

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 151*

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;
- 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;
- 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  $A, B, C, D$  чотириполусника;
- 3.2. Розрахувати параметри  $R, L, C$  віток схеми заміщення.

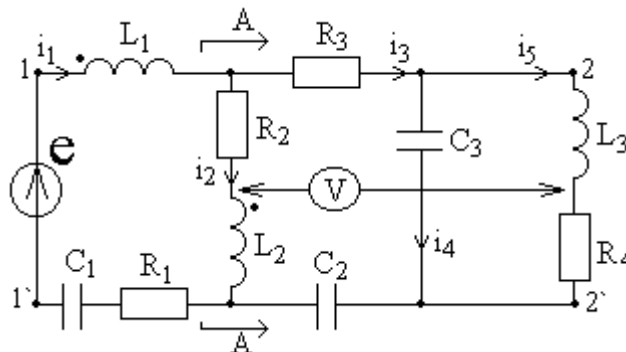
$$E := 100 \quad \psi := -20 \quad R_1 := 5 \quad R_2 := 7 \quad R_3 := 9 \quad R_4 := 12 \quad X_{L1} := 50 \quad X_{L2} := 40 \quad X_{L3} := 35$$

$$X_{C1} := 20 \quad X_{C2} := 15 \quad X_{C3} := 12 \quad X_M := 30 \quad f := 100$$

$$U := E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}}$$

$$U = 93.969 - 34.202i$$

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



## Символічний метод

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

$$Z_1 = 5 + 30i$$

$$Z_2 := R_2 + X_{L2} \cdot i$$

$$Z_2 = 7 + 40i$$

$$Z_3 := R_3 - X_{C2} \cdot i$$

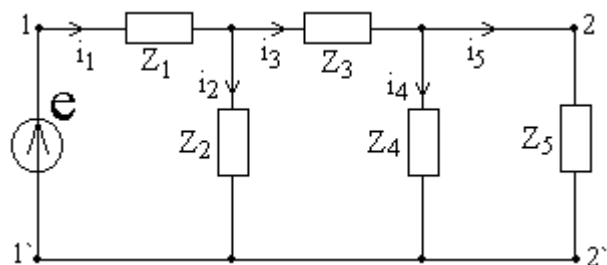
$$Z_3 = 9 - 15i$$

$$Z_4 := -X_{C3} \cdot i$$

$$Z_4 = -12i$$

$$Z_5 := R_4 + X_{L3} \cdot i$$

$$Z_5 = 12 + 35i$$



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

$$Z_{345} = 11.568 - 31.921i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_{345}}{Z_2 + Z_{345}} + Z_1$$

$$Z_E = 71.202 + 14.081i$$

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

$$I_1 = 1.179 - 0.713i$$

$$F(I_1) = (1.378 \quad -31.187)$$

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

$$I_2 = -1.318 - 1.897i$$

$$F(I_2) = (2.31 \quad -124.781)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 2.496 + 1.184i$$

$$F(I_3) = (2.763 \quad 25.373)$$

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

$$I_4 = 3.267 + 2.204i$$

$$F(I_4) = (3.941 \quad 34.002)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -0.77 - 1.02i$$

$$F(I_5) = (1.278 \quad -127.074)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

$$I_2 + I_4 + I_5 - I_1 = 0$$

### Баланс потужностей електричного кола :

$$S_r := U \cdot I_1$$

$$S_r = 135.159 + 26.729i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 135.159$$

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

$$Q = 26.729i$$

Знаходимо покази вольтметра:  $V := |-I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_5 \cdot i \cdot X_{L3}|$

$$V = 67.451$$

$$V := |I_2 \cdot i \cdot X_{L2} - I_3 \cdot (-j \cdot X_{C2}) - I_5 \cdot R_4|$$

$$V = 67.451$$

### Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -14.269 - 23.573i$$

$$F(\phi_b) = (27.555 \quad -121.187)$$

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

$$\phi_c = -8.376 - 27.14i$$

$$F(\phi_c) = (28.403 \quad -107.15)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot X_{L2} \cdot i$$

$$\phi_d = 67.522 - 79.853i$$

$$F(\phi_d) = (104.574 \quad -49.783)$$

$$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot R_2$$

$$\phi_e = 58.297 - 93.135i$$

$$F(\phi_e) = (109.876 \quad -57.956)$$

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

$$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$$

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

$$\phi_A := \phi_1 - U$$

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

$$F(\phi_A) = (7.105 \times 10^{-15} \quad -90)$$

$$\phi_k := \phi_c + I_3 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$$

$$\phi_k = 9.384 - 64.587i$$

$$F(\phi_k) = (65.266 \quad -81.733)$$

$$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$$

$$\phi_z = 35.829 - 103.791i$$

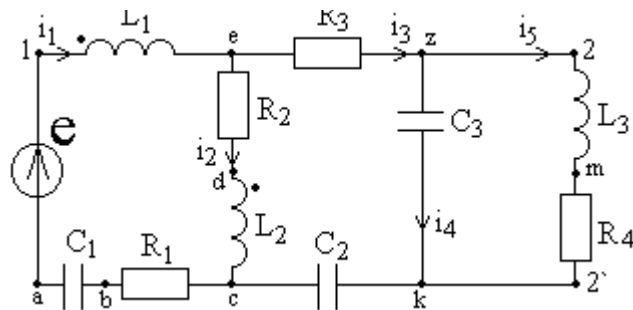
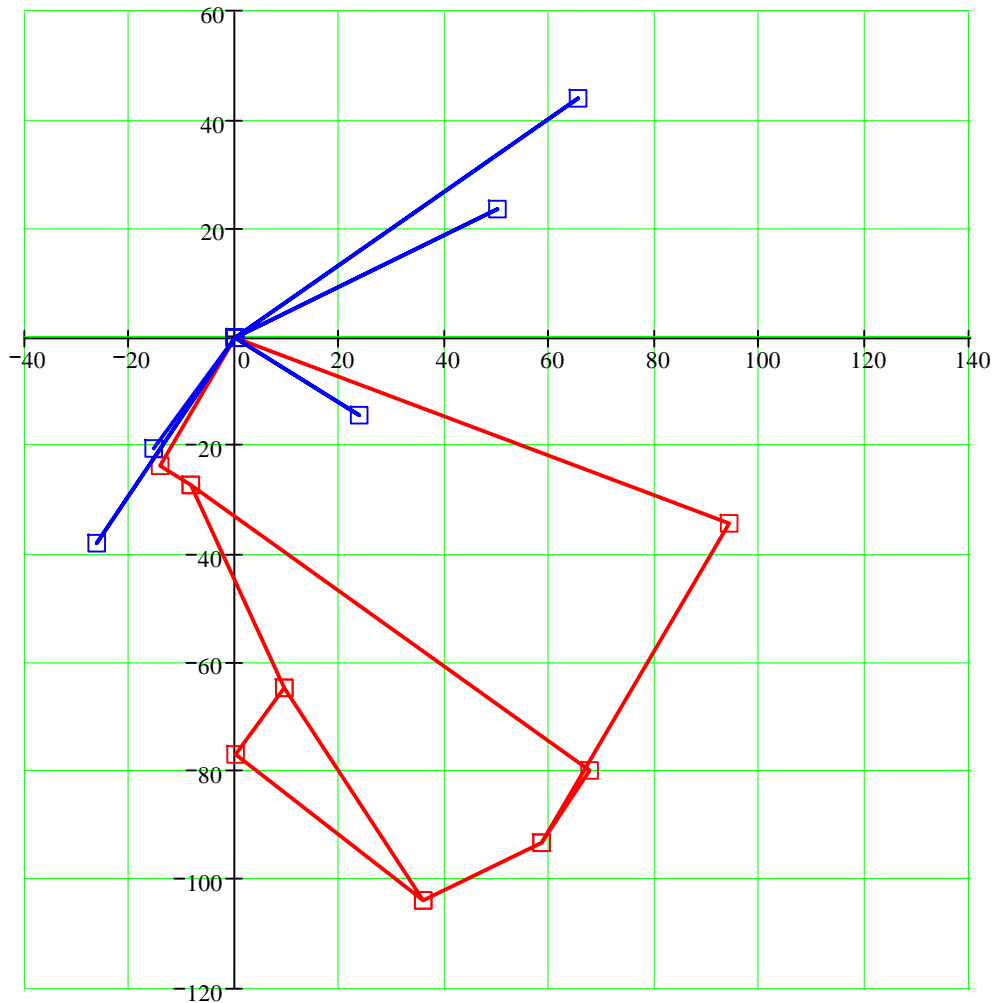
$$F(\phi_z) = (109.801 \quad -70.955)$$

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

$$\phi_m = 0.139 - 76.824i$$

$$F(\phi_m) = (76.824 \quad -89.897)$$

**Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:**



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

$$Z_3 := -X_{C2} \cdot i$$

$$Z_3 = -15i$$

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

$$Z_4 = 9 + 35i$$

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

$$Z_5 = 12 - 12i$$

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

$$Z_E = 18.829 - 20.765i$$

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

$$R_E = 18.829$$

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

$$X_E = -20.765$$

Умова резонансу струмів на ділянці "ab" :

$$B_{ab} = B_2 + B_E \quad B_{ab} := 0 \quad B_2 = -B_E$$

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

$$B_2 = 0.026$$

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

$$X_2 = 37.838$$

Додатний знак свідчить про індуктивний характер опору

**Розрахувати струми для резонансного стану кола;**

$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_1 &= 5 + 30i \\ Z_3 &:= R_3 - X_{C2} \cdot i & Z_3 &= 9 - 15i \\ Z_4 &:= -X_{C3} \cdot i & Z_4 &= -12i \\ Z_5 &:= R_4 + X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 12 + 35i \end{aligned}$$

$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \quad Z_{345} = 11.568 - 31.921i$$

Вхідний опір кола:

$$\begin{aligned} Z_{VX}(X_N) &:= \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left( \frac{21483}{673} + \frac{7785}{673} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left( \frac{7785}{673} - \frac{21483}{673} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 5 + 30 \cdot i \\ Z_{VX}(X_N) &\left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-\left( 214830 \cdot X_N - 11150 \cdot X_N^2 - 3879090 + 513162 \cdot i \cdot X_N + 1293 \cdot i \cdot X_N^2 - 23274540 \cdot i \right)}{\left( 775818 - 42966 \cdot X_N + 673 \cdot X_N^2 \right)} \end{aligned}$$

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

$$X_{VX}(X_N) := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -3 \cdot \frac{\left( 171054 \cdot X_N + 431 \cdot X_N^2 - 7758180 \right)}{\left( 775818 - 42966 \cdot X_N + 673 \cdot X_N^2 \right)}$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, } 50 \end{array} \right. \rightarrow \left( \begin{array}{l} 41.09908510098805452921684176299795197900745002777 \\ -437.97611526340104756865999721543414687459909735955 \end{array} \right)$$

Отже резонанс кола неможливий при будь-яких опорах у другій вітці, так як:  $X_N = \left( \begin{array}{l} 41.099 \\ -437.976 \end{array} \right)$

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = 41.099 \quad Z_{VX}(X_n) = 94.612$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 0.993 - 0.361i \quad F(I_1) = (1.057 \quad -20)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = -1.513 - 1.902i \quad F(I_2) = (2.43 \quad -128.509)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 2.506 + 1.54i \quad F(I_3) = (2.942 \quad 31.571)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = 3.205 + 2.708i \quad F(I_4) = (4.196 \quad 40.199)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -0.698 - 1.168i \quad F(I_5) = (1.361 \quad -120.876)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 105.695$$

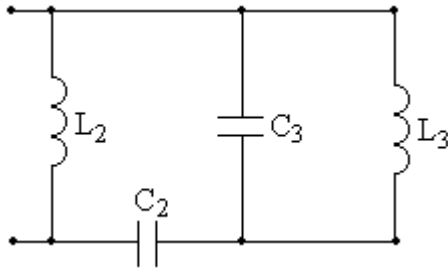
$$P := \left( |I_1| \right)^2 \cdot R_1 + \left( |I_3| \right)^2 \cdot R_3 + \left( |I_5| \right)^2 \cdot R_4 \quad P = 105.695$$

$$Q := \left( |I_1| \right)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + \left( |I_2| \right)^2 \cdot X_n + \left( |I_3| \right)^2 \cdot (-X_{C2}) + \left( |I_4| \right)^2 \cdot (-X_{C3}) + \left( |I_5| \right)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = -2.842 \times 10^{-14}$$

$$\begin{array}{lll}
\text{При} & X_n := X_{N_1} & X_n = -437.976 \quad Z_{VX}(X_n) = 15.043 \\
I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} & I_1 = 6.247 - 2.274i & F(I_1) = (6.647 \quad -20) \\
I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 = 0.48 - 0.012i & F(I_2) = (0.48 \quad -1.491) \\
I_3 := I_1 - I_2 & I_3 = 5.767 - 2.261i & F(I_3) = (6.194 \quad -21.41) \\
I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 = 8.615 - 1.955i & F(I_4) = (8.834 \quad -12.782) \\
I_5 := I_3 - I_4 & I_5 = -2.849 - 0.307i & F(I_5) = (2.865 \quad -173.857) \\
S_1 := U \cdot \overline{I_1} & S_1 = 664.749 & \\
P := \left( |I_1| \right)^2 \cdot R_1 + \left( |I_3| \right)^2 \cdot R_3 + \left( |I_5| \right)^2 \cdot R_4 & P = 664.749 & \\
Q := \left( |I_1| \right)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + \left( |I_2| \right)^2 \cdot X_n + \left( |I_3| \right)^2 \cdot (-X_{C2}) + \left( |I_4| \right)^2 \cdot (-X_{C3}) + \left( |I_5| \right)^2 \cdot X_{L3} & Q = -5.684 \times 10^{-14} &
\end{array}$$

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

**закоротити**



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

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega}$$

$$L_3 = 0.056$$

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

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

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

$$C_3 = 1.326 \times 10^{-4}$$

$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega}$$

$$L_2 = 0.064$$

Знаходимо нулі:  $Z(p) = 0$

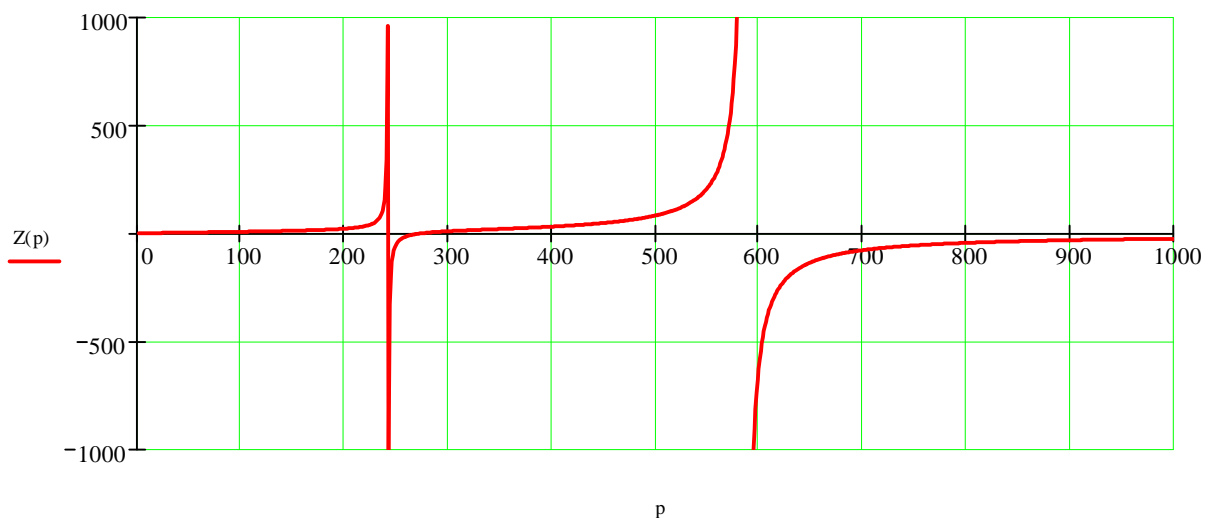
$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 273. \\ -273. \end{pmatrix}$$

$$w_1 := \begin{pmatrix} w_{10} \\ w_{11} \end{pmatrix} \quad w_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 273 \end{pmatrix}$$

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

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 586.0864895 \\ -586.0864895 \\ 241.5295442 \\ -241.5295442 \end{pmatrix}$$

$$w := \begin{pmatrix} w_0 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad w = \begin{pmatrix} 586.086 \\ 241.53 \end{pmatrix}$$



## 2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 T/ L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

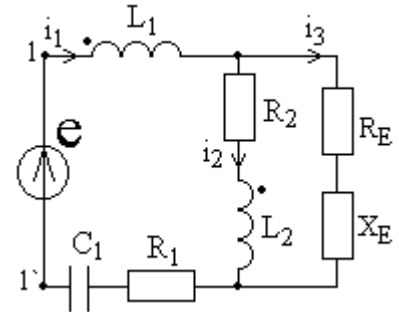
2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів, визначити покази вольметра;

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).

Спростимо схему до двох незалежних контурів

$$\begin{aligned} Z_3 &:= R_3 - X_{C2} \cdot i & Z_3 &= 9 - 15i \\ Z_4 &:= -X_{C3} \cdot i & Z_4 &= -12i \\ Z_5 &:= R_4 + X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 12 + 35i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 & Z_{345} &= 11.568 - 31.921i \end{aligned}$$



$$R_E := \operatorname{Re}(Z_{345}) \quad R_E = 11.568 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_{345}) \quad X_E = -31.921$$

Знайдемо контурні та міжконтурні опори схеми:

$$\begin{aligned} Z_{11} &:= R_1 + R_2 + X_{L2} \cdot i + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i + 2 \cdot X_M \cdot i & Z_{11} &= 12 + 130i \\ Z_{22} &:= R_E + X_E \cdot i + X_{L2} \cdot i + R_2 & Z_{22} &= 18.568 + 8.079i \\ Z_{12} &:= R_2 + X_{L2} \cdot i + X_M \cdot i & Z_{21} &:= Z_{12} & Z_{12} &= 7 + 70i \\ U &= 93.969 - 34.202i & F(U) &= (100 \quad -20) \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned} I_1 \cdot (Z_{11}) - I_3 \cdot (Z_{12}) &= U \\ -I_1 \cdot (Z_{21}) + I_3 \cdot (Z_{22}) &= 0 \\ \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} &:= \operatorname{Find}(I_1, I_3) & I_2 &:= I_1 - I_3 & I_1 &= 0.449 - 0.14i & F(I_1) &= (0.47 \quad -17.315) \\ & & I_2 &= -0.737 - 1.264i & I_2 &= -0.737 - 1.264i & F(I_2) &= (1.463 \quad -120.247) \\ & & I_3 &= 1.186 + 1.124i & I_3 &= 1.186 + 1.124i & F(I_3) &= (1.634 \quad 43.461) \\ I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 &= 1.432 + 1.839i & I_4 &= 1.432 + 1.839i & F(I_4) &= (2.331 \quad 52.089) \\ I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 &= -0.246 - 0.715i & I_5 &= -0.246 - 0.715i & F(I_5) &= (0.756 \quad -108.987) \end{aligned}$$

### Баланс потужностей електричного кола :

$$\begin{aligned} S_r &:= U \cdot \overline{I_1} & S_r &= 46.985 - 2.203i \\ P_r &:= \operatorname{Re}(S_r) & P_r &= 46.985 & Q_r &:= \operatorname{Im}(S_r) & Q_r &= -2.203 \\ S_{M1} &:= \overline{I_1} \cdot I_2 \cdot X_M \cdot i & S_{M1} &= 20.125 - 4.621i & F(S_{M1}) &= (20.648 \quad -12.932) \\ S_{M2} &:= \overline{I_2} \cdot I_1 \cdot X_M \cdot i & S_{M2} &= -20.125 - 4.621i & F(S_{M2}) &= (20.648 \quad -167.068) \\ S_{KC} &:= (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i + R_1 - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (R_2 + X_{L2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot (R_E + X_E \cdot i) + S_{M1} + S_{M2} \\ S_{KC} &= 46.985 - 2.203i \end{aligned}$$

Знаходимо покази вольметра:

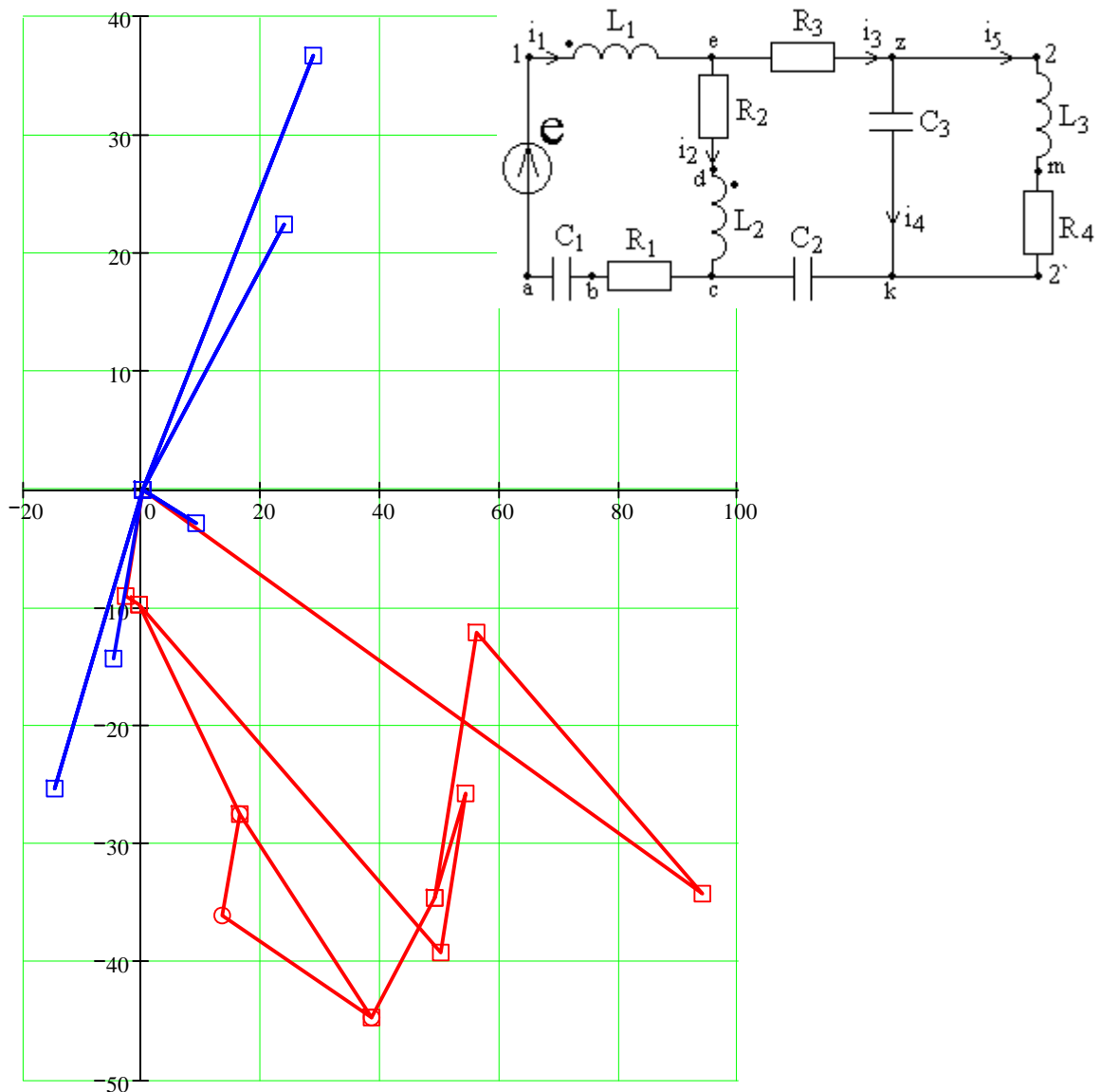
$$\begin{aligned} V &:= \left| -I_2 \cdot (R_2 + X_M \cdot i) + I_3 \cdot (R_3 - X_{C2} \cdot i) + I_5 \cdot (X_{L3} \cdot i) \right| & V &= 36.785 \\ V &:= \left| I_2 \cdot i \cdot (X_{L2}) - I_3 \cdot [-i \cdot (X_{C2})] - I_5 \cdot (R_4) \right| & V &= 36.785 \end{aligned}$$



**Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:**

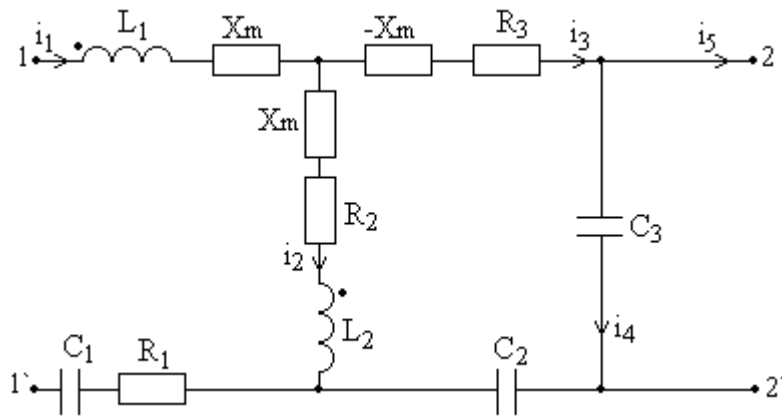
$\phi_a := 0$			
$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$	$\phi_b = -2.8 - 8.981i$	$F(\phi_b) = (9.407 \quad -107.315)$	
$\phi_c := \phi_b + I_1 \cdot R_1$	$\phi_c = -0.555 - 9.681i$	$F(\phi_c) = (9.697 \quad -93.279)$	
$\phi_{d'} := \phi_c + I_2 \cdot X_{L2} \cdot i$	$\phi_{d'} = 50.008 - 39.165i$	$F(\phi_{d'}) = (63.519 \quad -38.067)$	
$\phi_d := \phi_{d'} + I_1 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_d = 54.208 - 25.693i$	$F(\phi_d) = (59.988 \quad -25.36)$	
$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot R_2$	$\phi_e = 49.048 - 34.542i$	$F(\phi_e) = (59.99 \quad -35.155)$	
$\phi_{1'} := \phi_e + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$	$\phi_{1'} = 56.048 - 12.089i$	$F(\phi_{1'}) = (57.336 \quad -12.172)$	
$\phi_1 := \phi_{1'} + I_2 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$	$F(\phi_1) = (100 \quad -20)$	
$\phi_A := \phi_1 - U$	$\phi_A = 1.421 \times 10^{-14}$	$F(\phi_A) = (1.421 \times 10^{-14} \quad 0)$	
$\phi_k := \phi_c + I_3 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$	$\phi_k = 16.306 - 27.473i$	$F(\phi_k) = (31.948 \quad -59.309)$	
$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$	$\phi_z = 38.372 - 44.658i$	$F(\phi_z) = (58.88 \quad -49.329)$	
$\phi_e := \phi_z + I_3 \cdot R_3$	$\phi_e = 49.048 - 34.542i$	$F(\phi_e) = (59.99 \quad -35.155)$	
$\phi_m := \phi_k + I_5 \cdot R_4$	$\phi_m = 13.355 - 36.051i$	$F(\phi_m) = (38.445 \quad -69.673)$	
$\phi_z := \phi_m + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$	$\phi_z = 38.372 - 44.658i$	$F(\phi_z) = (58.88 \quad -49.329)$	

**Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:**



ВІДКИНУВШИ ВІТКУ МІЖ ЗАТИСКАЧАМИ 2-2", ВИКОНАТИ ЕКВІВАЛЕНТУВАННЯ  
ВЗАЄМОІНДУКТИВНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ВІТОК. ОДЕРЖАНУ СХЕМУ РОЗГЛЯДАТИ ЯК  
ЧОТИРИПОЛЮСНИК З ЗАТИСКАЧАМИ 1-1" ТА 2-2" :

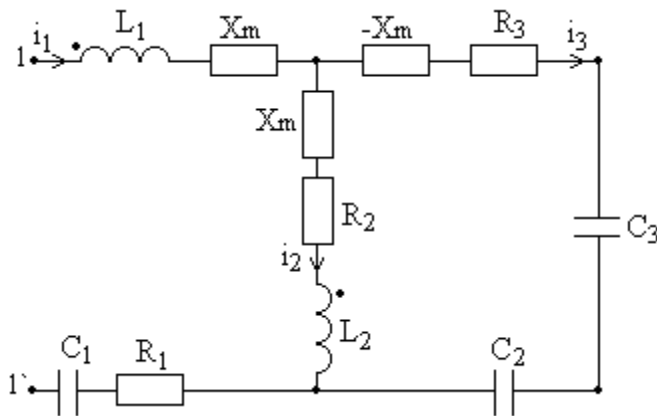
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполосника **A, B, C, D**



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

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

Неробочий хід:  $I_2 = 0$   $U_{10} := U$



$$Z_1 := R_1 + j \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \quad Z_1 = 5 + 60i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 7 + 70i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C3} + X_{C2}) \quad Z_3 = 9 - 57i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 164.649 - 55.278i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 11.941 - 24.69i$$

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

$$I_{10} = 0.576 - 0.014i$$

$$F(I_{10}) = (0.576 \quad -1.442)$$

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

$$I_{30} = 1.419 + 1.359i$$

$$F(I_{30}) = (1.965 \quad 43.754)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (-X_{C3} \cdot i)$$

$$U_{20} = 16.305 - 17.03i$$

$$F(U_{20}) = (23.577 \quad -46.246)$$

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

$$A = 3.804 + 1.876i$$

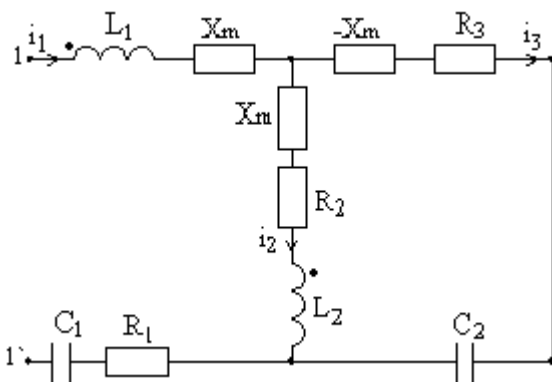
$$F(A) = (4.241 \quad 26.246)$$

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

$$C = 0.017 + 0.017i$$

$$F(C) = (0.024 \quad 44.804)$$

Коротке замикання:  $U_2 = 0$   $U_K := U$



$$Z_1 = 5 + 60i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 7 + 70i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C2}) \quad Z_3 = 9 - 45i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 72.291 - 25.454i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K}$$

$$I_{1K} = 1.305 - 0.014i$$

$$F(I_{1K}) = (1.305 \quad -0.602)$$

$$I_{2K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

$$I_{2K} = 2.772 + 1.37i$$

$$F(I_{2K}) = (3.093 \quad 26.306)$$

$$B := \frac{U}{I_{2K}}$$

$$B = 22.338 - 23.38i$$

$$F(B) = (32.336 \quad -46.306)$$

$$D := \frac{I_{1K}}{I_{2K}}$$

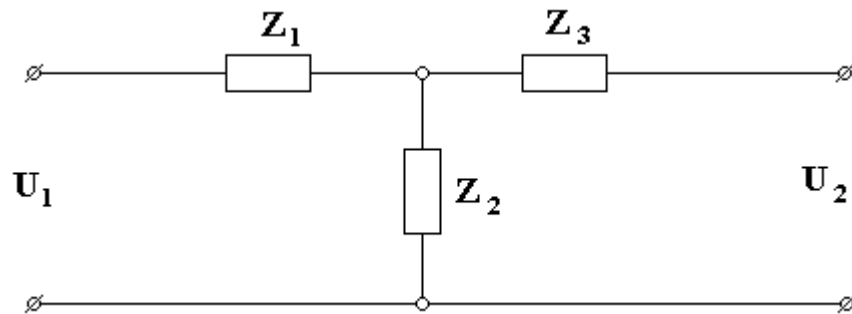
$$D = 0.376 - 0.191i$$

$$F(D) = (0.422 \quad -26.909)$$

### Перевірка

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

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



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

$$Z_1 = 135.595 - 26.421i$$

$$F(Z_1) = (138.145 \quad -11.026)$$

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

$$Z_2 = 7 + 70i$$

$$F(Z_2) = (70.349 \quad 84.289)$$

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

$$Z_3 = -23.633 + 12.452i$$

$$F(Z_3) = (26.713 \quad 152.216)$$

$$R_1 := \operatorname{Re}(Z_1)$$

$$R_1 = 135.595$$

$$X_1 := \operatorname{Im}(Z_1)$$

$$X_1 = -26.421$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(Z_2)$$

$$R_2 = 29.054$$

$$X_2 := \operatorname{Im}(Z_2)$$

$$X_2 = -28.856$$

$$R_3 := \operatorname{Re}(Z_3)$$

$$R_3 = -23.633$$

$$X_3 := \operatorname{Im}(Z_3)$$

$$X_3 = 12.452$$

$$C_1 := -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_1}$$

$$C_2 := -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_2}$$

$$L_3 := \frac{X_3}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$C_1 = 6.024 \times 10^{-5}$$

$$C_2 = 5.515 \times 10^{-5}$$

$$L_3 = 0.02$$