

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 208*

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; 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.

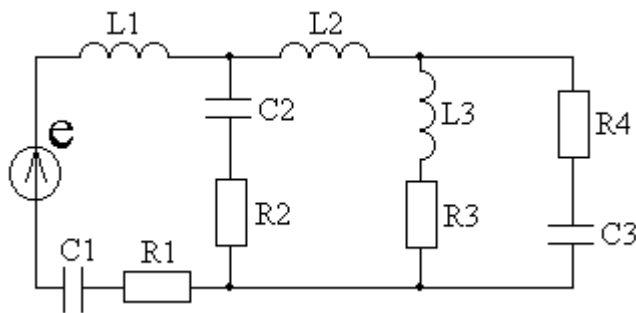
#### 2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ $L_1$ ТА $L_2$ (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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" :

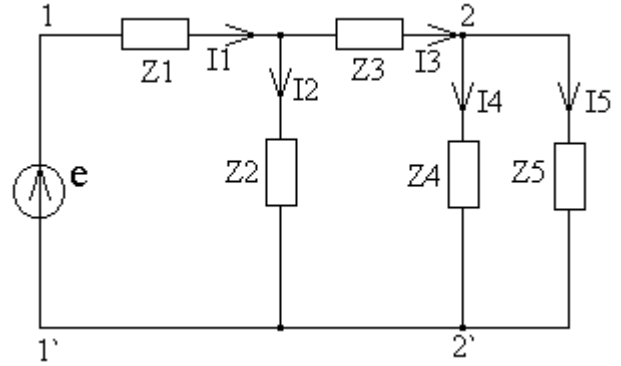
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти А, В, С, D чотириполусника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 120 & \phi &:= -30 & R_1 &:= 7 & R_2 &:= 9 & R_3 &:= 11 & R_4 &:= 13 \\ X_{L1} &:= 37 & X_{L2} &:= 27 & X_{L3} &:= 20 & X_{C1} &:= 13 & X_{C2} &:= 10 & X_{C3} &:= 6 \\ X_M &:= 15 & f &:= 50 \end{aligned}$$



## Символічний метод

$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_1 &= 7 + 24i \\ Z_2 &:= R_2 - X_{C2} \cdot i & Z_2 &= 9 - 10i \\ Z_3 &:= X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 27i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 11 + 20i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 13 - 6i \end{aligned}$$



$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \quad Z_{345} = 11.694 + 28.262i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_{345}}{Z_2 + Z_{345}} + Z_1 \quad Z_E = 20.831 + 18.435i$$

$$E_C = 103.923 - 60i$$

$$F(E_C) = (120 \quad -30)$$

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

$$I_1 = 1.368 - 4.091i$$

$$F(I_1) = (4.314 \quad -71.507)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + Z_2}$$

$$I_2 = 3.356 - 3.405i$$

$$F(I_2) = (4.781 \quad -45.413)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -1.988 - 0.686i$$

$$F(I_3) = (2.103 \quad -160.946)$$

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

$$I_4 = -0.877 + 0.637i$$

$$F(I_4) = (1.084 \quad 144.022)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -1.111 - 1.323i$$

$$F(I_5) = (1.727 \quad -130.014)$$

### Баланс потужностей електричного кола :

$$S_r := E_C \cdot \overline{I_1}$$

$$S_r = 387.671 + 343.066i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 387.671$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot X_{L2} \cdot i + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} \cdot i + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3} \cdot i) \\ Q = 343.066i$$

### Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

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

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

$$\phi_a = -53.185 - 17.788i$$

$$F(\phi_a) = (56.081 \quad -161.507)$$

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

$$\phi_b = -43.607 - 46.426i$$

$$F(\phi_b) = (63.694 \quad -133.206)$$

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

$$\phi_c = -13.403 - 77.069i$$

$$F(\phi_c) = (78.225 \quad -99.866)$$

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

$$\phi_d = -47.45 - 110.628i$$

$$F(\phi_d) = (120.375 \quad -113.215)$$

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

$$\phi_1 = 103.923 - 60i$$

$$F(\phi_1) = (120 \quad -30)$$

$$\phi_A := \phi_1 - E_C$$

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

$$\phi_k := \phi_b + I_4 \cdot R_3$$

$$\phi_k = -53.253 - 39.424i$$

$$F(\phi_k) = (66.258 \quad -143.487)$$

$$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot X_{L3} \cdot i$$

$$\phi_z = -65.985 - 56.962i$$

$$F(\phi_z) = (87.17 \quad -139.197)$$

$$\phi_d := \phi_z + I_3 \cdot X_{L2} \cdot i$$

$$\phi_d = -47.45 - 110.628i$$

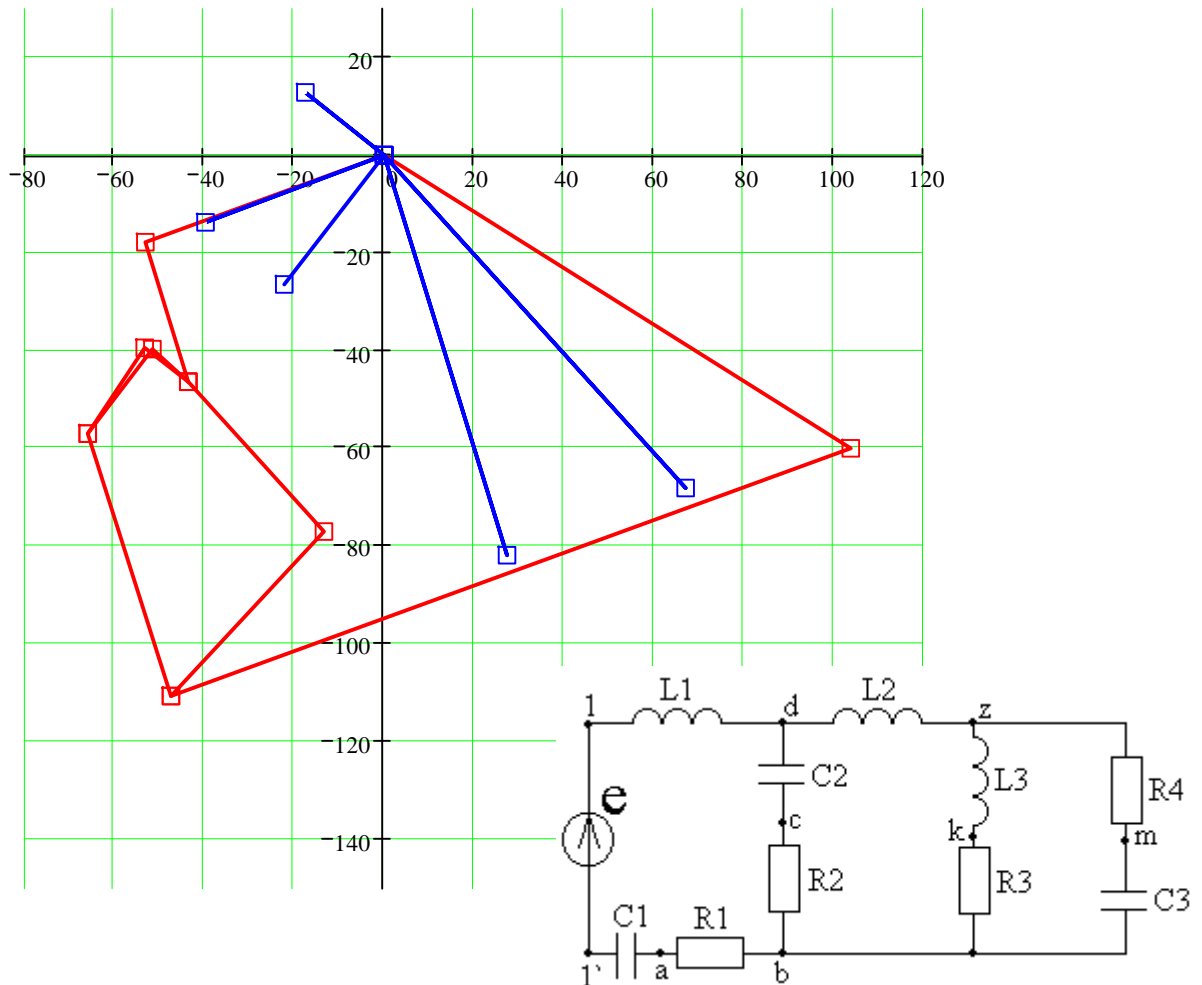
$$F(\phi_d) = (120.375 \quad -113.215)$$

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

$$\phi_m = -51.545 - 39.762i$$

$$F(\phi_m) = (65.099 \quad -142.353)$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



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

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

$$Z_3 = 27i$$

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

$$Z_4 = 11 + 20i$$

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

$$Z_5 = 13 - 6i$$

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

$$Z_E = 11.694 + 28.262i$$

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

$$R_E = 11.694$$

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

$$X_E = 28.262$$

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

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

$$B_2 = -0.03$$

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

$$X_2 = -33.101$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола

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

$$Z_1 = 7 + 24i$$

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

$$Z_3 = 27i$$

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

$$Z_4 = 11 + 20i$$

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

$$Z_5 = 13 - 6i$$

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

$$Z_{345} = 11.694 + 28.262i$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left( \frac{-10909}{386} + \frac{2257}{193} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left( \frac{2257}{193} + \frac{10909}{386} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 7 + 24 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(305452 \cdot X_N + 14432 \cdot X_N^2 + 5055323 + 1769453 \cdot i \cdot X_N + 40346 \cdot i \cdot X_N^2 + 17332536 \cdot i}{(722189 + 43636 \cdot X_N + 772 \cdot X_N^2)}$$

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

$$X_{VX}(X_N) := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(1769453 \cdot X_N + 40346 \cdot X_N^2 + 17332536)}{(722189 + 43636 \cdot X_N + 772 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left( \begin{array}{l} -14.768809191322811704 \\ -29.088153084987107494 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N_0} \\ X_{N_1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці  $X_N = \begin{pmatrix} -14.769 \\ -29.088 \end{pmatrix}$  який носить ємнісний характер ( $X_{N_0} = -14.769$ ). ( $X_{N_1} = -29.088$ )

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = -14.769 \quad Z_{VX}(X_n) = 15.001$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 6.928 - 4i \quad F(I_1) = (8 \quad -30)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 13.425 - 2.747i \quad F(I_2) = (13.703 \quad -11.564)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -6.497 - 1.253i \quad F(I_3) = (6.617 \quad -169.084)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -2.448 + 2.374i \quad F(I_4) = (3.41 \quad 135.884)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -4.049 - 3.627i \quad F(I_5) = (5.436 \quad -138.152)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 959.955$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 959.955$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) Q = 3.126 \times 10^{-13}$$

При  $X_n := X_{N_1} \quad X_n = -29.088 \quad Z_{VX}(X_n) = 78.994$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 1.316 - 0.76i \quad F(I_1) = (1.519 \quad -30)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 2.965 + 2.629i \quad F(I_2) = (3.963 \quad 41.564)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -1.65 - 3.389i \quad F(I_3) = (3.769 \quad -115.957)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -1.918 - 0.304i \quad F(I_4) = (1.942 \quad -170.989)$$

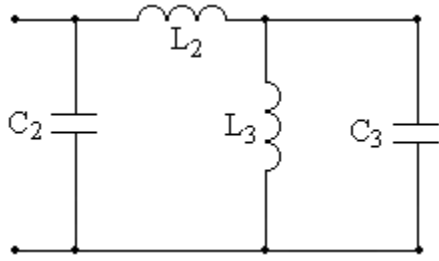
$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = 0.269 - 3.085i \quad F(I_5) = (3.096 \quad -85.025)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 182.293$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 182.293$$

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

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{27}{100 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.086$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{5 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.064$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{1000 \cdot \pi} \quad C_2 = 3.183 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{600 \cdot \pi} \quad C_3 = 5.305 \times 10^{-4}$$

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

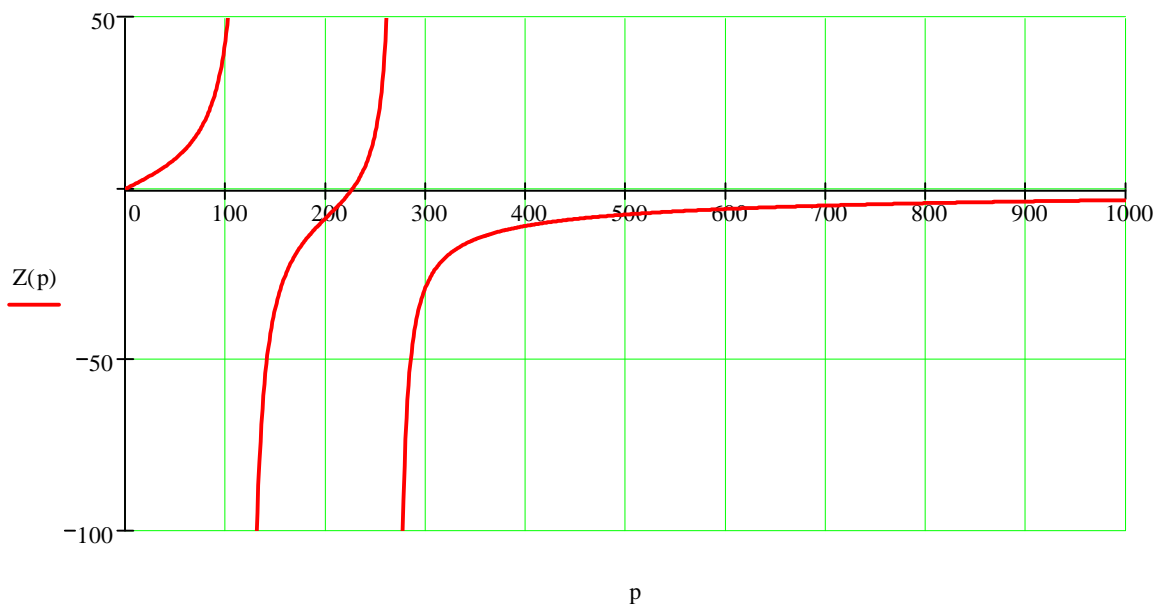
$$\frac{-1}{p \cdot C_2} + \frac{p \cdot L_3 \cdot \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 - \frac{1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2$$

Знаходимо нулі:  $Z(p) = 0$

$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 227. \\ -227. \\ 0 \end{pmatrix}$$

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

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 10} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 270.8083797 \\ 121.4832474 \\ -121.4832474 \\ -270.8083797 \end{pmatrix}$$



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

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

$$Z_4 = 11 + 20i$$

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

$$Z_5 = 13 - 6i$$

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

$$Z_{45} = 11.694 + 1.262i$$

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

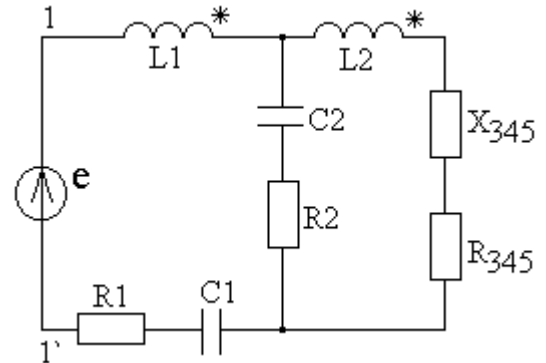
$$Z_{345} = 11.694 + 1.262i$$

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

$$R_{345} = 11.694$$

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

$$X_{345} = 1.262$$



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

$$Z_{11} = 16 + 14i$$

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

$$Z_{22} = 20.694 + 18.262i$$

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

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

$$Z_{12} = 9 - 25i$$

$$U = 103.923 - 60i$$

$$F(U) = (120 \quad -30)$$

Given

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

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

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

$$I_2 := I_1 - I_3$$

$$I_1 = 1.856 - 2.032i$$

$$F(I_1) = (2.752 \quad -47.597)$$

$$I_2 = 4.333 - 1.092i$$

$$F(I_2) = (4.468 \quad -14.15)$$

$$I_3 = -2.477 - 0.94i$$

$$F(I_3) = (2.649 \quad -159.225)$$

Баланс потужностей електричного кола :

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

$$S_r = 314.766 + 99.832i$$

$$P_r := \text{Re}(S_r)$$

$$P_r = 314.766$$

$$Q_r := \text{Im}(S_r)$$

$$Q_r = 99.832$$

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

$$S_{M1} = 101.654 - 40.305i$$

$$F(S_{M1}) = (109.352 \quad -21.628)$$

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

$$S_{M2} = -101.654 - 40.305i$$

$$F(S_{M2}) = (109.352 \quad -158.372)$$

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

$$S_{KC} + (S_{M1} + S_{M2}) = 314.766 + 99.832i$$

## Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

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

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

$$\phi_a = 12.99 - 14.224i$$

$$F(\phi_a) = (19.263 \quad -47.597)$$

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

$$\phi_b = -13.426 - 38.348i$$

$$F(\phi_b) = (40.63 \quad -109.296)$$

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

$$\phi_c = 25.567 - 48.179i$$

$$F(\phi_c) = (54.542 \quad -62.046)$$

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

$$\phi_d = 14.644 - 91.505i$$

$$F(\phi_d) = (92.669 \quad -80.908)$$

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

$$\phi_1 = 89.828 - 22.845i$$

$$F(\phi_1) = (92.688 \quad -14.269)$$

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

$$\phi_{1'} = 103.923 - 60i$$

$$F(\phi_{1'}) = (120 \quad -30)$$

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

$$\phi_A = -7.105i \times 10^{-15}$$

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

$$\phi_e = -42.393 - 49.336i$$

$$F(\phi_e) = (65.048 \quad -130.671)$$

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

$$\phi_k = -41.207 - 52.461i$$

$$F(\phi_k) = (66.71 \quad -128.149)$$

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

$$\phi_{d'} = -15.836 - 119.34i$$

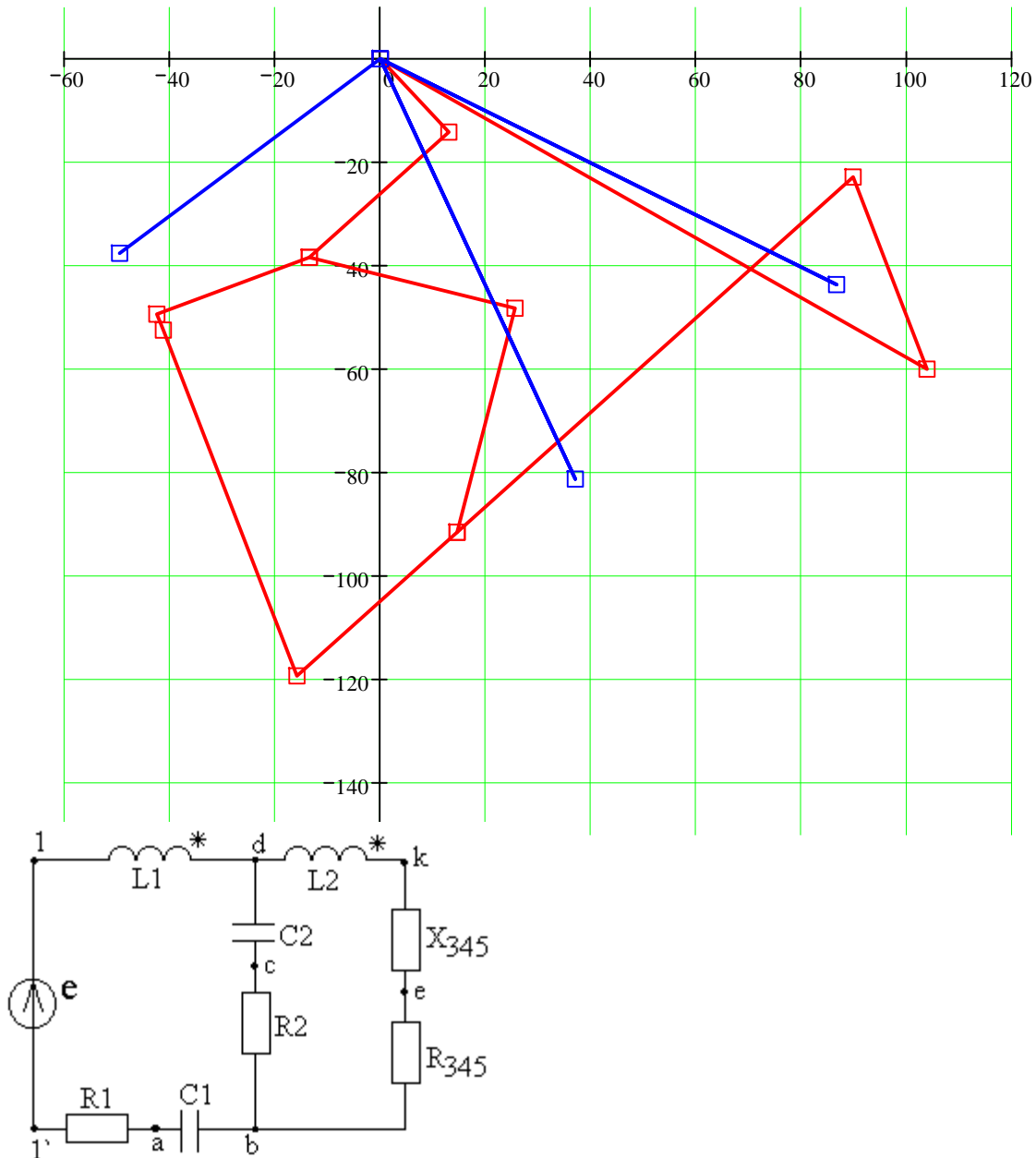
$$F(\phi_{d'}) = (120.386 \quad -97.559)$$

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

$$\phi_d = 14.644 - 91.505i$$

$$F(\phi_d) = (92.669 \quad -80.908)$$

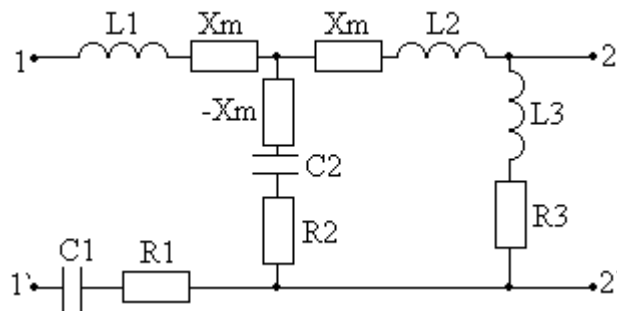
Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:





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

1) Розрахувати коефіцієнти чотириполосника **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:

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

$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i + X_M \cdot i \rightarrow 7 + 39 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - X_{C2} \cdot i - X_M \cdot i \rightarrow 9 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + X_{L2} \cdot i + X_{L3} \cdot i + X_M \cdot i \rightarrow 11 + 62 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 31.562 + 7.709i \quad Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 53.195 + 36.08i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 2.669 - 2.553i \quad F(I_{10}) = (3.693 \quad -43.726)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = -2.326 - 0.182i \quad F(I_{30}) = (2.333 \quad -175.534)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = -21.955 - 48.522i \quad F(U_{20}) = (53.258 \quad -114.345)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.222 + 2.242i \quad F(A) = (2.253 \quad 84.345)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.023 + 0.065i \quad F(C) = (0.069 \quad 70.619)$$

Коротке замикання:

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

$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} + X_M) \rightarrow 7 + 39 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 9 - 25 \cdot i$$

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

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 49.908 - 0.049i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 2.083 - 1.2i \quad F(I_{1K}) = (2.404 \quad -29.944)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -3.163 - 1.013i \quad F(I_{3K}) = (3.321 \quad -162.248)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -24.292 + 26.745i \quad F(B) = (36.13 \quad 132.248)$$

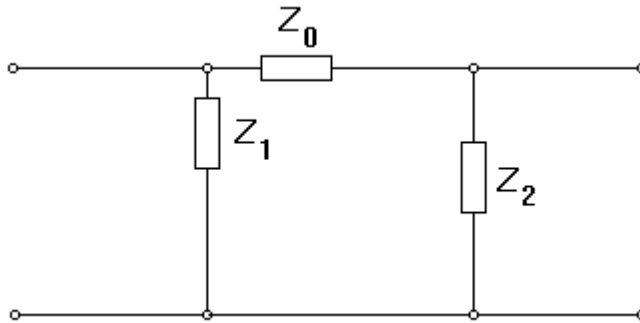
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.487 + 0.535i \quad F(D) = (0.724 \quad 132.304)$$

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

$$F(A) = (2.253 \quad 84.345) \quad F(B) = (36.13 \quad 132.248)$$

$$F(C) = (0.069 \quad 70.619) \quad F(D) = (0.724 \quad 132.304)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -24.292 + 26.745i \quad F(Z_0) = (36.13 \quad 132.248)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.039 + 0.021i \quad F(Y_1) = (0.044 \quad 27.953)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.06 - 0.026i \quad F(Y_2) = (0.066 \quad -23.113)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -24.292 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 26.745$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 20.19 - 10.714i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 20.19 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 10.714$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 14.001 + 5.976i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 14.001 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 5.976$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 2.971 \times 10^{-4} \quad L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 0.019$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.085$$