Міністерство освіти України Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Кафедра ТОЕ

Розрахунково-графічна робота

"Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму" Варіант № 414

Виконав:	 	
Перевірив:		

Умова завдання

В елктричному 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. Прийнявши активний опір R2 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 закоротити.

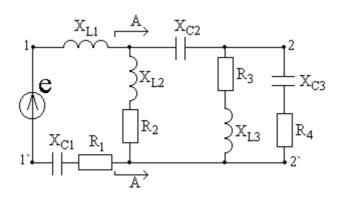
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ"ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 ТА L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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).

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" :

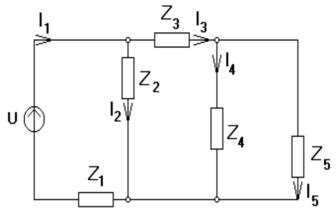
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти А, В, С, D чотириполюсника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{split} E &:= 160 \quad \psi := -60 \quad R_1 := 11 \quad R_2 := 13 \quad R_3 := 15 \quad R_4 := 17 \quad X_{L1} := 30 \quad X_{L2} := 35 \quad X_{L3} := 40 \\ X_{C1} &:= 10 \quad X_{C2} := 15 \quad X_{C3} := 20 \quad X_{M} := 20 \quad f := 50 \\ U &:= E \cdot e \quad U = 80 - 138.564i \quad F(U) = (160 \quad -60) \end{split}$$



<u>Для електричного кола бе</u>з взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символічним методом



$$\begin{split} Z_1 &\coloneqq R_1 + i \cdot \left(X_{L1} - X_{C1} \right) \to 11 + 20 \cdot i & Z_4 &\coloneqq R_3 + i \cdot X_{L3} \to 15 + 40 \cdot i \\ Z_2 &\coloneqq R_2 + i \cdot \left(X_{L2} \right) \to 13 + 35 \cdot i & Z_5 &\coloneqq R_4 - i \cdot X_{C3} \to 17 - 20 \cdot i \\ Z_3 &\coloneqq -i \cdot X_{C2} \to -15 \cdot i & \\ Z_E &\coloneqq \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3} \\ I_1 &\coloneqq \frac{U}{Z_F} & I_1 = -0.273 - 3.247i & F(I_1) = (3.258 - 94.812) \end{split}$$

$$I_{2} := \frac{I_{1} \cdot \left(\frac{Z_{5} \cdot Z_{4}}{Z_{5} + Z_{4}} + Z_{3}\right)}{Z_{2} + \frac{Z_{5} \cdot Z_{4}}{Z_{5} + Z_{4}} + Z_{3}} \qquad I_{2} = -2.276 - 1.362i \qquad F(I_{2}) = (2.653 - 149.113)$$

$$I_{1} \cdot Z_{2} \qquad I_{1} \cdot Z_{2} \qquad I_{2} \cdot Z_{3} = -2.276 - 1.362i \qquad F(I_{2}) = (2.653 - 149.113)$$

$$I_{3} := \frac{I_{1} \cdot Z_{2}}{\left(Z_{2} + \frac{Z_{5} \cdot Z_{4}}{Z_{5} + Z_{4}} + Z_{3}\right)} \qquad I_{3} = 2.003 - 1.885i \qquad F(I_{3}) = (2.751 - 43.263)$$

$$I_{4} := I_{3} \cdot \frac{Z_{5}}{Z_{5} + Z_{4}} \qquad I_{4} = -1.095 - 1.569i \qquad F(I_{4}) = (1.913 - 124.904)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4}$$
 $I_4 = -1.095 - 1.569i$ $F(I_4) = (1.913 - 124.904)$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5}$$
 $I_5 = 3.098 - 0.316i$ $F(I_5) = (3.114 - 5.825)$

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 другім законом Кіргофа:

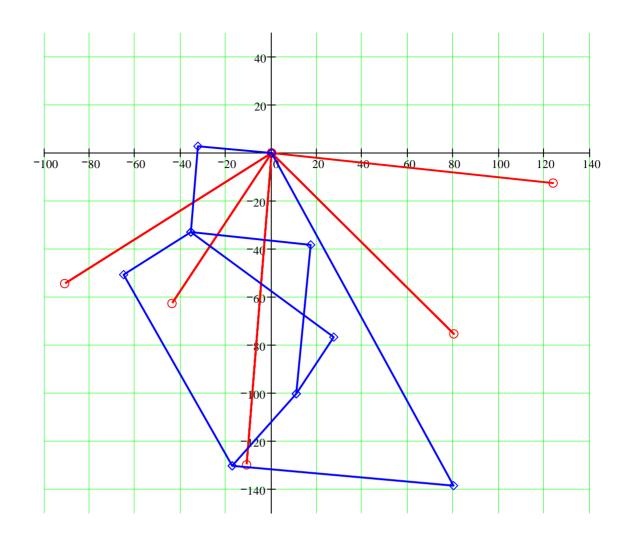
$$\begin{split} -I_{1} \cdot \left[R_{1} + i \cdot \left(X_{L1} - X_{C1} \right) \right] + U - I_{2} \cdot \left(R_{2} + i \cdot X_{L2} \right) &= 1.066 \times 10^{-14} + 1.421i \times 10^{-14} \\ I_{2} \cdot \left(R_{2} + i \cdot X_{L2} \right) - I_{4} \cdot \left(R_{3} + i \cdot X_{L3} \right) - I_{3} \cdot \left(-i \cdot X_{C2} \right) &= 3.553 \times 10^{-15} - 7.105i \times 10^{-15} \\ I_{4} \cdot \left(R_{3} + i \cdot X_{L3} \right) - I_{5} \cdot \left(R_{4} - i \cdot X_{C3} \right) &= -7.105 \times 10^{-15} \end{split}$$

Перевірка за балансом потужностей

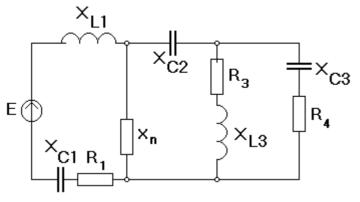
$$\begin{split} \mathbf{S}_{1} &:= \mathbf{U} \cdot \overline{\mathbf{I}_{1}} \\ \mathbf{S}_{1} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{1}} \\ \mathbf{S}_{1} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{1}} \\ \mathbf{S}_{1} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{2} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{1} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{2} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{1} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{2} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{3} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{4} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{3} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{4} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{2}} \\ \mathbf{S}_{5} &:= \mathbf{I}_{2} \cdot \overline{\mathbf{I}_{$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:



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



$$Z_E := \frac{\left(R_3 + i \cdot X_{L3}\right) \cdot \left(R_4 - i \cdot X_{C3}\right)}{R_3 + R_4 + i \cdot \left(X_{L3} - X_{C3}\right)} - i \cdot X_{C2} \qquad Z_E = 29.045 - 21.278i$$

$$Z_E = R_E + j \cdot X_E$$

$$R_{\rm F} := \text{Re}(Z_{\rm F})$$
 $R_{\rm F} = 29.045$

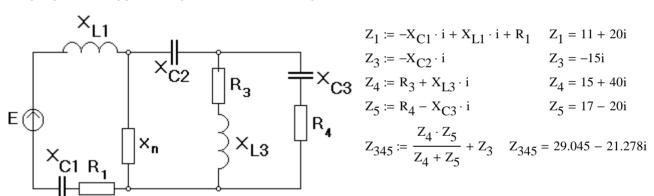
$$R_E := Re(Z_E)$$
 $R_E = 29.045$ $X_E := Im(Z_E)$ $X_E = -21.278$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2}$$
 $B_n = 0.016$ Реактивний опір вітки: $X_n := \frac{1}{B_n}$ $X_n = 60.925$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



Вхідний опір кола:
$$Z_{VX}\!\!\left(X_N\right) \coloneqq \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1$$

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

$$X_{VX}\!\!\left(X_{N}\!\right) \coloneqq \text{Im}\!\!\left(Z_{VX}\!\!\left(X_{N}\!\right)\right) \ \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \to -5 \cdot \frac{\left(-126805 \cdot X_{N} + 364 \cdot {X_{N}}^{2} - 7384100\right)}{\left(1846025 - 60600 \cdot X_{N} + 1424 \cdot {X_{N}}^{2}\right)} \right)$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

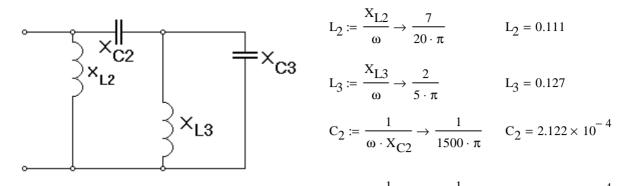
$$\mathbf{X_{N}} \coloneqq \mathbf{X_{VX}}\!\!\left(\mathbf{X_{N}}\right) \mid \begin{matrix} \text{solve}, \mathbf{X_{N}} \\ \text{float}, 50 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 399.18402410496239666596552708926868691598115671046 \\ -50.81863948957778128135014247388407153136577209508 \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола можливий при таких опорах у другій вітці: $X_N = \begin{pmatrix} 399.184 \\ -50.819 \end{pmatrix}$

$$X_n := X_{N_0}$$
 $X_n = 399.184$ $Z_{VX}(X_n) = 43.217$ $I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)}$ $I_1 = 1.851 - 3.206i$ $F(I_1) = (3.702 - 60)$

$$\begin{split} I_2 &:= I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 = -0.352 + 0.011i & F(I_2) = (0.352 - 178.169) \\ I_3 &:= I_1 - I_2 & I_3 = 2.203 - 3.217i & F(I_3) = (3.899 - 55.605) \\ I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 = -1.992 - 1.841i & F(I_4) = (2.712 - 137.246) \\ I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 = 4.194 - 1.376i & F(I_5) = (4.414 - 18.166) \\ S_1 &:= U \cdot \overline{I_1} & S_1 = 592.353 \\ P &:= \left(\left| I_1 \right| \right)^2 \cdot R_1 + \left(\left| I_4 \right| \right)^2 \cdot R_3 + \left(\left| I_5 \right| \right)^2 \cdot R_4 & P = 592.353 \\ Q &:= \left(\left| I_1 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L1} - X_{C1} \right) + \left(\left| I_2 \right| \right)^2 \cdot X_n + \left(\left| I_3 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C2} \right) + \left(\left| I_4 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L3} \right) + \left(\left| I_5 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C3} \right) \\ Q &= -1.705 \times 10^{-13} \\ I_1 &:= \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} & I_1 = 3.417 - 5.918i & F(I_1) = (6.833 - 60) \\ I_2 &:= I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 = 2.79 - 1.494i & F(I_2) = (3.165 - 28.169) \\ I_3 &:= I_1 - I_2 & I_3 = 0.626 - 4.423i & F(I_3) = (4.467 - 81.943) \\ I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 = -2.981 - 0.878i & F(I_4) = (3.108 - 163.583) \\ I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 = 3.607 - 3.545i & F(I_4) = (5.058 - 44.504) \\ S_1 &:= U \cdot \overline{I_1} & S_1 = 1.093 \times 10^3 \\ P &:= \left(\left| I_1 \right| \right)^2 \cdot R_3 + \left(\left| I_4 \right| \right)^2 \cdot R_3 + \left(\left| I_5 \right| \right)^2 \cdot R_4 & P = 1.093 \times 10^3 \\ Q &:= \left(\left| I_1 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L1} - X_{C1} \right) + \left(\left| I_2 \right| \right)^2 \cdot X_n + \left(\left| I_3 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C2} \right) + \left(\left| I_4 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L3} \right) + \left(\left| I_5 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C3} \right) \\ Q &:= -3.979 \times 10^{-13} \\ Q &:= \left(\left| I_1 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L1} - X_{C1} \right) + \left(\left| I_2 \right| \right)^2 \cdot X_n + \left(\left| I_3 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C2} \right) + \left(\left| I_4 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L3} \right) + \left(\left| I_5 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C3} \right) \\ Q &:= -3.979 \times 10^{-13} \\ Q &:= \left(\left| I_1 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L1} - X_{C1} \right) + \left(\left| I_2 \right| \right)^2 \cdot X_n + \left(\left| I_3 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C2} \right) + \left(\left| I_4 \right| \right)^2 \cdot \left(X_{L3} \right) + \left(\left| I_5 \right| \right)^2 \cdot \left(-X_{C3} \right) \\ Q &:= -3.979 \times 10^{-13} \\ Q &:= -3.979 \times 10$$

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



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

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

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

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

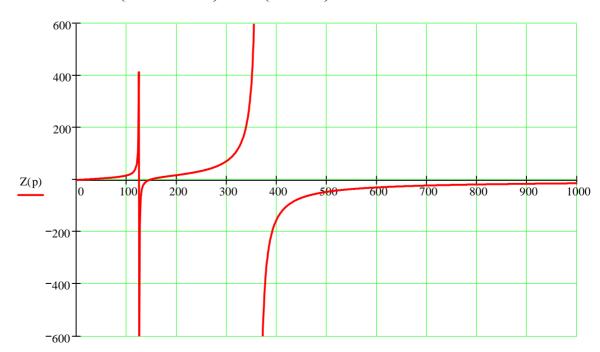
$$Z(p) := \frac{\left(\frac{-1}{p \cdot C_3} \cdot p \cdot L_3}{p \cdot L_3 + \frac{-1}{p \cdot C_3} + \frac{-1}{p \cdot C_2}}\right) \cdot p \cdot L_2}{p \cdot L_2 + \frac{\frac{-1}{p \cdot C_3} \cdot p \cdot L_3}{p \cdot L_3 + \frac{-1}{p \cdot C_3}} + \frac{-1}{p \cdot C_2}}$$

Знаходимо нулі:
$$\omega := Z(p) \quad \begin{vmatrix} solve, p \\ float, 11 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 145.42748120 \\ -145.42748120 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 0 \\ 145.427 \\ -145.427 \end{pmatrix}$$

$$\omega := \begin{pmatrix} \omega_0 & \omega_1 \end{pmatrix} \qquad \omega = \begin{pmatrix} 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\ 0 & 145.427 \\$$

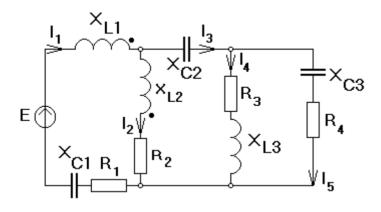
Знаходимо полюси:

$$\omega_1 \coloneqq \frac{1}{Z(p)} \mid \begin{array}{c} \text{solve}, p \\ \text{float}, 11 \end{array} \rightarrow \begin{pmatrix} 363.67878290 \\ -363.67878290 \\ 125.62566970 \\ -125.62566970 \\ \end{pmatrix} \\ \omega_1 = \begin{pmatrix} 363.679 \\ -363.679 \\ 125.626 \\ -125.626 \\ \end{pmatrix} \\ \omega_1 \coloneqq \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_1 \\ 2 \end{pmatrix} \\ \omega_1 = \begin{pmatrix} 363.679 \\ 0 \\ 125.626 \\ \end{pmatrix}$$



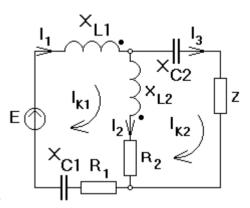
При наявності магнітного зв "язку між індуктивними елементами

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



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

$$Z = 29.045 - 6.278i$$



$$\mathbf{Z}_{11} \coloneqq \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 + \mathbf{i} \cdot \left(\mathbf{X}_{L1} + 2 \cdot \mathbf{X}_{M} - \mathbf{X}_{C1} + \mathbf{X}_{L2} \right) \to 24 + 95 \cdot \mathbf{i}$$

$$Z_{12} \coloneqq R_2 + i \cdot \left(X_{L2} + X_M \right) \rightarrow 13 + 55 \cdot i$$

$$\mathbf{Z}_{22} \coloneqq \mathbf{R}_2 + \mathbf{i} \cdot \left(\mathbf{X}_{L2} - \mathbf{X}_{C2}\right) + \mathbf{Z} \text{ float}, 7 \ \rightarrow 42.04494 + 13.72191 \cdot \mathbf{i}$$

Giver

$$\begin{split} I_{K1} \cdot Z_{11} - I_{K2} \cdot Z_{12} &= U & -I_{K1} \cdot Z_{12} + I_{K2} \cdot Z_{22} &= 0 \\ \begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} &\coloneqq \operatorname{Find} \begin{pmatrix} I_{K1}, I_{K2} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -1.3071937056647087713 \cdot 10^{-2} - 1.8310932581756063024 \cdot i \\ 1.9890423640812393961 - 1.2324105873503082996 \cdot i \end{pmatrix} \\ I_{K1} &= -0.013 - 1.831i & I_{K2} &= 1.989 - 1.232i \\ I_{1} &\coloneqq I_{K1} & I_{1} &= -0.013 - 1.831i & F(I_{1}) &= (1.831 - 90.409) \\ I_{2} &\coloneqq I_{K1} - I_{K2} & I_{2} &= -2.002 - 0.599i & F(I_{2}) &= (2.09 - 163.352) \\ I_{1} &\coloneqq I_{1} &= I_{1} &= I_{1} &= I_{2} &= I_{1} &= I_{2} &= I_{1} &= I_{2} &= I_{2}$$

$$I_3 := I_{K2}$$
 $I_3 = 1.989 - 1.232i$ $F(I_3) = (2.34 -31.782)$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{R_4 - i \cdot X_{C3}}{R_4 + R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} \quad I_4 = -0.647 - 1.493i \qquad F(I_4) = (1.628 - 113.423)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$
 $I_5 = 2.636 + 0.261i$ $F(I_5) = (2.649 - 5.656)$

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 другім законом Кіргофа:

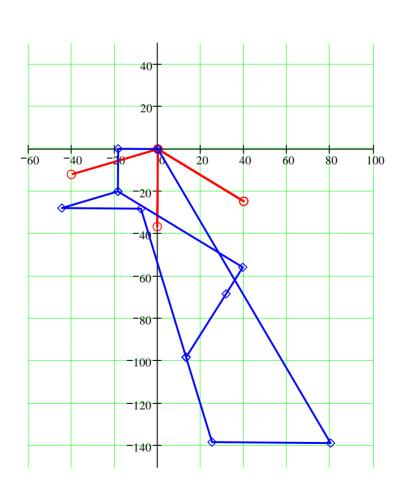
$$\begin{split} -I_{1} \cdot \left[R_{1} + i \cdot \left(X_{L1} - X_{C1} + X_{M} \right) \right] + U - I_{2} \cdot \left[R_{2} + i \cdot \left(X_{L2} + X_{M} \right) \right] &= 1.776 \times 10^{-14} \\ I_{2} \cdot \left[R_{2} + i \cdot \left(X_{L2} + X_{M} \right) \right] - I_{4} \cdot \left(R_{3} + i \cdot X_{L3} \right) - I_{3} \cdot \left(-i \cdot X_{C2} - i \cdot X_{M} \right) &= -7.737 \times 10^{-6} + 4.485i \times 10^{-6} \\ I_{4} \cdot \left(R_{3} + i \cdot X_{L3} \right) - I_{5} \cdot \left(R_{4} - i \cdot X_{C3} \right) &= 1.421i \times 10^{-14} \\ S_{M1} \coloneqq I_{1} \cdot \overline{I_{2}} \cdot i \cdot X_{M} & S_{M1} &= -73.165 + 22.448i & F(S_{M1}) &= (76.531 - 162.943) \\ S_{M2} \coloneqq \overline{I_{1}} \cdot I_{2} \cdot i \cdot X_{M} & S_{M2} &= 73.165 + 22.448i & F(S_{M2}) &= (76.531 - 17.057) \end{split}$$

$$\begin{split} \mathbf{S}_{1} &\coloneqq \mathbf{U} \cdot \overline{\mathbf{I}_{1}} & \mathbf{S}_{1} = 252.678 + 148.299\mathrm{i} \\ \mathbf{P} &\coloneqq \left(\left| \mathbf{I}_{1} \right| \right)^{2} \cdot \mathbf{R}_{1} + \left(\left| \mathbf{I}_{2} \right| \right)^{2} \cdot \mathbf{R}_{2} + \left(\left| \mathbf{I}_{4} \right| \right)^{2} \cdot \mathbf{R}_{3} + \left(\left| \mathbf{I}_{5} \right| \right)^{2} \cdot \mathbf{R}_{4} & \mathbf{P} = 252.678 \\ \mathbf{Q} &\coloneqq \left(\left| \mathbf{I}_{1} \right| \right)^{2} \cdot \mathrm{i} \cdot \left(-\mathbf{X}_{C1} + \mathbf{X}_{L1} \right) + \left(\left| \mathbf{I}_{2} \right| \right)^{2} \cdot \mathrm{i} \cdot \mathbf{X}_{L2} + \left(\left| \mathbf{I}_{3} \right| \right)^{2} \cdot \left(-\mathbf{X}_{C2} \cdot \mathrm{i} \right) + \left(\left| \mathbf{I}_{4} \right| \right)^{2} \cdot \left(\mathbf{X}_{L3} \cdot \mathrm{i} \right) + \left(\left| \mathbf{I}_{5} \right| \right)^{2} \cdot \left(-\mathbf{X}_{C3} \cdot \mathrm{i} \right) \\ \mathbf{Q} &\coloneqq \mathbf{Q} + \mathbf{S}_{\mathbf{M1}} + \mathbf{S}_{\mathbf{M2}} & \mathbf{Q} = 148.299\mathrm{i} \end{split}$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

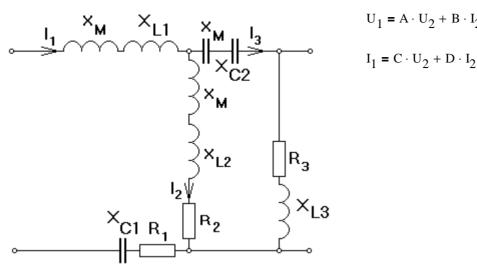
Знаходимо потенціали точок:

$$\begin{array}{llll} \phi_a \coloneqq 0 \\ \phi_b \coloneqq \phi_a + I_1 \cdot \left(-i \cdot X_{C1} \right) & \phi_b = -18.311 + 0.131i & F\left(\phi_b \right) = (18.311 \ 179.591) \\ \phi_c \coloneqq \phi_b + I_1 \cdot R_1 & \phi_c = -18.455 - 20.011i & F\left(\phi_c \right) = (27.222 \ -132.683) \\ \phi_d \coloneqq \phi_c + I_2 \cdot R_2 & \phi_d = -44.482 - 27.794i & F\left(\phi_d \right) = (52.452 \ -148.001) \\ \phi_e \coloneqq \phi_d + I_1 \cdot i \cdot X_M & \phi_{e'} = -7.86 - 28.056i & F\left(\phi_{e'} \right) = (29.136 \ -105.651) \\ \phi_e \coloneqq \phi_{e'} + I_2 \cdot i \cdot X_{L2} & \phi_e = 13.094 - 98.13i & F\left(\phi_e \right) = (98.999 \ -82.4) \\ \phi_1 \coloneqq \phi_1 = \phi_1 + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} & \phi_1 = 80 - 138.564i & F\left(\phi_1 \right) = (140.427 \ -79.717) \\ \phi_1 \coloneqq \phi_1 - U & \phi_1 = -1.421 \times 10^{-14} \\ \phi_f \coloneqq \phi_c + I_3 \cdot Re(Z) & \phi_f = 39.317 - 55.807i & F\left(\phi_f \right) = (68.266 \ -54.835) \\ \phi_m \coloneqq \phi_f + I_3 \cdot i \cdot Im(Z) & \phi_m = 31.58 - 68.294i & F\left(\phi_m \right) = (75.242 \ -65.184) \\ \phi_e \coloneqq \phi_m + I_3 \cdot \left(-i \cdot X_{C2} \right) & \phi_e = 13.094 - 98.13i & F\left(\phi_e \right) = (98.999 \ -82.4) \end{array}$$

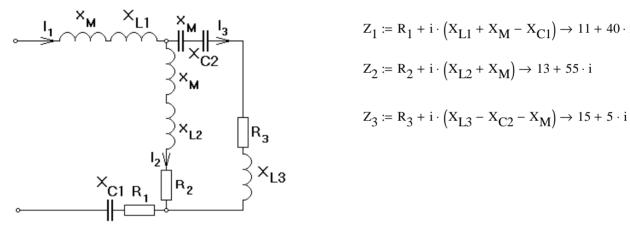


3. Відкинувши крайню вітку між полбсами 2,2", зробити розв "язку магнітного зв "язку. Одержану схему розглядати як чотириполюсник з полюсами 1,1" та 2,2":

1)Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника А,В,С,D



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



$$\mathbf{Z}_1 \coloneqq \mathbf{R}_1 + \mathbf{i} \cdot \left(\mathbf{X}_{L1} + \mathbf{X}_{M} - \mathbf{X}_{C1}\right) \rightarrow 11 + 40 \cdot \mathbf{i}$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot \left(X_{L2} + X_M\right) \rightarrow 13 + 55 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C2} - X_M) \rightarrow 15 + 5 \cdot i$$

$$Z_{10} \coloneqq \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 22.67 + 46.779i \qquad Z_{20} \coloneqq \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} 6Z_3 \qquad Z_{20} = -155.903 + 2.265i \times 10^3$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \qquad I_{10} = -1.728 - 2.547i \qquad F(I_{10}) = (3.078 - 124.145)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \qquad I_{30} = -1.002 - 2.429i \qquad F(I_{30}) = (2.627 - 112.426)$$

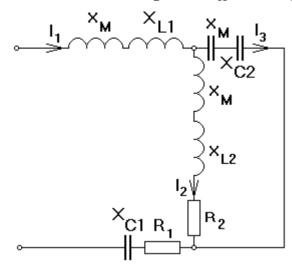
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_2}$$
 $I_{30} = -1.002 - 2.429i$ $F(I_{30}) = (2.627 - 112.426)$

$$\mathbf{U}_{20} \coloneqq \mathbf{I}_{30} \cdot \left(\mathbf{R}_3 + \mathbf{i} \cdot \mathbf{X}_{\mathbf{L}3} \right) \quad \mathbf{U}_{20} = 82.106 - 76.518 \mathbf{i} \qquad \qquad \mathbf{F} \left(\mathbf{U}_{20} \right) = (112.234 \ -42.982)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}}$$
 $A = 1.363 - 0.417i$ $F(A) = (1.426 -17.018)$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \qquad \qquad C = 4.213 \times 10^{-3} - 0.027i \qquad \qquad F(C) = (0.027 - 81.162)$$

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



$$Z_{1} := R_{1} + i \cdot (X_{L1} + X_{M} - X_{C1}) \rightarrow 11 + 40 \cdot i$$

$$Z_{2} := R_{2} + i \cdot (X_{L2} + X_{M}) \rightarrow 13 + 55 \cdot i$$

$$Z_{3} := -i \cdot (X_{C2} + X_{M}) \rightarrow -35 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1$$
 $Z_K = 38.988 - 38.058$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K}$$
 $I_{1K} = 2.827 - 0.794i$ $F(I_{1K}) = (2.937 - 15.691)$

$$\begin{split} Z_K &\coloneqq \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 & Z_K = 38.988 - 38.058i \\ I_{1K} &\coloneqq \frac{U_K}{Z_K} & I_{1K} = 2.827 - 0.794i & F(I_{1K}) = (2.937 - 15.691) \\ I_{3K} &\coloneqq I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} & I_{3K} = 6.94 + 0.489i & F(I_{3K}) = (6.958 - 4.034) \end{split}$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}}$$

$$B = 10.069 - 20.675i$$

$$F(B) = (22.996 -64.034)$$

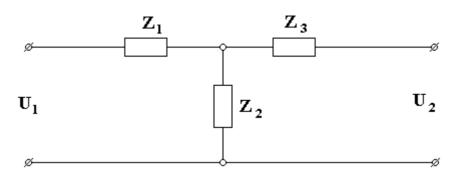
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{2K}} \qquad \qquad D = 0.397 - 0.142i \qquad \qquad F(D) = (0.422 - 19.725)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (1.426 -17.018)$$
 $F(B) = (22.996 -64.034)$

$$F(C) = (0.027 -81.162)$$
 $F(D) = (0.422 -19.725)$

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



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

$$Z_1 = 17.068 + 10.748i$$

$$F(Z_1) = (20.17 \ 32.2)$$

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

$$Z_2 = 5.602 + 36.031i$$

$$F(Z_2) = (36.464 \ 81.162)$$

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

$$Z_3 = 1.756 - 22.514i$$

$$F(Z_3) = (22.582 -85.539)$$

$$R_1 := Re(Z_1)$$

$$R_2 := Re(Z_2)$$

$$R_3 := Re(Z_3)$$

$$R_1 = 17.068$$

$$R_2 = 5.602$$

 $R_3 = 1.756$

$$R_3 := Re(Z_3)$$

$$\mathbf{X}_1 \coloneqq \mathrm{Im}\big(\mathbf{Z}_1\big) \qquad \mathbf{X}_2 \coloneqq \mathrm{Im}\big(\mathbf{Z}_2\big) \qquad \mathbf{X}_3 \coloneqq -\mathrm{Im}\big(\mathbf{Z}_3\big)$$

$$X_1 = 10.748$$

$$X_1 = 10.748$$
 $X_2 = 36.031$ $X_3 = 22.514$

$$X_3 = 22.514$$

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

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

$$L_1 := \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} \qquad \qquad L_2 := \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f} \qquad \qquad C_3 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_3}$$

$$L_1 = 0.034$$

$$L_2 = 0.115$$

$$L_2 = 0.115$$
 $C_3 = 1.414 \times 10^{-4}$