

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 185

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.

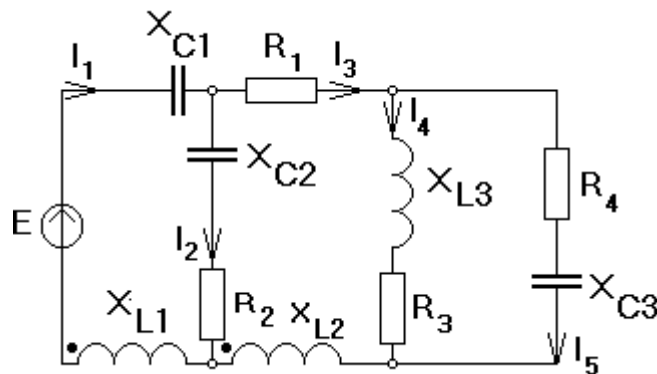
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L_1 ТА L_2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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" :

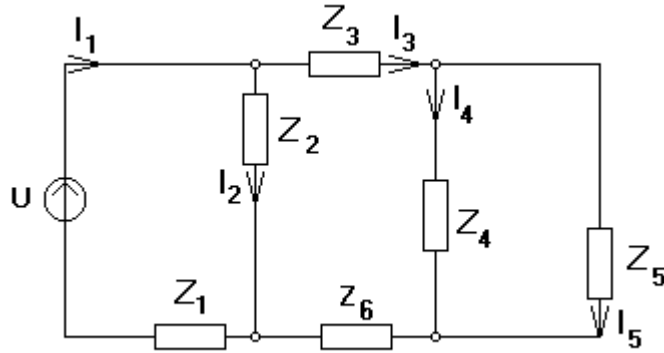
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти A, B, C, D чотириполіусника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 100 & \psi &:= -20 & R_1 &:= 5 & R_2 &:= 7 & R_3 &:= 9 & R_4 &:= 12 \\ X_{L1} &:= 60 & X_{L2} &:= 50 & X_{L3} &:= 43 & X_{C1} &:= 20 & X_{C2} &:= 15 & X_{C3} &:= 13 \\ X_M &:= 32 & f &:= 100 & & & & & & & & \\ U &:= E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & U = 93.969 - 34.202i & F(U) = (100 \ -20) \end{aligned}$$



Для електричного кола без взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символьним методом



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

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 7 - 15 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 5$$

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 9 + 43 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 12 - 13 \cdot i$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L2} \rightarrow 50 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 13.588 + 26.165i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 0.439 - 3.363i \quad F(I_1) = (3.392 \quad -82.556)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} \quad I_2 = 1.798 - 3.543i \quad F(I_2) = (3.973 \quad -63.088)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left(Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)} \quad I_3 = -1.359 + 0.18i \quad F(I_3) = (1.371 \quad 172.457)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4} \quad I_4 = 0.225 + 0.623i \quad F(I_4) = (0.662 \quad 70.159)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad I_5 = -1.584 - 0.443i \quad F(I_5) = (1.645 \quad -164.372)$$

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:

$$-I_1 \cdot [i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) = 2.132 \times 10^{-14}$$

$$I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (R_1 + i \cdot X_{L2}) = 3.553 \times 10^{-15}$$

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

Перевірка за балансом потужностей

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 156.318 + 301.007i$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 156.318$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 301.007$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot i \cdot X_{L1}$$

$$\phi_b = 201.791 + 26.364i$$

$$F(\phi_b) = (203.506 \quad 7.444)$$

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

$$\phi_c = 214.38 + 1.563i$$

$$F(\phi_c) = (214.385 \quad 0.418)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2})$$

$$\phi_d = 161.233 - 25.414i$$

$$F(\phi_d) = (163.223 \quad -8.957)$$

$$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1})$$

$$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$$

$$F(\phi_1) = (100 \quad -20)$$

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

$$\phi_{1'} = -1.421 \times 10^{-14}$$

$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$\phi_e = 192.793 - 41.587i$$

$$F(\phi_e) = (197.228 \quad -12.173)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3$$

$$\phi_m = 194.816 - 35.98i$$

$$F(\phi_m) = (198.111 \quad -10.464)$$

$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3}$$

$$\phi_n = 168.028 - 26.314i$$

$$F(\phi_n) = (170.076 \quad -8.9)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3})$$

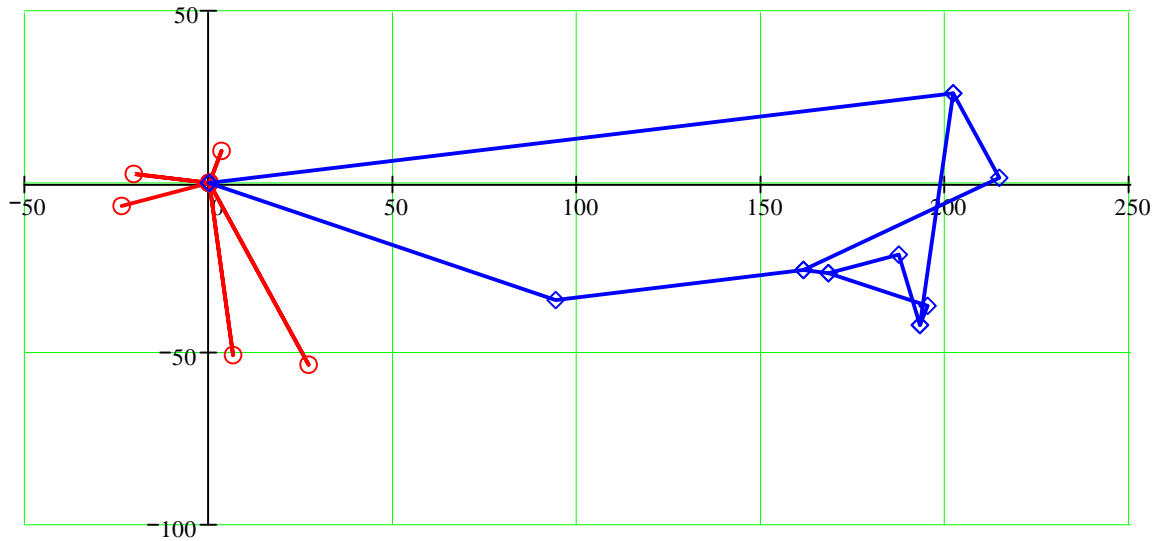
$$\phi_k = 187.034 - 20.997i$$

$$F(\phi_k) = (188.209 \quad -6.405)$$

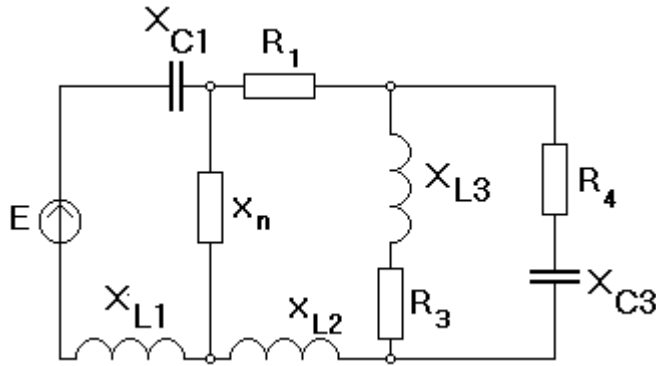
$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4$$

$$\phi_n = 168.028 - 26.314i$$

$$F(\phi_n) = (170.076 \quad -8.9)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 24.371 + 41.327i$$

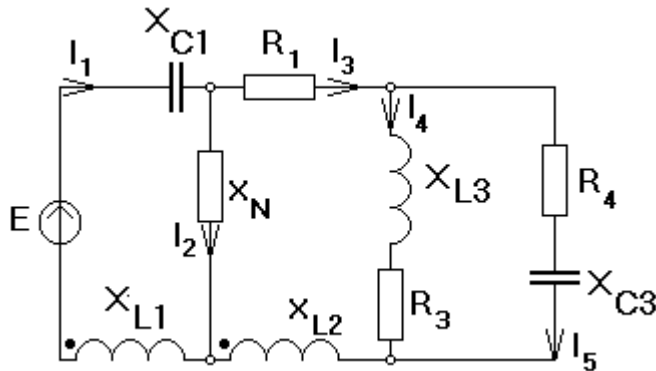
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 24.371 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = 41.327$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.018 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -55.699$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 40i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 5 + 50i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 9 + 43i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 12 - 13i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 24.371 + 41.327i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(32682 \cdot X_N^2 + 7520305 \cdot i \cdot X_N + 109059 \cdot i \cdot X_N^2 + 123471400 \cdot i)}{(3086785 + 110838 \cdot X_N + 1341 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -26.955485836155704563 \\ -42.000813047934558505 \end{pmatrix} \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -26.955 \\ -42.001 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N0} = -26.955$), ($X_{N1} = -42.001$)

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -26.955 \quad Z_{VX}(X_n) = 22.122$$

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

$$I_1 = 4.248 - 1.546i$$

$$F(I_1) = (4.52 \quad -20)$$

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

$$I_2 = 7.572 + 1.192i$$

$$F(I_2) = (7.666 \quad 8.944)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -3.324 - 2.738i$$

$$F(I_3) = (4.307 \quad -140.527)$$

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

$$I_4 = -0.95 + 1.851i$$

$$F(I_4) = (2.081 \quad 117.175)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -2.374 - 4.589i$$

$$F(I_5) = (5.167 \quad -117.356)$$

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

$$S_1 = 452.047$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 452.047$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 2.274 \times 10^{-13}$$

При $X_n := X_{N1} \quad X_n = -42.001 \quad Z_{VX}(X_n) = 72.327$

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

$$I_1 = 1.299 - 0.473i$$

$$F(I_1) = (1.383 \quad -20)$$

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

$$I_2 = 2.052 + 1.787i$$

$$F(I_2) = (2.721 \quad 41.056)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -0.752 - 2.26i$$

$$F(I_3) = (2.382 \quad -108.415)$$

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

$$I_4 = -0.989 + 0.588i$$

$$F(I_4) = (1.151 \quad 149.286)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 0.237 - 2.848i$$

$$F(I_5) = (2.857 \quad -85.245)$$

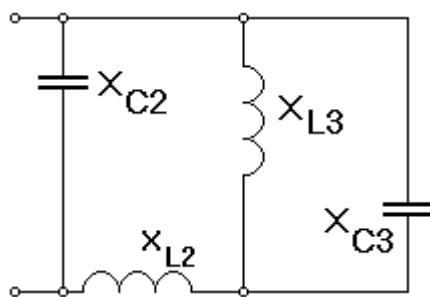
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 138.26$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 138.26$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 8.527 \times 10^{-14}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{4 \cdot \pi}$$

$$L_2 = 0.08$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{43}{200 \cdot \pi}$$

$$L_3 = 0.068$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi}$$

$$C_2 = 1.061 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{2600 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 1.224 \times 10^{-4}$$

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

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

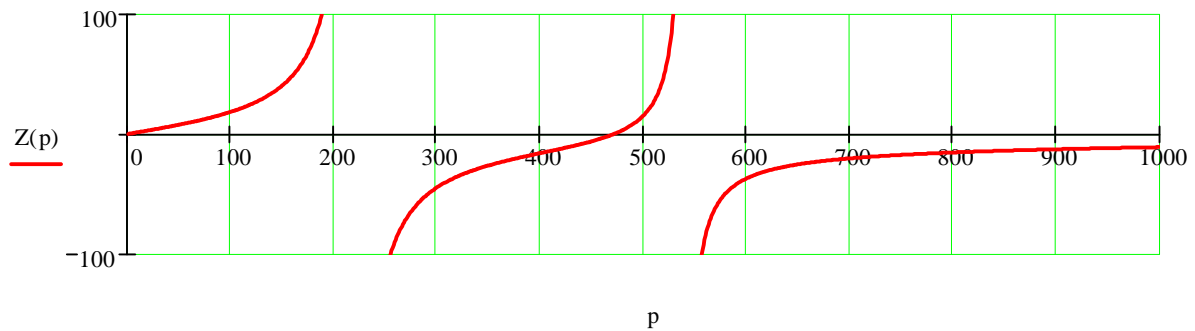
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 471.1661 \\ -471.1661 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 471.166 \\ -471.166 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (471.166 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

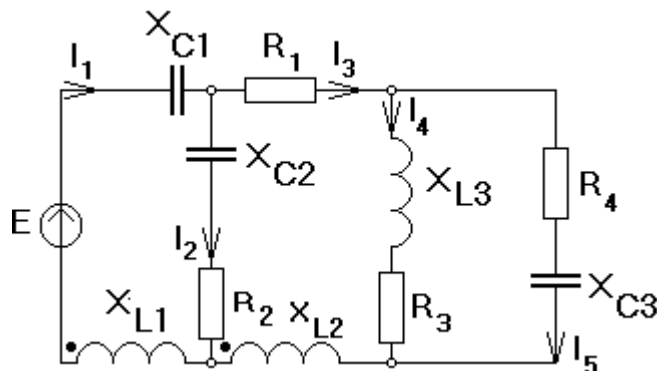
$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 540.39547791 \\ -540.39547791 \\ 220.01186693 \\ -220.01186693 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 540.395 \\ -540.395 \\ 220.012 \\ -220.012 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{1_0} \\ \omega_{1_2} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 540.395 \\ 220.012 \end{pmatrix}$$



При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

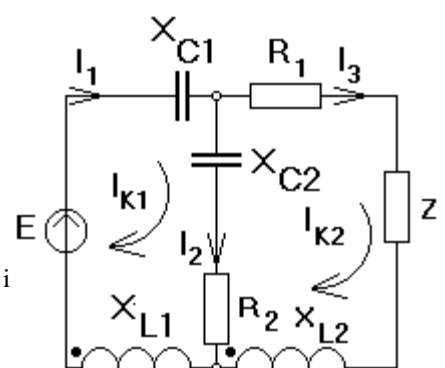
- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

імпеданс



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

$$Z = 19.371 - 8.673i$$



$$Z_{11} := R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}) \rightarrow 7 + 25 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 7 - 47 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 31.37136 + 26.32662 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 1.5873266118362612145 - .68603793285913996076 \cdot i \\ -1.6416502014824634639 - 1.1535207673166226944 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 1.587 - 0.686i$$

$$I_{K2} = -1.642 - 1.154i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 1.587 - 0.686i$$

$$F(I_1) = (1.729 \ -23.374)$$

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

$$I_2 = 3.229 + 0.467i$$

$$F(I_2) = (3.263 \ 8.238)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = -1.642 - 1.154i$$

$$F(I_3) = (2.006 \ -144.906)$$

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

$$I_4 = -0.376 + 0.894i$$

$$F(I_4) = (0.969 \ 112.796)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z}{R_4 - i \cdot X_{C3}}$$

$$I_5 = -1.266 - 2.047i$$

$$F(I_5) = (2.407 \quad -121.735)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

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

$$S_{M1} := I_1 \cdot \overline{I_3} \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M1} = -94.632 - 58.063i$$

$$F(S_{M1}) = (111.025 \quad -148.468)$$

$$S_{M2} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot i \cdot X_M$$

$$S_{M2} = 94.632 - 58.063i$$

$$F(S_{M2}) = (111.025 \quad -31.532)$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 172.624 + 10.177i$$

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

$$P = 172.624$$

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

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

$$Q = 10.177i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (i \cdot X_{L1})$$

$$\phi_b = 41.162 + 95.24i$$

$$F(\phi_b) = (103.754 \quad 66.626)$$

$$\phi_{b'} := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_M$$

$$\phi_{b'} = 78.075 + 42.707i$$

$$F(\phi_{b'}) = (88.992 \quad 28.679)$$

$$\phi_c := \phi_{b'} + I_2 \cdot R_2$$

$$\phi_c = 100.678 + 45.979i$$

$$F(\phi_c) = (110.68 \quad 24.546)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2})$$

$$\phi_d = 107.69 - 2.455i$$

$$F(\phi_d) = (107.718 \quad -1.306)$$

$$\phi_1 := \phi_d - I_1 \cdot i \cdot X_{C1}$$

$$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$$

$$F(\phi_1) = (100 \quad -20)$$

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

$$\phi_{1'} = -1.421 \times 10^{-14}$$

$$\phi_{e'} := \phi_{b'} + I_3 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$\phi_{e'} = 135.751 - 39.376i$$

$$F(\phi_{e'}) = (141.346 \quad -16.175)$$

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

$$\phi_e = 157.704 + 11.419i$$

$$F(\phi_e) = (158.117 \quad 4.141)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3$$

$$\phi_m = 154.324 + 19.461i$$

$$F(\phi_m) = (155.546 \quad 7.187)$$

$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3}$$

$$\phi_n = 115.898 + 3.312i$$

$$F(\phi_n) = (115.946 \quad 1.637)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3})$$

$$\phi_k = 131.091 + 27.878i$$

$$F(\phi_k) = (134.023 \quad 12.006)$$

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

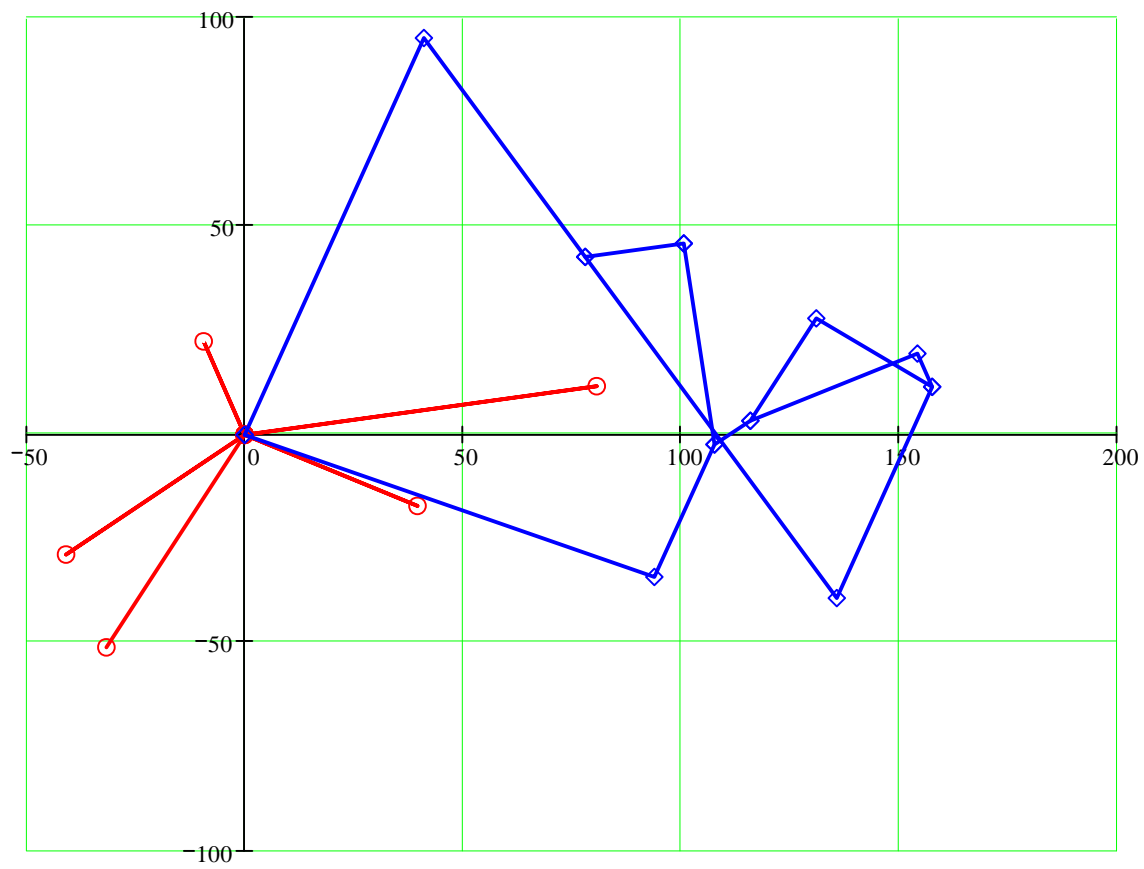
$$\phi_n = 115.898 + 3.312i$$

$$F(\phi_n) = (115.946 \quad 1.637)$$

$$\phi_d := \phi_n + I_3 \cdot R_1$$

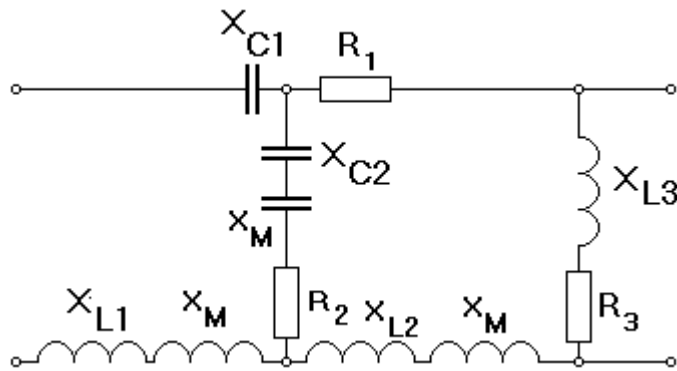
$$\phi_d = 107.69 - 2.455i$$

$$F(\phi_d) = (107.718 \quad -1.306)$$



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":

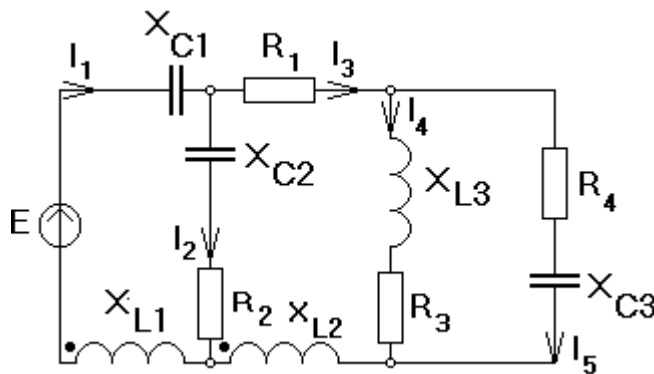
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 72 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 7 - 47 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 14 + 125 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 21.817 + 1.297i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_E} \quad I_{10} = 4.199 - 1.817i \quad F(I_{10}) = (4.575 \quad -23.402)$$

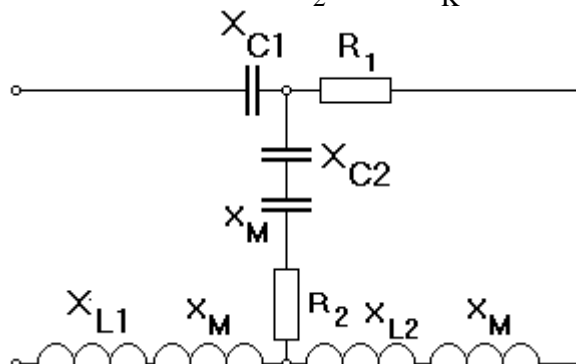
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -2.692 - 6.459i \times 10^{-3} \quad F(I_{30}) = (2.692 \quad -179.862)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = -23.946 - 115.794i \quad F(U_{20}) = (118.244 \quad -101.684)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.122 + 0.837i \quad F(A) = (0.846 \quad 81.684)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 7.859 \times 10^{-3} + 0.038i \quad F(C) = (0.039 \quad 78.282)$$

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 72 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 7 - 47 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 5 + 82 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 42.756 - 24.455i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 2.001 + 0.344i \quad F(I_{1K}) = (2.03 \quad 9.768)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -2.078 - 1.575i \quad F(I_{3K}) = (2.607 \quad -142.836)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -20.796 + 32.225i \quad F(B) = (38.353 \quad 122.836)$$

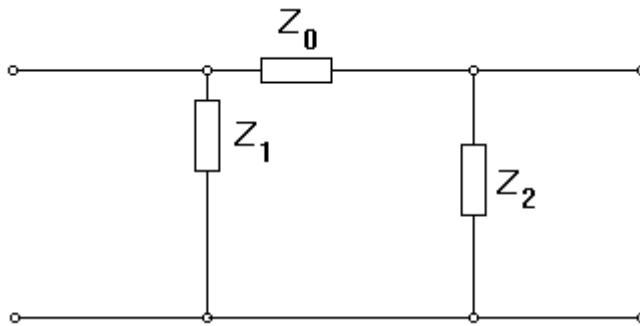
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.691 + 0.358i \quad F(D) = (0.779 \quad 152.604)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (0.846 \quad 81.684) \quad F(B) = (38.353 \quad 122.836)$$

$$F(C) = (0.039 \quad 78.282) \quad F(D) = (0.779 \quad 152.604)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -20.796 + 32.225i \quad F(Z_0) = (38.353 \quad 122.836)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.032 + 0.032i \quad F(Y_1) = (0.045 \quad 45.203)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.031 + 7.397i \times 10^{-3} \quad F(Y_2) = (0.032 \quad 13.529)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -20.796 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 32.225$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 15.631 - 15.742i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 15.631 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 15.742$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 30.749 - 7.399i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 30.749 \quad X_{C2} := -\operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{C2} = 7.399$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 1.011 \times 10^{-4} \quad C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \quad C_2 = 2.151 \times 10^{-4}$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.051$$