

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 105

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 закоротити.

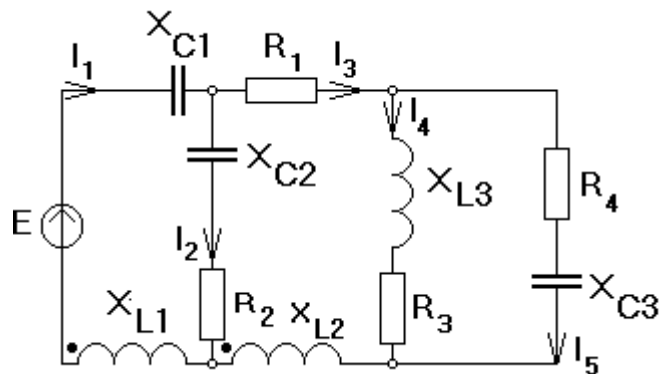
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L_1 ТА L_2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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" :

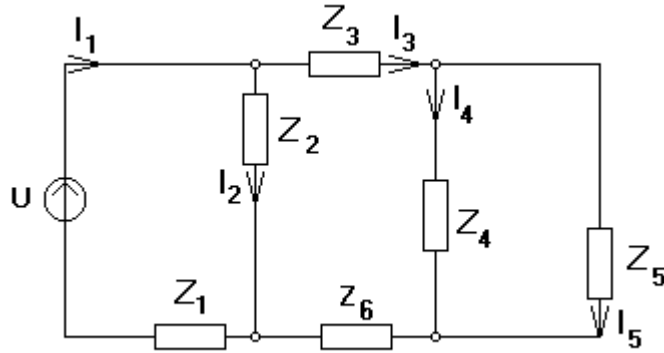
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти A, B, C, D чотиріполюсника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 100 & \psi &:= -20 & R_1 &:= 5 & R_2 &:= 7 & R_3 &:= 9 & R_4 &:= 12 \\ X_{L1} &:= 37 & X_{L2} &:= 27 & X_{L3} &:= 20 & X_{C1} &:= 13 & X_{C2} &:= 10 & X_{C3} &:= 6 \\ X_M &:= 15 & f &:= 50 & & & & & & & & \\ U &:= E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & U = 93.969 - 34.202i & F(U) = (100 \ -20) \end{aligned}$$



Для електричного кола без взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символьним методом



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 24 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 7 - 10 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 5$$

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 9 + 20 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 12 - 6 \cdot i$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L2} \rightarrow 27 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 11.224 + 16.688i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 1.197 - 4.826i \quad F(I_1) = (4.972 \quad -76.076)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} \quad I_2 = 3.196 - 4.423i \quad F(I_2) = (5.457 \quad -54.149)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left(Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)} \quad I_3 = -1.999 - 0.403i \quad F(I_3) = (2.04 \quad -168.597)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4} \quad I_4 = -0.713 + 0.816i \quad F(I_4) = (1.084 \quad 131.148)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad I_5 = -1.286 - 1.22i \quad F(I_5) = (1.772 \quad -136.515)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad I_2 + I_5 + I_4 - I_1 = 0$$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) = -7.105 \times 10^{-15} - 7.105i \times 10^{-15}$$

$$I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (R_1 + i \cdot X_{L2}) = -8.216 \times 10^{-15} - 7.105i \times 10^{-15}$$

$$I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = 3.553 \times 10^{-15}$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 277.5 + 412.584i$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 277.5$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 412.584$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_b = 178.567 + 44.271i \quad F(\phi_b) = (183.973 \quad 13.924)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = 200.938 + 13.311i \quad F(\phi_c) = (201.378 \quad 3.79)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_d = 156.709 - 18.647i \quad F(\phi_d) = (157.814 \quad -6.786)$$

$$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_1 = 93.969 - 34.202i \quad F(\phi_1) = (100 \quad -20)$$

$$\phi_{1'} := \phi_1 - U \quad \phi_{1'} = 7.105i \times 10^{-15}$$

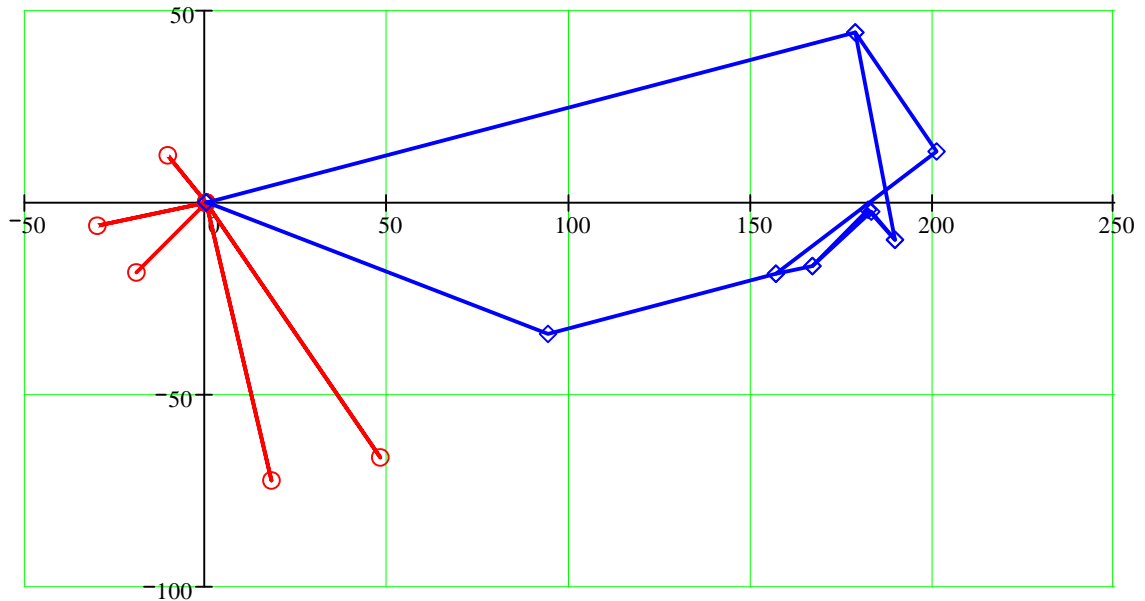
$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_e = 189.455 - 9.71i \quad F(\phi_e) = (189.703 \quad -2.934)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_m = 183.034 - 2.363i \quad F(\phi_m) = (183.049 \quad -0.74)$$

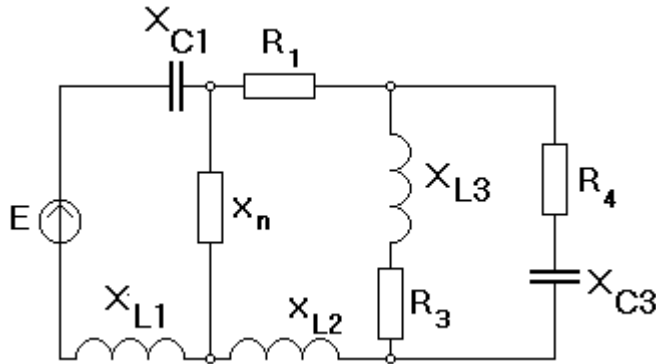
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_n = 166.706 - 16.631i \quad F(\phi_n) = (167.533 \quad -5.697)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_k = 182.137 - 1.995i \quad F(\phi_k) = (182.147 \quad -0.628)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = 166.706 - 16.631i \quad F(\phi_n) = (167.533 \quad -5.697)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 16.604 + 28.121i$$

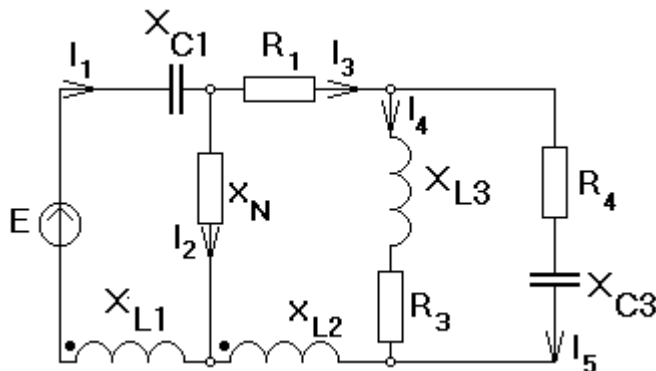
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \text{Re}(Z_E) \quad R_E = 16.604 \quad X_E := \text{Im}(Z_E) \quad X_E = 28.121$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.026 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -37.925$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 24i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 5 + 27i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 9 + 20i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 12 - 6i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 16.604 + 28.121i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(10577 \cdot X_N^2 + 1539178 \cdot i \cdot X_N + 33201 \cdot i \cdot X_N^2 + 16304496 \cdot i)}{(679354 + 35826 \cdot X_N + 637 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -16.381627487911649904 \\ -29.977759277547221816 \end{pmatrix} \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -16.382 \\ -29.978 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N0} = -16.382$). ($X_{N1} = -29.978$)

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -16.382 \quad Z_{VX}(X_n) = 10.776$$

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

$$I_1 = 8.72 - 3.174i$$

$$F(I_1) = (9.28 \quad -20)$$

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

$$I_2 = 14.864 + 1.086i$$

$$F(I_2) = (14.903 \quad 4.179)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -6.143 - 4.26i$$

$$F(I_3) = (7.476 \quad -145.26)$$

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

$$I_4 = -3.586 + 1.712i$$

$$F(I_4) = (3.974 \quad 154.485)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -2.557 - 5.972i$$

$$F(I_5) = (6.496 \quad -113.178)$$

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

$$S_1 = 928.015$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 928.015$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 1.023 \times 10^{-12}$$

При $X_n := X_{N1} \quad X_n = -29.978 \quad Z_{VX}(X_n) = 53.454$

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

$$I_1 = 1.758 - 0.64i$$

$$F(I_1) = (1.871 \quad -20)$$

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

$$I_2 = 2.548 + 2.622i$$

$$F(I_2) = (3.657 \quad 45.821)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -0.79 - 3.262i$$

$$F(I_3) = (3.357 \quad -103.619)$$

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

$$I_4 = -1.714 - 0.496i$$

$$F(I_4) = (1.784 \quad -163.874)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 0.924 - 2.767i$$

$$F(I_5) = (2.917 \quad -71.537)$$

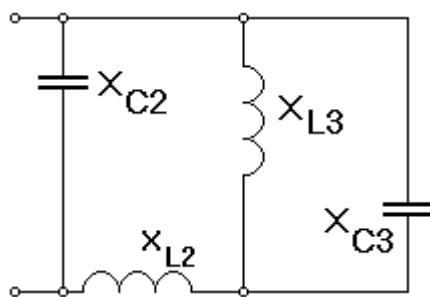
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 187.078$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 187.078$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 7.816 \times 10^{-14}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{27}{100 \cdot \pi}$$

$$L_2 = 0.086$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{5 \cdot \pi}$$

$$L_3 = 0.064$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{1000 \cdot \pi}$$

$$C_2 = 3.183 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{600 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 5.305 \times 10^{-4}$$

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

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

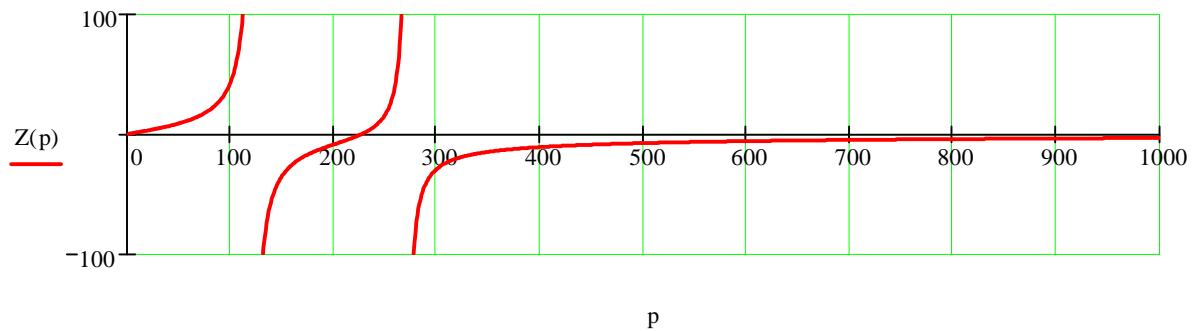
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 227.0270 \\ -227.0270 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 227.027 \\ -227.027 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (227.027 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

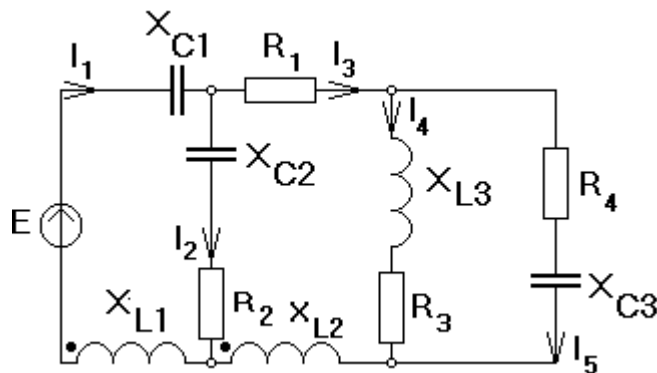
$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 270.80837956 \\ 121.48324728 \\ -121.48324728 \\ -270.80837956 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 270.808 \\ 121.483 \\ -121.483 \\ -270.808 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{1_0} \\ \omega_{1_2} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 270.808 \\ -121.483 \end{pmatrix}$$



При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

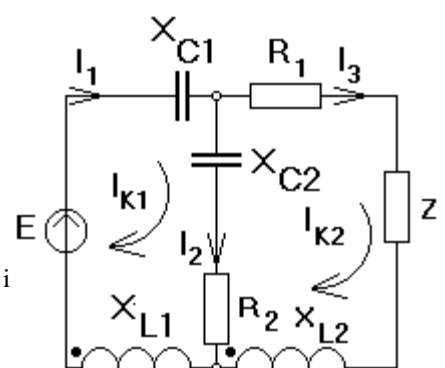
- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

імпеданс



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

$$Z = 11.604 + 1.121i$$



$$Z_{11} := R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}) \rightarrow 7 + 14 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 7 - 25 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 23.60440 + 18.12088 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 2.3683446101447016952 - 2.0849539659329839027 \cdot i \\ -2.4577366288103238965 - 1.2398935153137553850 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 2.368 - 2.085i$$

$$I_{K2} = -2.458 - 1.24i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 2.368 - 2.085i$$

$$F(I_1) = (3.155 \ -41.359)$$

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

$$I_2 = 4.826 - 0.845i$$

$$F(I_2) = (4.9 \ -9.932)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = -2.458 - 1.24i$$

$$F(I_3) = (2.753 \ -153.23)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z}{R_3 + i \cdot X_{L3}}$$

$$I_4 = -1.22 + 0.807i$$

$$F(I_4) = (1.463 \ 146.515)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z}{R_4 - i \cdot X_{C3}} \quad I_5 = -1.237 - 2.047i \quad F(I_5) = (2.392 \quad -121.148)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad I_2 + I_5 + I_4 - I_1 = 0$$

$$S_{M1} := I_1 \cdot \overline{I_3} \cdot i \cdot X_M \quad S_{M1} = -120.911 - 48.535i \quad F(S_{M1}) = (130.289 \quad -158.129)$$

$$S_{M2} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot i \cdot X_M \quad S_{M2} = 120.911 - 48.535i \quad F(S_{M2}) = (130.289 \quad -21.871)$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 293.861 + 114.919i$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 293.861$$

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

$$Q := Q + S_{M1} + S_{M2} \quad Q = 114.919i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (i \cdot X_{L1}) \quad \phi_b = 77.143 + 87.629i \quad F(\phi_b) = (116.747 \quad 48.641)$$

$$\phi_{b'} := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_M \quad \phi_{b'} = 95.742 + 50.763i \quad F(\phi_{b'}) = (108.367 \quad 27.933)$$

$$\phi_c := \phi_{b'} + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = 129.524 + 44.847i \quad F(\phi_c) = (137.069 \quad 19.098)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_d = 121.074 - 3.414i \quad F(\phi_d) = (121.122 \quad -1.615)$$

$$\phi_1 := \phi_d - I_1 \cdot i \cdot X_{C1} \quad \phi_1 = 93.969 - 34.202i \quad F(\phi_1) = (100 \quad -20)$$

$$\phi_{1'} := \phi_1 - U \quad \phi_{1'} = 7.105i \times 10^{-15}$$

$$\phi_{e'} := \phi_{b'} + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_{e'} = 129.219 - 15.596i \quad F(\phi_{e'}) = (130.157 \quad -6.882)$$

$$\phi_e := \phi_{e'} + I_1 \cdot i \cdot X_M \quad \phi_e = 160.493 + 19.929i \quad F(\phi_e) = (161.726 \quad 7.078)$$

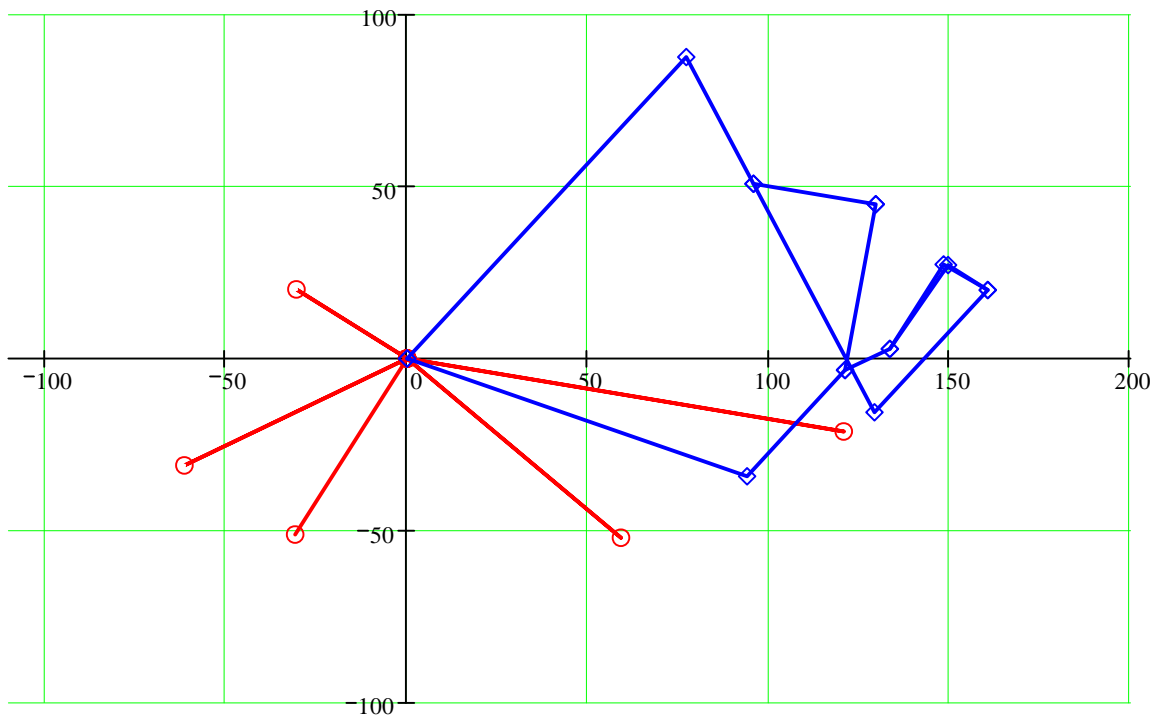
$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_m = 149.509 + 27.195i \quad F(\phi_m) = (151.962 \quad 10.309)$$

$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_n = 133.362 + 2.786i \quad F(\phi_n) = (133.391 \quad 1.197)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_k = 148.21 + 27.353i \quad F(\phi_k) = (150.713 \quad 10.457)$$

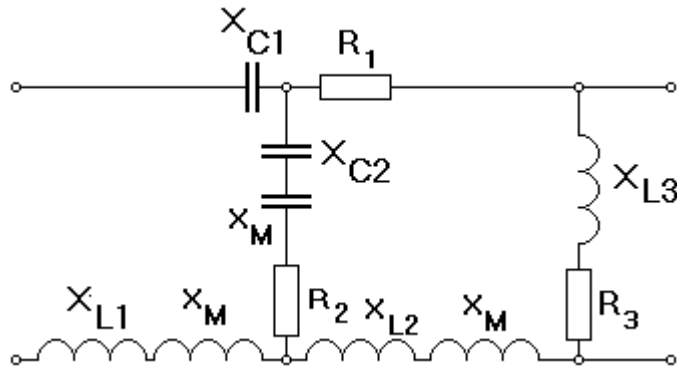
$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = 133.362 + 2.786i \quad F(\phi_n) = (133.391 \quad 1.197)$$

$$\phi_d := \phi_n + I_3 \cdot R_1 \quad \phi_d = 121.074 - 3.414i \quad F(\phi_d) = (121.122 \quad -1.615)$$



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":

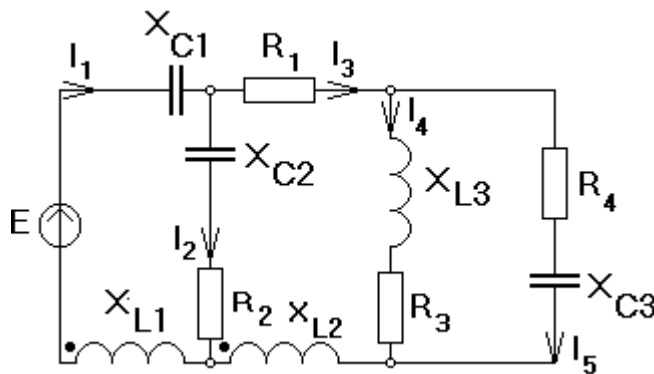
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 39 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 7 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 14 + 62 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 20.838 + 6.286i$$

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

$$I_{10} = 3.68 - 2.751i$$

$$F(I_{10}) = (4.595 \quad -36.787)$$

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

$$I_{30} = -2.773 - 0.411i$$

$$F(I_{30}) = (2.804 \quad -171.567)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = -16.737 - 59.168i$$

$$F(U_{20}) = (61.49 \quad -105.795)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

$$A = 0.119 + 1.622i$$

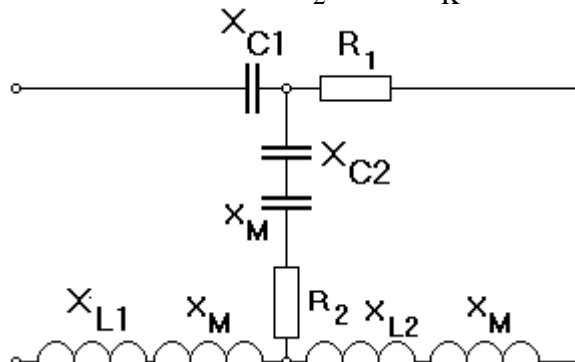
$$F(A) = (1.626 \quad 85.795)$$

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

$$C = 0.027 + 0.07i$$

$$F(C) = (0.075 \quad 69.008)$$

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 39 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 7 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 5 + 42 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 36.704 + 1.085i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 2.53 - 1.007i \quad F(I_{1K}) = (2.723 \quad -21.694)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -2.967 - 1.656i \quad F(I_{3K}) = (3.398 \quad -150.834)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -19.245 + 22.269i \quad F(B) = (29.432 \quad 130.834)$$

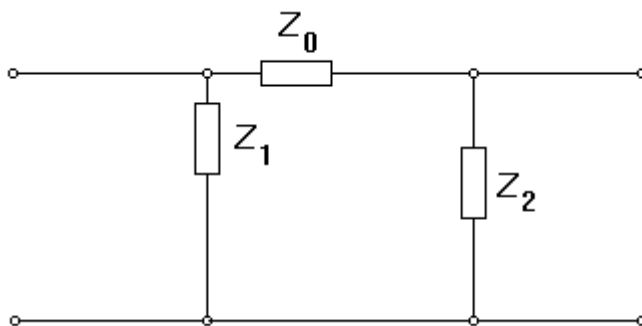
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.506 + 0.622i \quad F(D) = (0.802 \quad 129.14)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (1.626 \quad 85.795) \quad F(B) = (29.432 \quad 130.834)$$

$$F(C) = (0.075 \quad 69.008) \quad F(D) = (0.802 \quad 129.14)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -19.245 + 22.269i \quad F(Z_0) = (29.432 \quad 130.834)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.049 + 0.025i \quad F(Y_1) = (0.055 \quad 26.735)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.061 - 0.013i \quad F(Y_2) = (0.063 \quad -12.331)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -19.245 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 22.269$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 16.134 - 8.127i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 16.134 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 8.127$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 15.579 + 3.406i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 15.579 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 3.406$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 3.917 \times 10^{-4} \quad L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 0.011$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.071$$