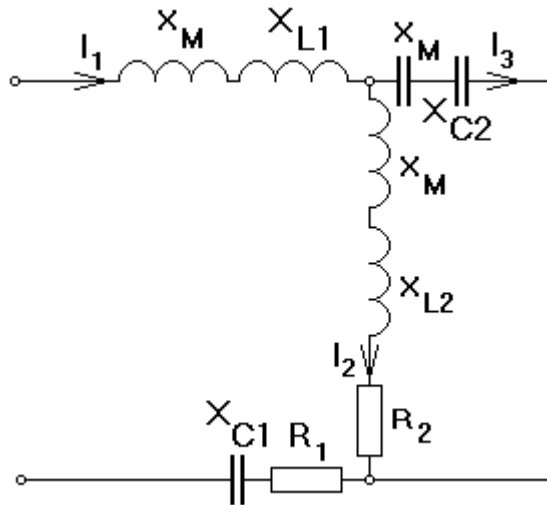
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -1.005 - 2.54i \quad F(I_{30}) = (2.731 \quad -111.578)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 99.232 - 83.303i \quad F(U_{20}) = (129.563 \quad -40.013)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 1.161 - 0.422i \quad F(A) = (1.235 \quad -19.987)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 2.742 \times 10^{-3} - 0.023i \quad F(C) = (0.023 \quad -83.211)$$

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 11 + 43 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 13 + 63 \cdot i$$

$$Z_3 := -i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow -43 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 53.244 - 64.991i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 1.879 - 0.309i \quad F(I_{1K}) = (1.904 \quad -9.326)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = 5.023 + 1.071i \quad F(I_{3K}) = (5.136 \quad 12.038)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = 9.608 - 29.637i \quad F(B) = (31.155 \quad -72.038)$$

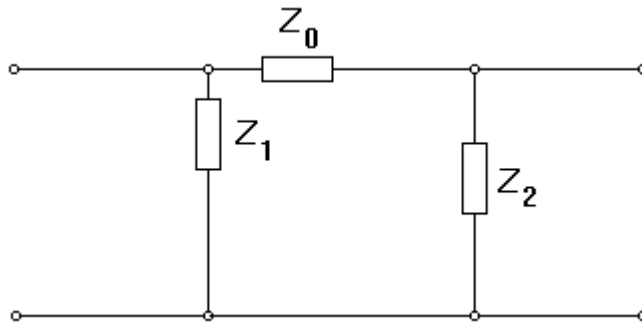
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = 0.345 - 0.135i \quad F(D) = (0.371 \quad -21.365)$$

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

$$F(A) = (1.235 \quad -19.987) \quad F(B) = (31.155 \quad -72.038)$$

$$F(C) = (0.023 \quad -83.211) \quad F(D) = (0.371 \quad -21.365)$$

Розрахувати параметри віток схеми ПІ заміщення;



$$\begin{aligned}
 Z_0 &:= B & Z_0 &= 9.608 - 29.637i & F(Z_0) &= (31.155 \quad -72.038) \\
 Y_1 &:= \frac{D-1}{B} & Y_1 &= -2.355 \times 10^{-3} - 0.021i & F(Y_1) &= (0.021 \quad -96.302) \\
 Y_2 &:= \frac{A-1}{B} & Y_2 &= 0.014 + 7.237i \times 10^{-4} & F(Y_2) &= (0.014 \quad 2.862) \\
 R_0 &:= \operatorname{Re}(Z_0) & R_0 &= 9.608 & X_{C0} &:= -\operatorname{Im}(Z_0) & X_{C0} &= 29.637 \\
 Z_1 &:= \frac{1}{Y_1} & Z_1 &= -5.116 + 46.326i & R_1 &:= \operatorname{Re}(Z_1) & R_1 &= -5.116 & X_{L1} &:= \operatorname{Im}(Z_1) & X_{L1} &= 46.326 \\
 Z_2 &:= \frac{1}{Y_2} & Z_2 &= 68.9 - 3.444i & R_2 &:= \operatorname{Re}(Z_2) & R_2 &= 68.9 & X_{C2} &:= -\operatorname{Im}(Z_2) & X_{C2} &= 3.444 \\
 L_1 &:= \frac{X_{L1}}{\omega} & L_1 &= 0.123 & C_2 &:= \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} & C_2 &= 7.702 \times 10^{-4} \\
 C_0 &:= \frac{1}{\omega \cdot X_{C0}} & C_0 &= 8.95 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$