

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

***Розрахунково-графічна робота***

*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*

*Варіант № 670*

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 замкнути.

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

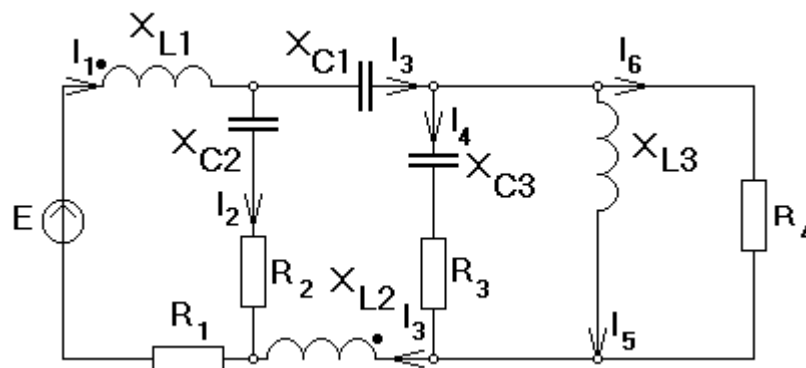
- 2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів;
- 2.2. Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;
- 2.3. Побудувати сумісну векторну діаграму струмів 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" :

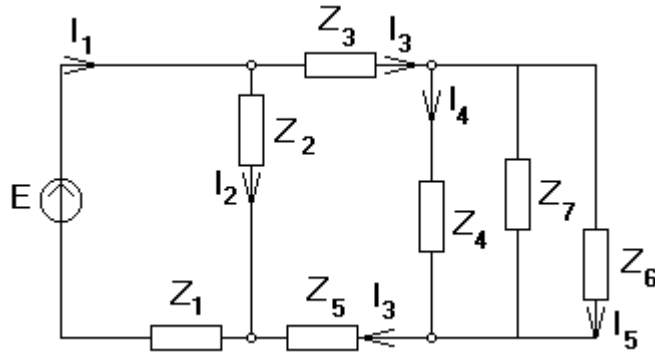
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  чотиріполусника;
- 3.2. Розрахувати параметри  $R$ ,  $L$ ,  $C$  віток схеми заміщення.

#### **Вихідні данні:**

$$\begin{aligned} E &:= 200 & \phi &:= 35 & R_1 &:= 14 & R_2 &:= 12 & R_3 &:= 10 & R_4 &:= 8 \\ X_{L1} &:= 55 & X_{L2} &:= 45 & X_{L3} &:= 30 & X_{C1} &:= 17 & X_{C2} &:= 13 & X_{C3} &:= 10 \\ X_M &:= 22 & f &:= 60 \\ E_C &= 163.83 + 114.715i & F(E_C) &= (200 \ 35) \end{aligned}$$



Розрахувати всі струми символьним методом.



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} \rightarrow 14 + 55 \cdot i \quad Z_2 := R_2 - i \cdot X_{C2} \rightarrow 12 - 13 \cdot i \quad Z_3 := -i \cdot X_{C1} \rightarrow -17 \cdot i$$

$$Z_4 := R_3 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 10 - 10 \cdot i \quad Z_5 := i \cdot X_{L2} \rightarrow 45 \cdot i \quad Z_6 := i \cdot X_{L3} \rightarrow 30 \cdot i$$

$$Z_7 := R_4 \rightarrow 8$$

$$Z_E := \left( \frac{\frac{Z_7 \cdot Z_6}{Z_7 + Z_6} \cdot Z_4}{Z_4 + \frac{Z_7 \cdot Z_6}{Z_7 + Z_6}} + Z_3 + Z_5 \right) \cdot Z_2 + Z_1 \quad Z_E = 35.506 + 51.882i$$

$$I_1 := \frac{E_C}{Z_E} \quad I_1 = 2.978 - 1.12i \quad F(I_1) = (3.181 \quad -20.614)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \left( \frac{\frac{Z_7 \cdot Z_6}{Z_7 + Z_6} \cdot Z_4}{Z_4 + \frac{Z_7 \cdot Z_6}{Z_7 + Z_6}} + Z_3 + Z_5 \right) \quad F(I_2) = (3.908 \quad 18.427)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -0.73 - 2.355i \quad F(I_3) = (2.466 \quad -107.212)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{\left( \frac{Z_7 \cdot Z_6}{Z_7 + Z_6} \right)}{Z_4 + \frac{Z_7 \cdot Z_6}{Z_7 + Z_6}} \quad I_4 = 0.377 - 0.917i \quad F(I_4) = (0.992 \quad -67.652)$$

$$I_5 := \frac{I_4 \cdot Z_4}{i \cdot X_{L3}} \quad I_5 = -0.431 + 0.18i \quad F(I_5) = (0.468 \quad 157.348)$$

$$I_6 := \frac{I_4 \cdot Z_4}{R_4} \quad I_6 = -0.675 - 1.618i \quad F(I_6) = (1.753 \quad -112.652)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_3 - I_4 - I_5 - I_6 = 0$$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_{L1}) + E_C - I_2 \cdot (R_2 - j \cdot X_{C2}) = 1.421i \times 10^{-14}$$

$$-I_2 \cdot (R_2 - j \cdot X_{C2}) + I_3 \cdot [j \cdot (X_{L2} - X_{C1})] + I_4 \cdot (R_3 - j \cdot X_{C3}) = 8.438 \times 10^{-15} + 1.776i \times 10^{-14}$$

$$I_4 \cdot (R_3 - j \cdot X_{C3}) - I_6 \cdot R_4 = 0$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S = 359.335 + 525.07i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_6|)^2 \cdot R_4$$

$$P = 359.335$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot X_{L1} + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = 525.07$$

## Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

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

$$F(\phi_b) = (44.538 \quad -20.614)$$

$$\phi_b = 41.686 - 15.68i$$

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

$$F(\phi_c) = (86.176 \quad -0.571)$$

$$\phi_c = 86.172 - 0.859i$$

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

$$F(\phi_d) = (113.388 \quad -25.633)$$

$$\phi_d = 102.229 - 49.052i$$

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

$$F(\phi_1) = (200 \quad 35)$$

$$\phi_1 = 163.83 + 114.715i$$

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

$$F(\phi_A) = (2.842 \times 10^{-14} \quad -90)$$

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

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

$$F(\phi_e) = (155.432 \quad -18.186)$$

$$\phi_e = 147.668 - 48.511i$$

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

$$F(\phi_k) = (162.053 \quad -20.852)$$

$$\phi_k = 151.439 - 57.684i$$

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

$$F(\phi_m) = (154.972 \quad -23.363)$$

$$\phi_m = 142.266 - 61.455i$$

$$\phi_{m'} := \phi_e + I_5 \cdot (X_{L3} \cdot i)$$

$$F(\phi_{m'}) = (154.972 \quad -23.363)$$

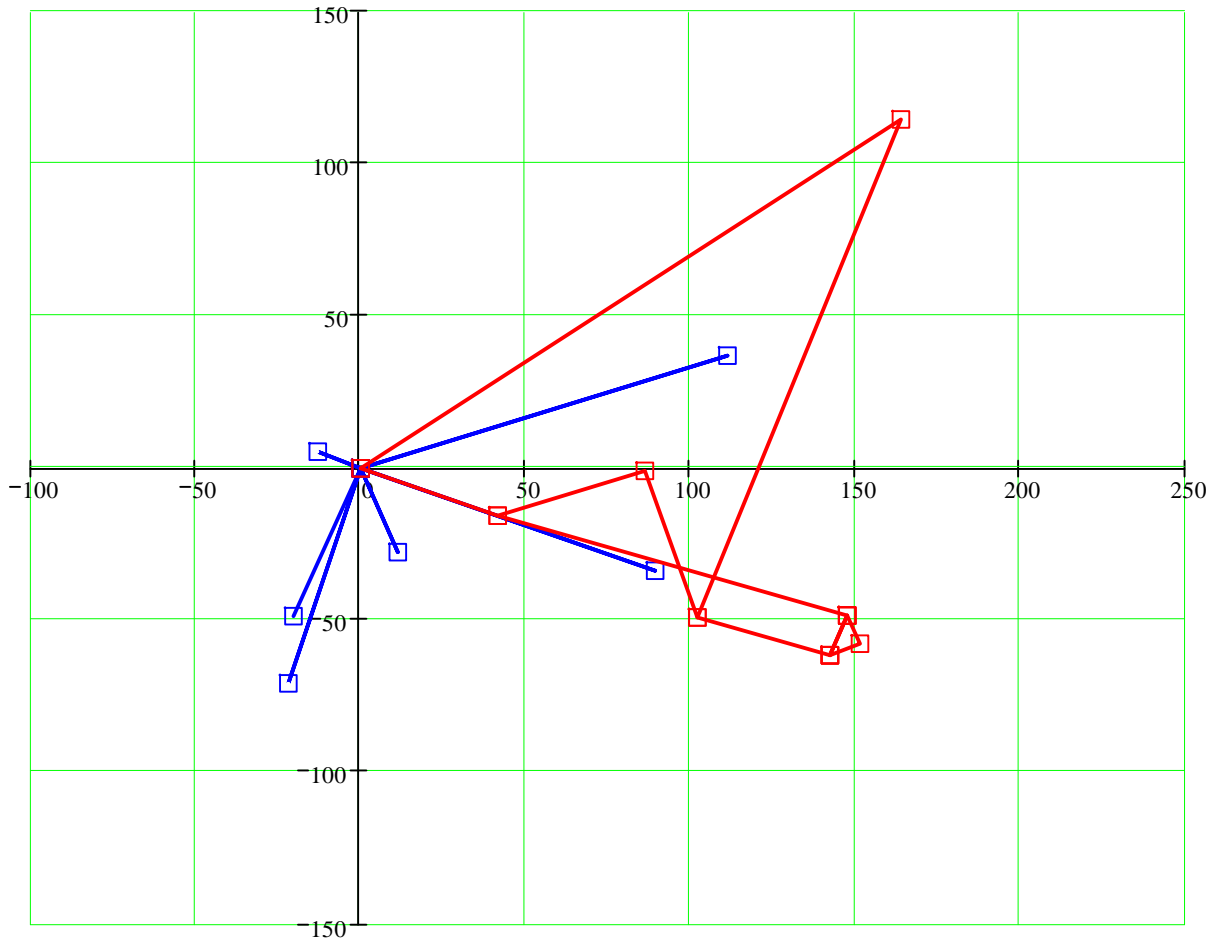
$$\phi_{m'} = 142.266 - 61.455i$$

$$\phi_{m''} := \phi_e + I_6 \cdot R_4$$

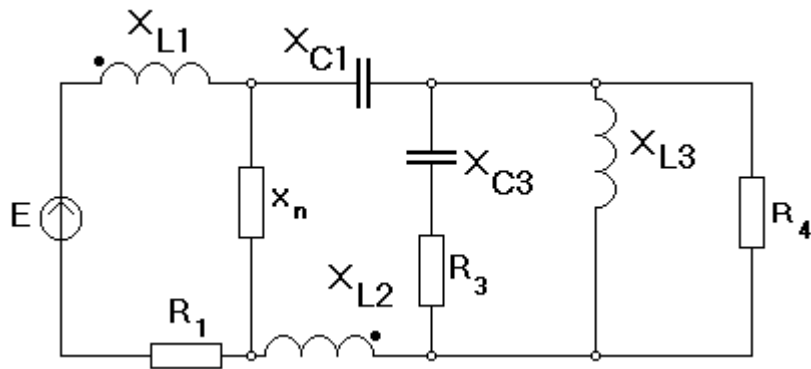
$$F(\phi_{m''}) = (154.972 \quad -23.363)$$

$$\phi_{m''} = 142.266 - 61.455i$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



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



$$Z_E := \frac{\frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + \frac{R_4 \cdot i \cdot X_{L3}}{R_4 + i \cdot X_{L3}}} + i \cdot (X_{L2} - X_{C1}) \quad Z_E = 5.663 + 27.461i$$

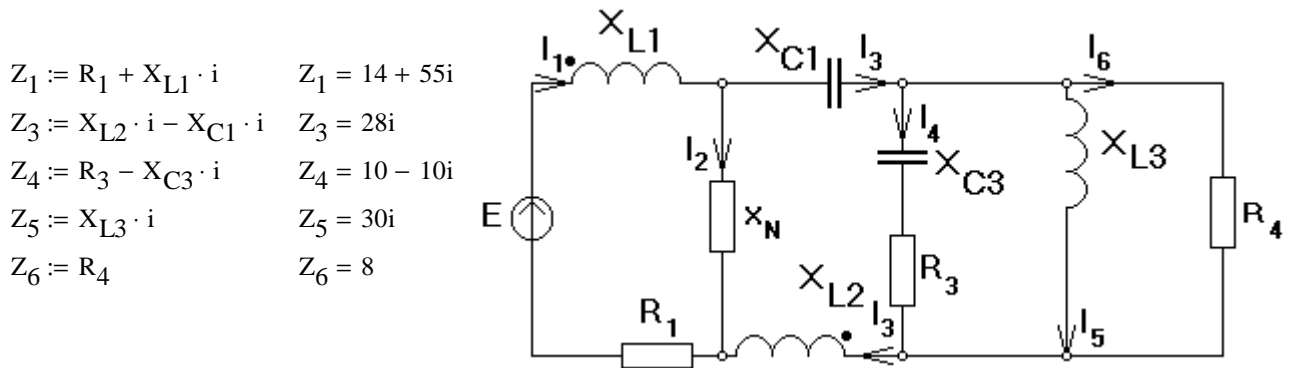
$$Z_E = R_E - j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 5.663 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = 27.461$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.035 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -28.628$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= R_1 + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 14 + 55i \\ Z_3 &:= X_{L2} \cdot i - X_{C1} \cdot i & Z_3 &= 28i \\ Z_4 &:= R_3 - X_{C3} \cdot i & Z_4 &= 10 - 10i \\ Z_5 &:= X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 30i \\ Z_6 &:= R_4 & Z_6 &= 8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{56} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} & Z_{56} &= 7.469 + 1.992i & Z_{3456} &:= \frac{Z_{56} \cdot Z_4}{Z_{56} + Z_4} + Z_3 & Z_{3456} &= 5.663 + 27.461i \\ Z_{46} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_4 + Z_6} & Z_{46} &= 5.283 - 1.509i & Z_{45} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} & Z_{45} &= 18 - 6i \end{aligned}$$

Вхідний опір кола:

$$\begin{aligned} Z_{VX}(X_N) &:= \frac{Z_{3456} \cdot i \cdot X_N}{Z_{3456} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left( \frac{-2444}{89} + \frac{504}{89} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left( \frac{504}{89} + \frac{2444}{89} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 14 + 55 \cdot i \\ Z_{VX}(X_N) &\left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \rightarrow \\ \text{float, 1} \end{array} \right. \frac{\left( 7 \cdot 10^4 \cdot X_N + 2 \cdot 10^3 \cdot X_N^2 + 1 \cdot 10^6 + 3 \cdot 10^5 \cdot i \cdot X_N + 7 \cdot 10^3 \cdot i \cdot X_N^2 + 4 \cdot 10^6 \cdot i \right)}{\left( 7 \cdot 10^4 + 5 \cdot 10^3 \cdot X_N + 9 \cdot 10^1 \cdot X_N^2 \right)^{1.}} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} X_{VX}(X_N) &:= \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \rightarrow \end{array} \right. \frac{\left( 338808 \cdot X_N + 7339 \cdot X_N^2 + 3848240 \right)}{\left( 69968 + 4888 \cdot X_N + 89 \cdot X_N^2 \right)} \\ X_N &:= X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, 30} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -20.1746803518531062119482001424 \\ -25.9907372799768433724638450954 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Отже резонанс кола буде при таких активних опорах у другій вітці:  $X_N = \begin{pmatrix} -20.175 \\ -25.991 \end{pmatrix}$

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -20.175$$

$$Z_{VX}(X_n) = 41.067$$

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

$$I_1 = 3.989 + 2.793i$$

$$F(I_1) = (4.87 \quad 35)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{3456}}{Z_{3456} + i \cdot X_n}$$

$$I_2 = 7.128 + 12.967i$$

$$F(I_2) = (14.797 \quad 61.203)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = -3.139 - 10.174i$$

$$F(I_3) = (10.647 \quad -107.144)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_{56}}{Z_4 + Z_{56}}$$

$$I_4 = 1.633 - 3.959i$$

$$F(I_4) = (4.283 \quad -67.585)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_{46}}{Z_5 + Z_{46}}$$

$$I_5 = -1.864 + 0.775i$$

$$F(I_5) = (2.019 \quad 157.415)$$

$$I_6 := I_3 \cdot \frac{Z_{45}}{Z_6 + Z_{45}}$$

$$I_6 = -2.908 - 6.99i$$

$$F(I_6) = (7.571 \quad -112.585)$$

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

$$S_1 = 974.008$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_6|)^2 \cdot R_4 \quad P = 974.008$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot X_{L1} + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = -1.421 \times 10^{-14}$$

$$\text{При } X_n := X_{N_1} \quad X_n = -25.991 \quad Z_{VX}(X_n) = 125.758$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 1.303 + 0.912i \quad F(I_1) = (1.59 \quad 35)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{3456}}{Z_{3456} + i \cdot X_n} \quad I_2 = -1.166 + 7.532i \quad F(I_2) = (7.622 \quad 98.797)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 2.468 - 6.62i \quad F(I_3) = (7.065 \quad -69.551)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_{56}}{Z_4 + Z_{56}} \quad I_4 = 2.461 - 1.421i \quad F(I_4) = (2.842 \quad -29.992)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_{46}}{Z_5 + Z_{46}} \quad I_5 = -1.294 - 0.347i \quad F(I_5) = (1.34 \quad -164.992)$$

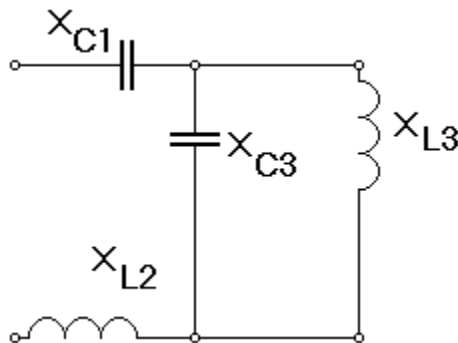
$$I_6 := I_3 \cdot \frac{Z_{45}}{Z_6 + Z_{45}} \quad I_6 = 1.301 - 4.852i \quad F(I_6) = (5.024 \quad -74.992)$$

$$S_1 := U \cdot \bar{I}_1 \quad S_1 = 318.071$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_6|)^2 \cdot R_4 \quad P = 318.071$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot X_{L1} + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = 3.553 \times 10^{-13}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{3}{8 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.119$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{4 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.08$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \rightarrow \frac{1}{2040 \cdot \pi} \quad C_1 = 1.56 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{1200 \cdot \pi} \quad C_3 = 2.653 \times 10^{-4}$$

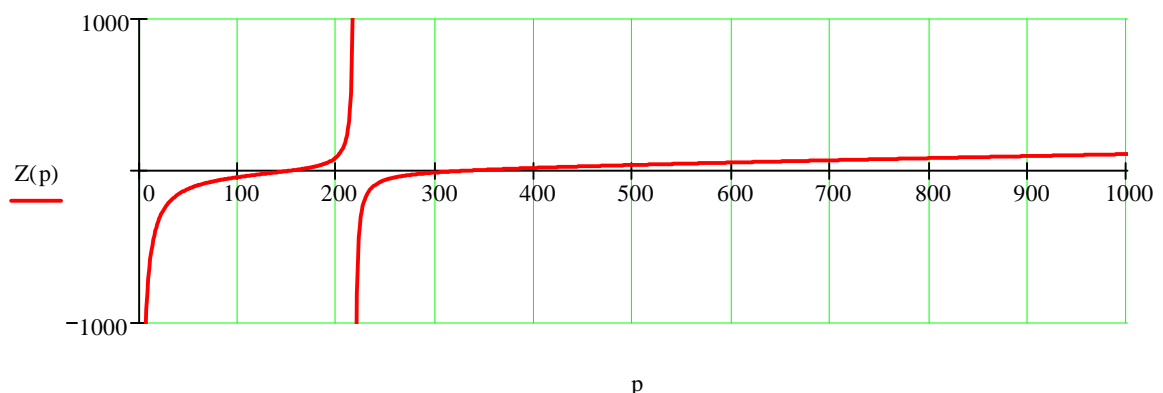
$$Z(p) := \frac{p \cdot L_3 \cdot \frac{-1}{p \cdot C_3}}{p \cdot L_3 - \frac{1}{p \cdot C_3}} + p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_1}$$

Знаходимо нулі:  $Z(p) = 0$

$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 331. \\ -331. \\ 154. \\ -154. \end{pmatrix}$$

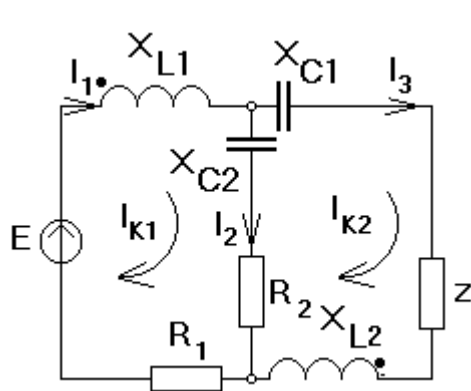
Знаходимо полюси:  $\frac{1}{Z(p)} = 0$

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 217.6559238 \\ -217.6559238 \\ 0 \end{pmatrix}$$



## 2. 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;



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

$$Z = 5.663 - 0.539i$$

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

$$Z_{22} := Z + R_2 + j \cdot (X_{L2} - X_{C1} - X_{C2})$$

$$Z_{12} := R_2 - j \cdot (X_{C2} + X_M)$$

$$Z_{11} = 26 + 42i \quad Z_{22} = 17.663 + 14.461i \quad Z_{12} = 12 - 35i$$

Given

$$I_{K1} \cdot Z_{11} - I_{K2} \cdot Z_{12} = U \quad -I_{K1} \cdot Z_{12} + I_{K2} \cdot Z_{22} = 0$$

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 2.074527348 + .3577640464 \cdot i \\ -.627546299 - 3.353949491 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 2.075 + 0.358i \quad I_{K2} = -0.628 - 3.354i$$

$$I_1 := I_{K1} \quad I_1 = 2.075 + 0.358i \quad F(I_1) = (2.105 \quad 9.785)$$

$$I_2 := I_{K1} - I_{K2} \quad I_2 = 2.702 + 3.712i \quad F(I_2) = (4.591 \quad 53.946)$$

$$I_3 := I_{K2} \quad I_3 = -0.628 - 3.354i \quad F(I_3) = (3.412 \quad -100.598)$$

$$I_4 := \frac{I_3 \cdot Z}{R_3 - i \cdot X_{C3}} \quad I_4 = 0.665 - 1.201i \quad F(I_4) = (1.373 \quad -61.038)$$

$$I_5 := \frac{I_3 \cdot Z}{i \cdot X_{L3}} \quad I_5 = -0.622 + 0.179i \quad F(I_5) = (0.647 \quad 163.962)$$

$$I_6 := \frac{I_3 \cdot Z}{R_4} \quad I_6 = -0.67 - 2.332i \quad F(I_6) = (2.426 \quad -106.038)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_3 - I_4 - I_5 - I_6 = 0$$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + j \cdot (X_{L1} + X_M)] + U - I_2 \cdot [R_2 - j \cdot (X_{C2} + X_M)] = -1.44 \times 10^{-8} + 2.081i \times 10^{-8}$$

$$-I_2 \cdot [R_2 - j \cdot (X_{C2} + X_M)] + I_3 \cdot [j \cdot (X_{L2} - X_{C1} + X_M)] + I_4 \cdot (R_3 - j \cdot X_{C3}) = 7.742 \times 10^{-9} + 8.987i \times 10^{-9}$$

$$I_4 \cdot (R_3 - j \cdot X_{C3}) - I_6 \cdot R_4 = 0 \quad I_4 \cdot (R_3 - j \cdot X_{C3}) - I_5 \cdot i \cdot X_{L3} = 0$$



$$S_{M1} := \overline{I_1} \cdot I_3 \cdot X_M \quad S_{M1} = -55.039 - 148.134i \quad F(S_{M1}) = (158.028 \quad -110.383)$$

$$S_{M2} := I_1 \cdot \overline{I_3} \cdot X_M \quad S_{M2} = -55.039 + 148.134i \quad F(S_{M2}) = (158.028 \quad 110.383)$$

Перевірка за балансом потужностей

$$S := U \cdot \overline{I_1} \quad S = 380.912 + 179.367i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_6|)^2 \cdot R_4 \quad P = 380.912$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot X_{L1} + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2} - X_{C1}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} + S_{M1} + S_{M2} \\ Q = 179.367$$

### Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot R_1 \quad F(\phi_b) = (29.472 \quad 9.785) \quad \phi_b = 29.043 + 5.009i$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad F(\phi_c) = (78.952 \quad 38.872) \quad \phi_c = 61.468 + 49.549i$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-X_{C2} \cdot i) \quad F(\phi_d) = (110.664 \quad 7.488) \quad \phi_d = 109.721 + 14.422i$$

$$\phi_{1'} := \phi_d + I_3 \cdot X_M \cdot i \quad F(\phi_{1'}) = (110.664 \quad 7.488) \quad \phi_{1'} = 109.721 + 14.422i$$

$$\phi_1 := \phi_{1'} + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i \quad F(\phi_1) = (200 \quad 35) \quad \phi_1 = 163.83 + 114.715i$$

$$\phi_A := \phi_1 - U \quad F(\phi_A) = (2.531 \times 10^{-8} \quad -55.314) \quad \phi_A = 1.44 \times 10^{-8} - 2.081i \times 10^{-8}$$

$$\phi_{e'} := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad F(\phi_{e'}) = (181.464 \quad -7.355) \quad \phi_{e'} = 179.971 - 23.231i$$

$$\phi_e := \phi_{e'} + I_1 \cdot i \cdot X_M \quad F(\phi_e) = (173.553 \quad 7.419) \quad \phi_e = 172.1 + 22.409i$$

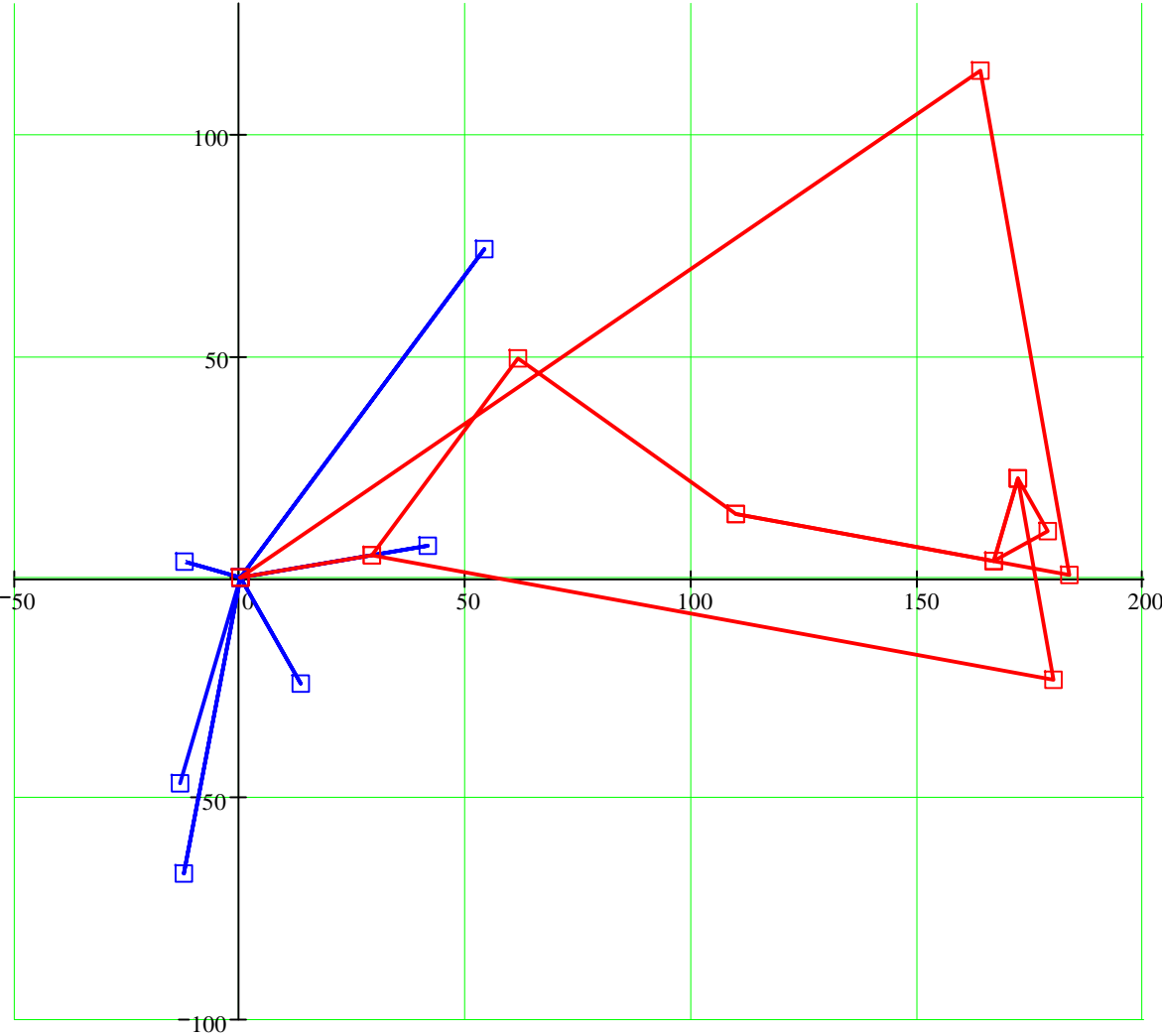
$$\phi_k := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad F(\phi_k) = (179.049 \quad 3.33) \quad \phi_k = 178.746 + 10.4i$$

$$\phi_m := \phi_k + I_4 \cdot i \cdot (-X_{C3}) \quad F(\phi_m) = (166.78 \quad 1.29) \quad \phi_m = 166.738 + 3.754i$$

$$\phi_{m'} := \phi_e + I_5 \cdot (X_{L3} \cdot i) \quad F(\phi_{m'}) = (166.78 \quad 1.29) \quad \phi_{m'} = 166.738 + 3.754i$$

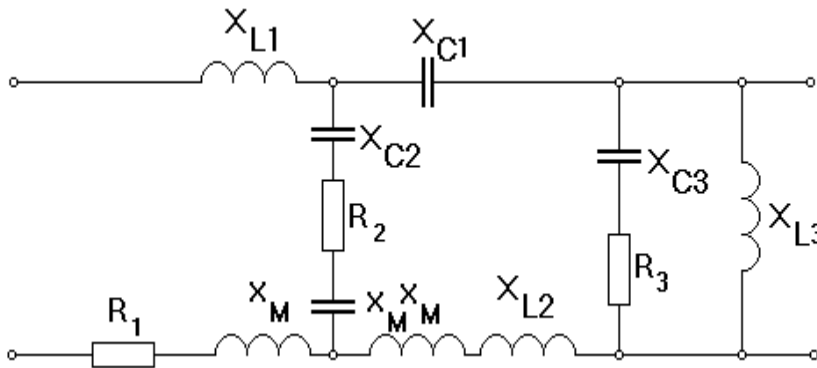
$$\phi_{m''} := \phi_e + I_6 \cdot R_4 \quad F(\phi_{m''}) = (166.78 \quad 1.29) \quad \phi_{m''} = 166.738 + 3.754i$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



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

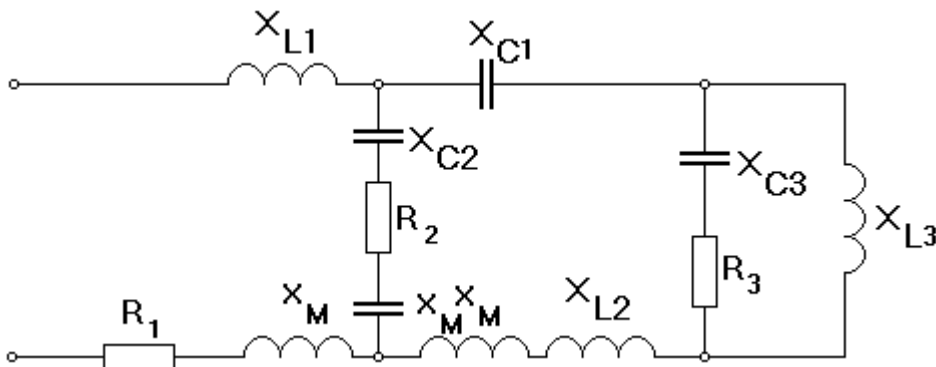
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 14 + 77 \cdot i \quad Z_3 := \frac{i \cdot X_{L3} \cdot (R_3 - i \cdot X_{C3})}{R_3 - i \cdot X_{C3} + i \cdot X_{L3}} \quad Z_3 = 18 - 6i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 12 - 35 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{[Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})] \cdot Z_2}{Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})} + R_1 + i \cdot (X_{L1} + X_M) \quad Z_{10} = 66.765 + 57.771i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \quad Z_{20} = 55.978 - 0.657i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 2.253 - 0.232i \quad F(I_{10}) = (2.265 \quad -5.869)$$

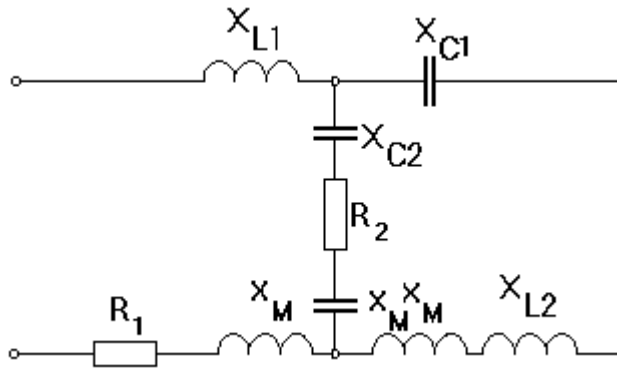
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{[Z_2 + Z_3 + i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1})]} \quad F(I_{30}) = (2.676 \quad -93.644)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot Z_3 \quad U_{20} = -19.085 - 47.051i \quad F(U_{20}) = (50.774 \quad -112.079)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = -3.306 + 2.141i \quad F(A) = (3.939 \quad 147.079)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = -0.012 + 0.043i \quad F(C) = (0.045 \quad 106.21)$$

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



$$Z_1 := R_1 + i \cdot X_{L1} + i \cdot X_M \rightarrow 14 + 77 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 12 - 35 \cdot i$$

$$Z_3 := i \cdot (X_{L2} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 50 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 95.301 + 25.374i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 1.905 + 0.697i \quad F(I_{1K}) = (2.028 \quad 20.091)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = -0.834 - 3.816i \quad F(I_{3K}) = (3.906 \quad -102.325)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -37.644 + 34.706i \quad F(B) = (51.201 \quad 137.325)$$

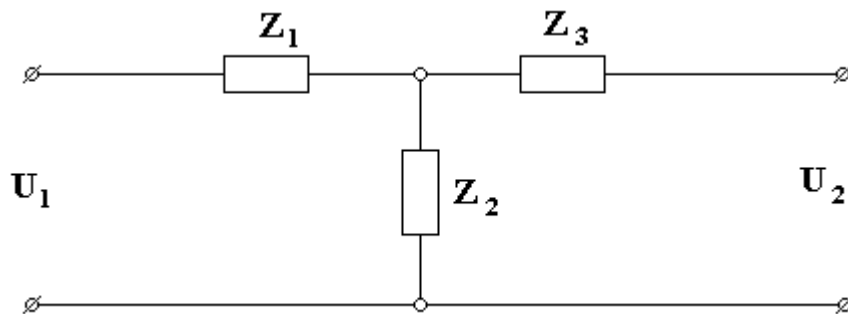
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.278 + 0.438i \quad F(D) = (0.519 \quad 122.416)$$

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

$$F(A) = (3.939 \quad 147.079) \quad F(B) = (51.201 \quad 137.325)$$

$$F(C) = (0.045 \quad 106.21) \quad F(D) = (0.519 \quad 122.416)$$

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



$$Z_1 = 14 + 77i$$

$$F(Z_1) = (78.262 \quad 79.695)$$

$$Z_2 = 12 - 35i$$

$$F(Z_2) = (37 \quad -71.075)$$

$$Z_3 = 50i$$

$$F(Z_3) = (50 \quad 90)$$

$$R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 14$$

$$X_1 := \operatorname{Im}(Z_1) \quad X_1 = 77$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 12$$

$$X_2 := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_2 = -35$$

$$R_3 := \operatorname{Re}(Z_3) \quad R_3 = 0$$

$$X_3 := \operatorname{Im}(Z_3) \quad X_3 = 50$$

$$L_1 := \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

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

$$L_2 := \frac{X_3}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L_1 = 0.204$$

$$C = 7.579 \times 10^{-5}$$

$$L_2 = 0.133$$