

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 788

Виконав: _____

Перевірив: _____

Київ 2006

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; визначити покази вольтметра;
- 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 закортити.

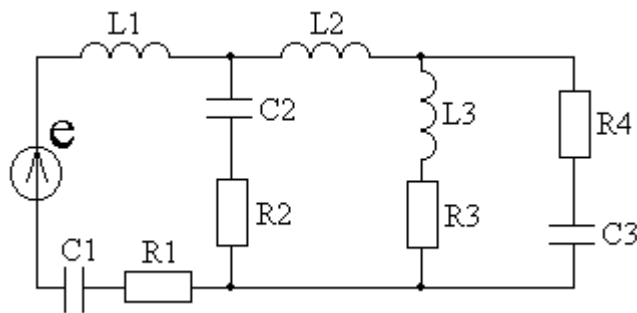
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L_1 ТА L_2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів, визначити покази 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" :

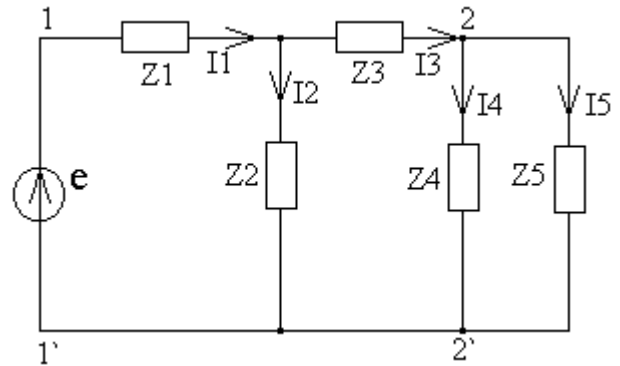
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти А, В, С, D чотириполусника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 220 & \phi &:= 50 & R_1 &:= 16 & R_2 &:= 14 & R_3 &:= 12 & R_4 &:= 10 \\ X_{L1} &:= 60 & X_{L2} &:= 50 & X_{L3} &:= 43 & X_{C1} &:= 20 & X_{C2} &:= 15 & X_{C3} &:= 13 \\ X_M &:= 32 & f &:= 100 \end{aligned}$$



Символічний метод

$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_1 &= 16 + 40i \\ Z_2 &:= R_2 - X_{C2} \cdot i & Z_2 &= 14 - 15i \\ Z_3 &:= X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 50i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 12 + 43i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 10 - 13i \end{aligned}$$



$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \quad Z_{345} = 16.733 + 39.637i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_{345}}{Z_2 + Z_{345}} + Z_1 \quad Z_E = 37.244 + 32.859i$$

$$E_C = 141.413 + 168.53i$$

$$F(E_C) = (220 \quad 50)$$

$$I_1 := \frac{E_C}{Z_E} \quad I_1 = 4.38 + 0.661i$$

$$F(I_1) = (4.429 \quad 8.579)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + Z_2} \quad I_2 = 3.865 + 2.91i$$

$$F(I_2) = (4.838 \quad 36.974)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 0.515 - 2.249i$$

$$F(I_3) = (2.307 \quad -77.114)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -1.016 + 0.058i$$

$$F(I_4) = (1.017 \quad 176.709)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = 1.53 - 2.308i$$

$$F(I_5) = (2.769 \quad -56.453)$$

Баланс потужностей електричного кола :

$$S_r := E_C \cdot \overline{I_1} \quad S_r = 730.739 + 644.706i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 730.739$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot X_{L2} \cdot i + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} \cdot i + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3} \cdot i) \\ Q = 644.706i$$

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_{1'} := 0$$

$$\phi_a := \phi_{1'} + I_1 \cdot (-X_{C1} \cdot i) \quad \phi_a = 13.215 - 87.598i$$

$$F(\phi_a) = (88.59 \quad -81.421)$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot R_1 \quad \phi_b = 83.294 - 77.026i$$

$$F(\phi_b) = (113.45 \quad -42.761)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = 137.409 - 36.286i$$

$$F(\phi_c) = (142.119 \quad -14.792)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-X_{C2} \cdot i) \quad \phi_d = 181.06 - 94.266i$$

$$F(\phi_d) = (204.129 \quad -27.503)$$

$$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i \quad \phi_1 = 141.413 + 168.53i$$

$$F(\phi_1) = (220 \quad 50)$$

$$\phi_A := \phi_1 - E_C \quad \phi_A = -2.842 \times 10^{-14}$$

$$\phi_k := \phi_b + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_k = 71.107 - 76.325i$$

$$F(\phi_k) = (104.316 \quad -47.027)$$

$$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot X_{L3} \cdot i \quad \phi_z = 68.596 - 119.995i$$

$$F(\phi_z) = (138.218 \quad -60.245)$$

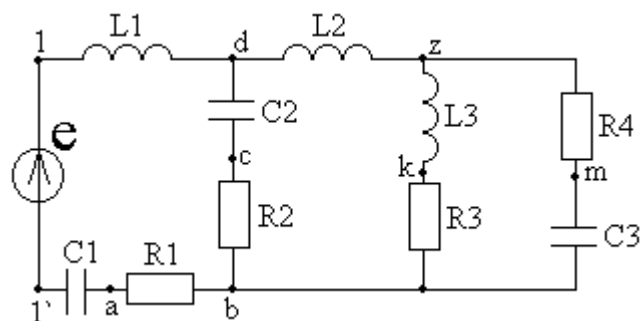
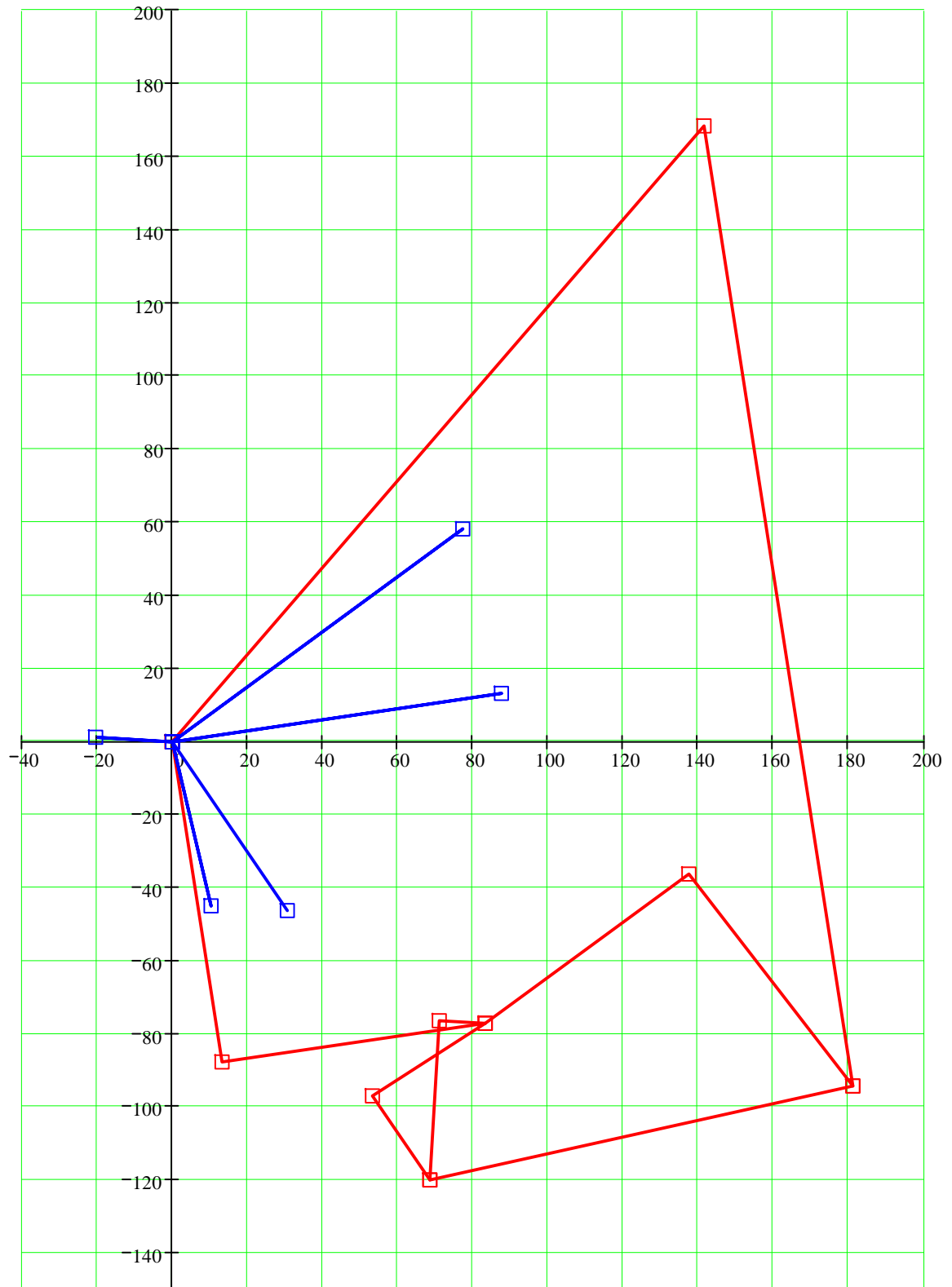
$$\phi_d := \phi_z + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i \quad \phi_d = 181.06 - 94.266i$$

$$F(\phi_d) = (204.129 \quad -27.503)$$

$$\phi_m := \phi_b + I_5 \cdot (-X_{C3} \cdot i) \quad \phi_m = 53.294 - 96.918i$$

$$F(\phi_m) = (110.605 \quad -61.194)$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



1.5. Прийнявши активний опір R2 за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів.

$$Z_3 := X_{L2} \cdot i$$

$$Z_3 = 50i$$

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

$$Z_4 = 12 + 43i$$

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

$$Z_5 = 10 - 13i$$

$$Z_E := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3$$

$$Z_E = 16.733 + 39.637i$$

$$R_E := \operatorname{Re}(Z_E)$$

$$R_E = 16.733$$

$$X_E := \operatorname{Im}(Z_E)$$

$$X_E = 39.637$$

Умова резонансу струмів на ділянці "ab" : $B_{ab} = B_2 + B_E$ $B_{ab} := 0$ $B_2 = -B_E$

$$B_2 := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2}$$

$$B_2 = -0.021$$

$$X_2 := \frac{1}{B_2}$$

$$X_2 = -46.701$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола

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

$$Z_1 = 16 + 40i$$

$$Z_3 := X_{L2} \cdot i$$

$$Z_3 = 50i$$

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

$$Z_4 = 12 + 43i$$

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

$$Z_5 = 10 - 13i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3$$

$$Z_{345} = 16.733 + 39.637i$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left(\frac{-27429}{692} + \frac{11579}{692} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left(\frac{11579}{692} + \frac{27429}{692} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 16 + 40 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(1755456 \cdot X_N + 45302 \cdot X_N^2 + 40990672 + 6950557 \cdot i \cdot X_N + 110218 \cdot i \cdot X_N^2 + 10247668)}{(2561917 + 109716 \cdot X_N + 1384 \cdot X_N^2)}$$

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

$$X_{VX}(X_N) := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(6950557 \cdot X_N + 110218 \cdot X_N^2 + 102476680)}{(2561917 + 109716 \cdot X_N + 1384 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left(\begin{array}{l} -23.503661773477892813 \\ -39.558242815609189151 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N_0} \\ X_{N_1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -23.504 \\ -39.558 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N_0} = -23.504$), ($X_{N_1} = -39.558$)

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = -23.504$$

$$Z_{VX}(X_n) = 33.109$$

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

$$I_1 = 4.271 + 5.09i$$

$$F(I_1) = (6.645 \quad 50)$$

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

$$I_2 = 3.564 + 11.772i$$

$$F(I_2) = (12.299 \quad 73.157)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 0.707 - 6.682i$$

$$F(I_3) = (6.719 \quad -83.956)$$

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

$$I_4 = -2.916 + 0.521i$$

$$F(I_4) = (2.962 \quad 169.867)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 3.623 - 7.203i$$

$$F(I_5) = (8.063 \quad -63.295)$$

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

$$S_1 = 1.462 \times 10^3$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.462 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}), Q = -3.411 \times 10^{-13}$$

$$\text{При } X_n := X_{N_1} \quad X_n = -39.558 \quad Z_{VX}(X_n) = 109.519$$

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

$$I_1 = 1.291 + 1.539i$$

$$F(I_1) = (2.009 \quad 50)$$

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

$$I_2 = -2.332 + 4.609i$$

$$F(I_2) = (5.165 \quad 116.843)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 3.623 - 3.07i$$

$$F(I_3) = (4.749 \quad -40.271)$$

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

$$I_4 = -1.745 - 1.157i$$

$$F(I_4) = (2.094 \quad -146.448)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 5.368 - 1.913i$$

$$F(I_5) = (5.699 \quad -19.61)$$

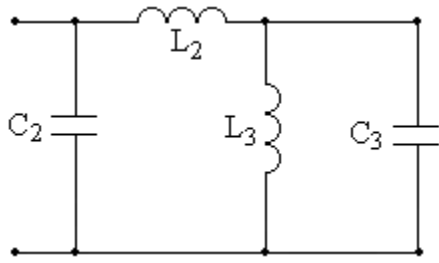
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 441.933$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 441.933$$

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

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{4 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.08$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{43}{200 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.068$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi} \quad C_2 = 1.061 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{2600 \cdot \pi} \quad C_3 = 1.224 \times 10^{-4}$$

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

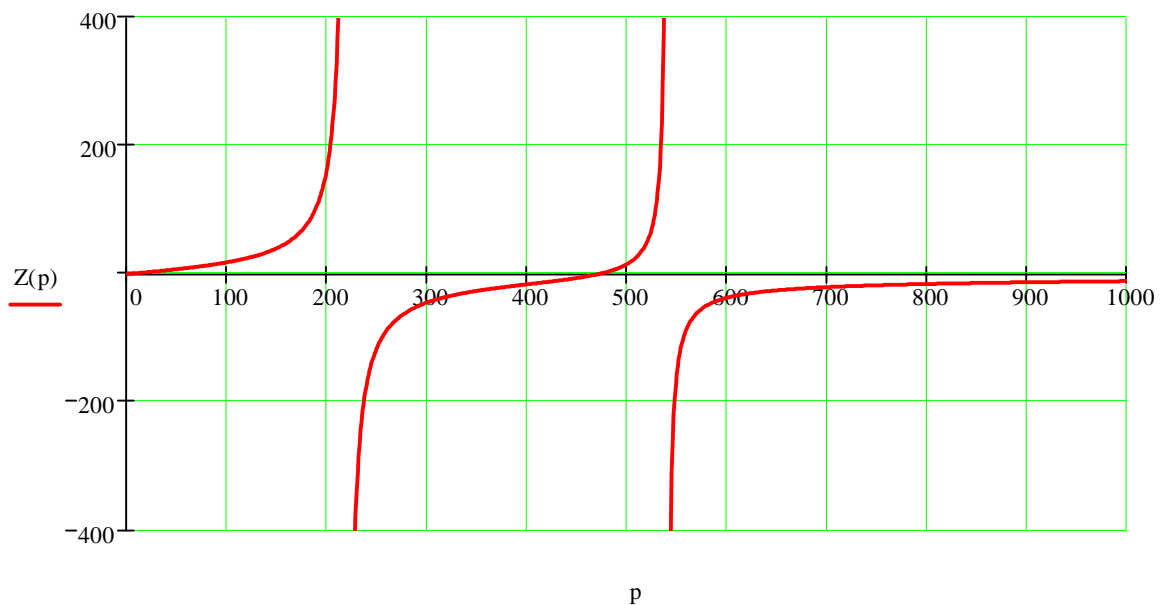
$$\frac{-1}{p \cdot C_2} + \frac{p \cdot L_3 \cdot \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 - \frac{1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2$$

Знаходимо нулі: $Z(p) = 0$

$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 471. \\ -471. \\ 0 \end{pmatrix}$$

Знаходимо полюси: $\frac{1}{Z(p)} = 0$

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 540.3954782 \\ -540.3954782 \\ 220.0118669 \\ -220.0118669 \end{pmatrix}$$



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

2.1. Розрахувати струми віток методом контурних струмів, попередньо спростивши схему до двох незалежних контурів.

2.2. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів і топографічну діаграму напруг.

2.3. Скласти баланс активних і реактивних потужностей кола.

2.4. Розрахувати активну потужність, що передається магнітним потоком взаємодукції.

Спростимо схему до двох незалежних контурів

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

$$Z_4 = 12 + 43i$$

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

$$Z_5 = 10 - 13i$$

$$Z_{45} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4}$$

$$Z_{45} = 16.733 - 10.363i$$

$$Z_{345} := Z_{45}$$

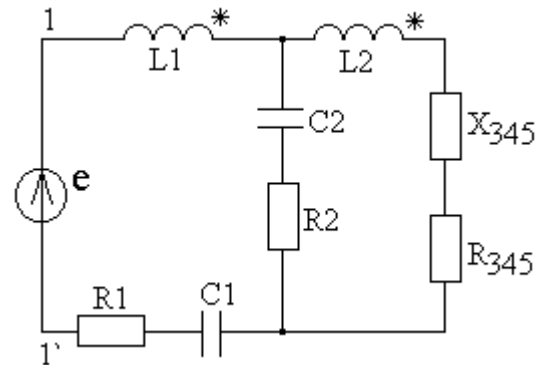
$$Z_{345} = 16.733 - 10.363i$$

$$R_{345} := \text{Re}(Z_{345})$$

$$R_{345} = 16.733$$

$$X_{345} := \text{Im}(Z_{345})$$

$$X_{345} = -10.363$$



$$Z_{11} := R_1 + R_2 - X_{C2} \cdot i + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i$$

$$Z_{11} = 30 + 25i$$

$$Z_{22} := R_{345} + X_{345} \cdot i - X_{C2} \cdot i + R_2 + X_{L2} \cdot i$$

$$Z_{22} = 30.733 + 24.637i$$

$$Z_{12} := R_2 - X_{C2} \cdot i - X_M \cdot i$$

$$Z_{21} := Z_{12}$$

$$Z_{12} = 14 - 47i$$

$$U = 141.413 + 168.53i$$

$$F(U) = (220 \ 50)$$

Given

$$I_1 \cdot (Z_{11}) - I_3 \cdot (Z_{12}) = U$$

$$-I_1 \cdot (Z_{21}) + I_3 \cdot (Z_{22}) = 0$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} := \text{Find}(I_1, I_3)$$

$$I_2 := I_1 - I_3$$

$$I_1 = 1.866 + 1.464i$$

$$F(I_1) = (2.372 \ 38.116)$$

$$I_2 = 1.053 + 4.303i$$

$$F(I_2) = (4.43 \ 76.251)$$

$$I_3 = 0.813 - 2.839i$$

$$F(I_3) = (2.953 \ -74.014)$$

Баланс потужностей електричного кола :

$$S_T := U \cdot \bar{I}_1$$

$$S_T = 510.592 + 107.449i$$

$$P_T := \text{Re}(S_T)$$

$$P_T = 510.592$$

$$Q_T := \text{Im}(S_T)$$

$$Q_T = 107.449$$

$$S_{M1} := \bar{I}_1 \cdot I_3 \cdot X_M \cdot i$$

$$S_{M1} = 207.596 - 84.425i$$

$$F(S_{M1}) = (224.106 \ -22.131)$$

$$S_{M2} := \bar{I}_3 \cdot I_1 \cdot X_M \cdot i$$

$$S_{M2} = -207.596 - 84.425i$$

$$F(S_{M2}) = (224.106 \ -157.869)$$

$$S_{KC} := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i + R_1 - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (R_2 - X_{C2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot (R_{345} + X_{345} \cdot i + X_{L2} \cdot i)$$

$$S_{KC} + (S_{M1} + S_{M2}) = 510.592 + 107.449i$$

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_{1'} := 0$$

$$\phi_a := \phi_{1'} + I_1 \cdot R_1$$

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

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

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

$$\phi_1 := \phi_d + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$$

$$\phi_{1'} := \phi_1 + I_3 \cdot X_M \cdot i$$

$$\phi_A := \phi_{1'} - E_C$$

$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot R_{345}$$

$$\phi_k := \phi_e + I_3 \cdot X_{345} \cdot i$$

$$\phi_{d'} := \phi_k + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i$$

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

$$\phi_a = 29.855 + 23.423i$$

$$\phi_b = 59.134 - 13.896i$$

$$\phi_c = 73.873 + 46.341i$$

$$\phi_d = 138.413 + 30.549i$$

$$\phi_1 = 50.576 + 142.507i$$

$$\phi_{1'} = 141.413 + 168.53i$$

$$\phi_A = -2.842 \times 10^{-14}$$

$$\phi_e = 72.742 - 61.395i$$

$$\phi_k = 43.325 - 69.822i$$

$$\phi_{d'} = 185.259 - 29.162i$$

$$\phi_d = 138.413 + 30.549i$$

$$F(\phi_a) = (37.947 \ 38.116)$$

$$F(\phi_b) = (60.745 \ -13.224)$$

$$F(\phi_c) = (87.205 \ 32.1)$$

$$F(\phi_d) = (141.744 \ 12.446)$$

$$F(\phi_1) = (151.216 \ 70.46)$$

$$F(\phi_{1'}) = (220 \ 50)$$

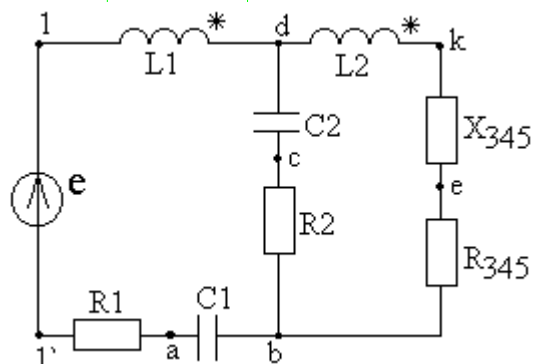
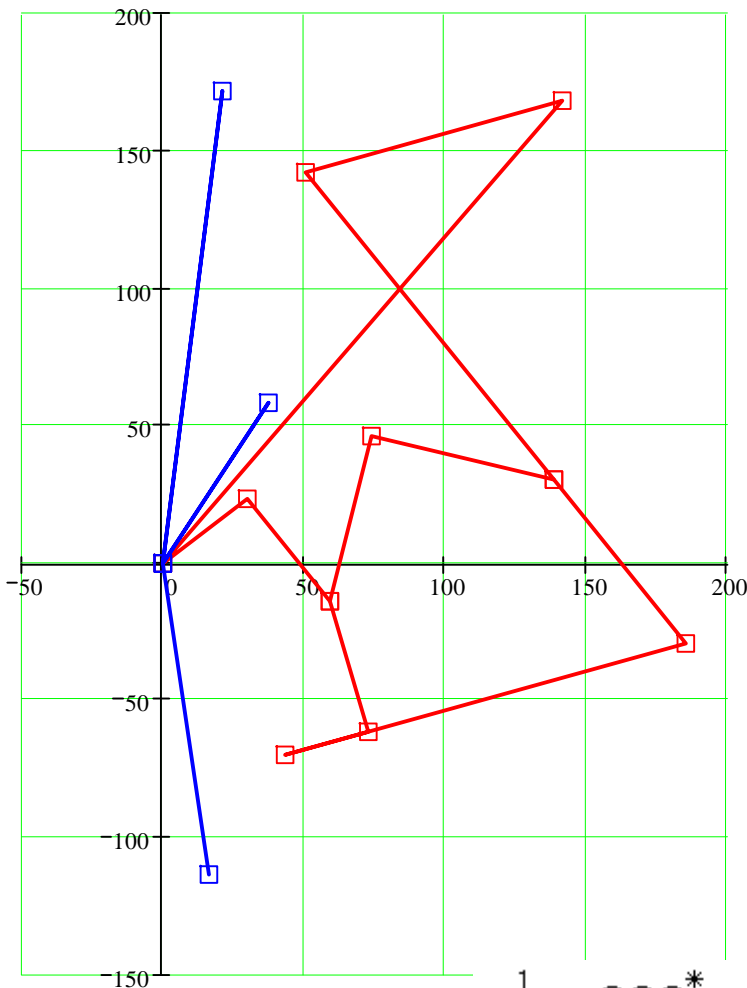
$$F(\phi_e) = (95.187 \ -40.165)$$

$$F(\phi_k) = (82.171 \ -58.18)$$

$$F(\phi_{d'}) = (187.54 \ -8.946)$$

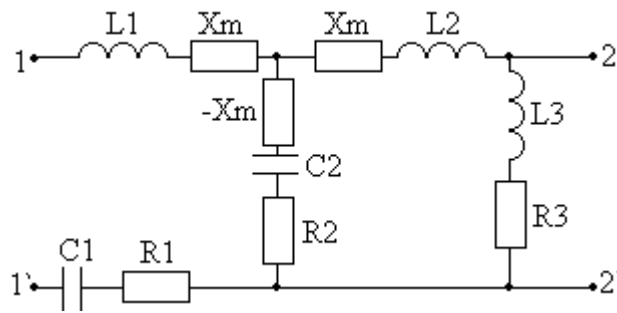
$$F(\phi_d) = (141.744 \ 12.446)$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



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**



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

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

Неробочій хід:

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

$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i + X_M \cdot i \rightarrow 16 + 72 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - X_{C2} \cdot i - X_M \cdot i \rightarrow 14 - 47 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + X_{L2} \cdot i + X_{L3} \cdot i + X_M \cdot i \rightarrow 12 + 125 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 52.927 + 6.835i \quad Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 87.174 + 70.889i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 3.032 + 2.793i \quad F(I_{10}) = (4.122 \quad 42.642)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -0.525 - 2.402i \quad F(I_{30}) = (2.459 \quad -102.336)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 96.987 - 51.414i \quad F(U_{20}) = (109.772 \quad -27.929)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.419 + 1.96i \quad F(A) = (2.004 \quad 77.929)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.012 + 0.035i \quad F(C) = (0.038 \quad 70.571)$$

Коротке замикання:

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

$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} + X_M) \rightarrow 16 + 72 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 14 - 47 \cdot i$$

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

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 82.246 - 11.616i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 1.402 + 2.247i \quad F(I_{1K}) = (2.649 \quad 58.039)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = 0.386 - 3.424i \quad F(I_{3K}) = (3.446 \quad -83.572)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -44.008 + 46.258i \quad F(B) = (63.848 \quad 133.572)$$

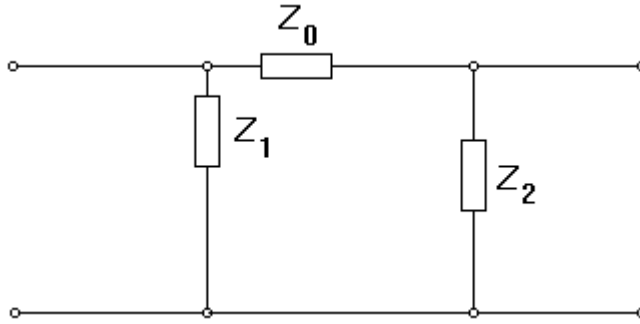
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.602 + 0.477i \quad F(D) = (0.769 \quad 141.611)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (2.004 \quad 77.929) \quad F(B) = (63.848 \quad 133.572)$$

$$F(C) = (0.038 \quad 70.571) \quad F(D) = (0.769 \quad 141.611)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -44.008 + 46.258i \quad F(Z_0) = (63.848 \quad 133.572)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.023 + 0.013i \quad F(Y_1) = (0.026 \quad 29.84)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.029 - 0.015i \quad F(Y_2) = (0.032 \quad -27.063)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -44.008 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 46.258$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 33.122 - 19i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 33.122 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 19$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 27.815 + 14.211i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 27.815 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 14.211$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 8.377 \times 10^{-5} \quad L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 0.023$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.074$$