

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

***Розрахунково-графічна робота***  
*“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”*  
*Варіант № 805*

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

$$E := 240 \quad \psi := 70 \quad R_1 := 18 \quad R_2 := 16 \quad R_3 := 14 \quad R_4 := 12$$

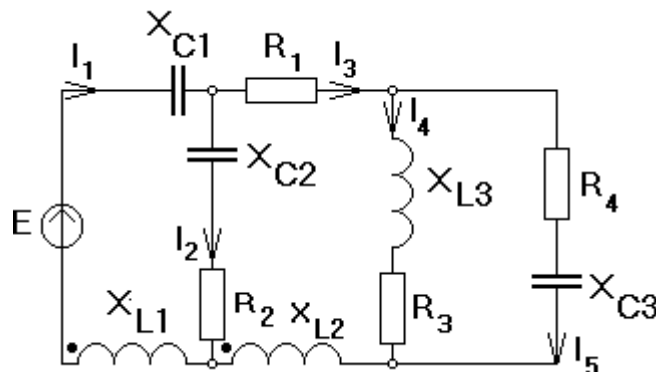
$$X_{L1} := 37 \quad X_{L2} := 27 \quad X_{L3} := 20 \quad X_{C1} := 13 \quad X_{C2} := 10 \quad X_{C3} := 6$$

$$X_M := 15 \quad f := 50 \quad j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$U := E \cdot e$$

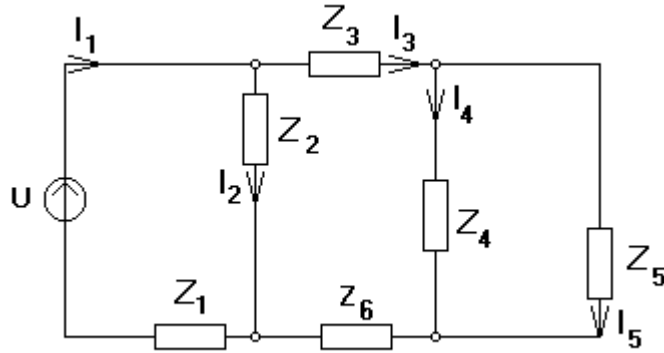
$$U = 82.085 + 225.526i$$

$$F(U) = (240 \ 70)$$



## Для електричного кола без взаємної індукції:

**Розрахувати всі струми символьним методом**



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 24 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 16 - 10 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 18$$

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 14 + 20 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 12 - 6 \cdot i$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L2} \rightarrow 27 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 15.318 + 21.354i$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_E} \quad I_1 = 8.794 + 2.464i \quad F(I_1) = (9.132 \quad 15.652)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left( \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} \quad I_2 = 5.94 + 4.617i \quad F(I_2) = (7.524 \quad 37.858)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left( Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)} \quad I_3 = 2.854 - 2.153i \quad F(I_3) = (3.575 \quad -37.041)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_5 + Z_4} \quad I_4 = -0.054 - 1.623i \quad F(I_4) = (1.624 \quad -91.907)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5} \quad I_5 = 2.908 - 0.53i \quad F(I_5) = (2.956 \quad -10.334)$$

**Перевірка за першим законом Кіргофа:**

$$I_1 - I_2 - I_3 = 1.332 \times 10^{-15} \quad I_2 + I_5 + I_4 - I_1 = -1.776 \times 10^{-15}$$

**Перевірка за другим законом Кіргофа:**

$$-I_1 \cdot [i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) = 5.329i \times 10^{-15}$$

$$I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) - I_4 \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) - I_3 \cdot (R_1 + i \cdot X_{L2}) = 2.842 \times 10^{-14} + 1.421i \times 10^{-14}$$

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

**Перевірка за балансом потужностей**

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 1.278 \times 10^3 + 1.781i \times 10^3$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 1.278 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 1.781 \times 10^3$$

## Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -91.163 + 325.37i$$

$$F(\phi_b) = (337.9 \quad 105.652)$$

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

$$\phi_c = 3.881 + 399.248i$$

$$F(\phi_c) = (399.267 \quad 89.443)$$

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

$$\phi_d = 50.054 + 339.846i$$

$$F(\phi_d) = (343.512 \quad 81.621)$$

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

$$\phi_1 = 82.085 + 225.526i$$

$$F(\phi_1) = (240 \quad 70)$$

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

$$\phi_{1'} = -2.842i \times 10^{-14}$$

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

$$\phi_e = -33.019 + 402.416i$$

$$F(\phi_e) = (403.768 \quad 94.691)$$

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

$$\phi_m = -33.776 + 379.689i$$

$$F(\phi_m) = (381.189 \quad 95.083)$$

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

$$\phi_n = -1.309 + 378.608i$$

$$F(\phi_n) = (378.611 \quad 90.198)$$

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

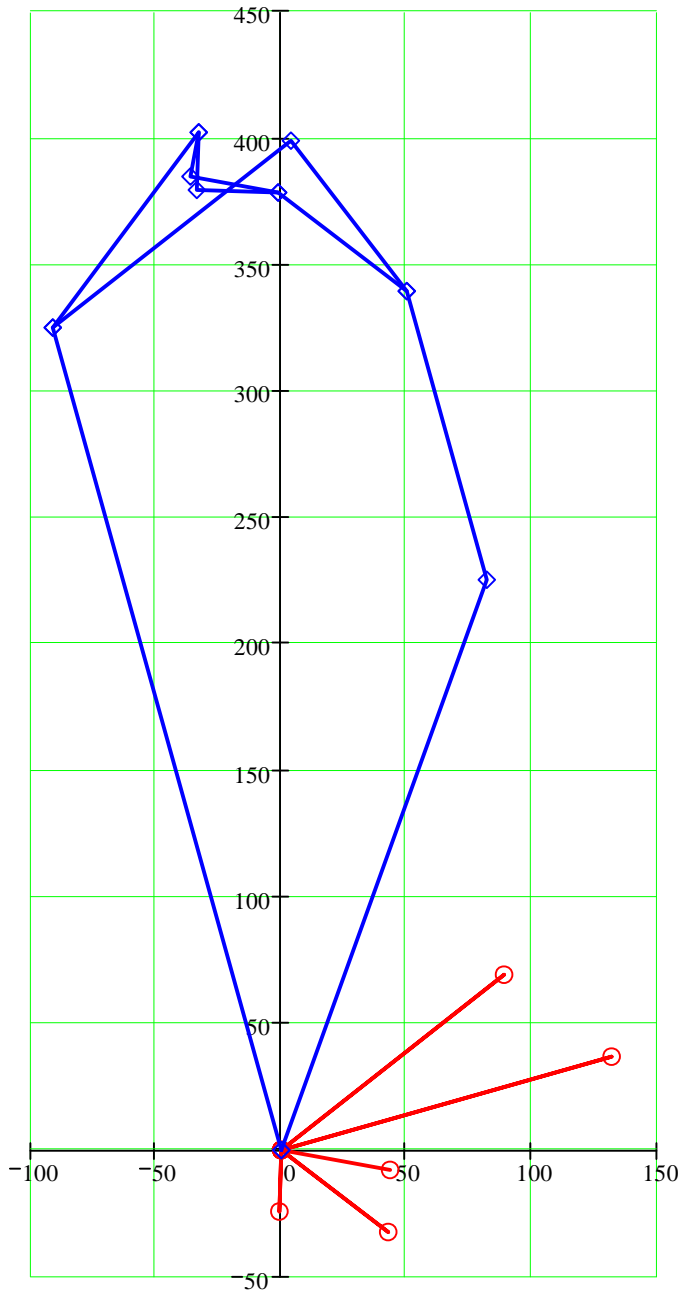
$$\phi_k = -36.2 + 384.97i$$

$$F(\phi_k) = (386.669 \quad 95.372)$$

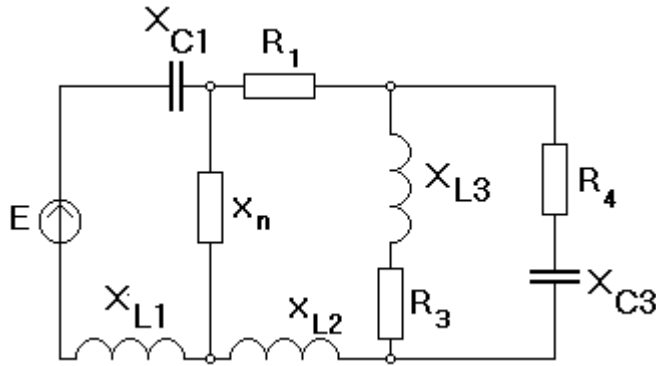
$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4$$

$$\phi_n = -1.309 + 378.608i$$

$$F(\phi_n) = (378.611 \quad 90.198)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 29.092 + 27.028i$$

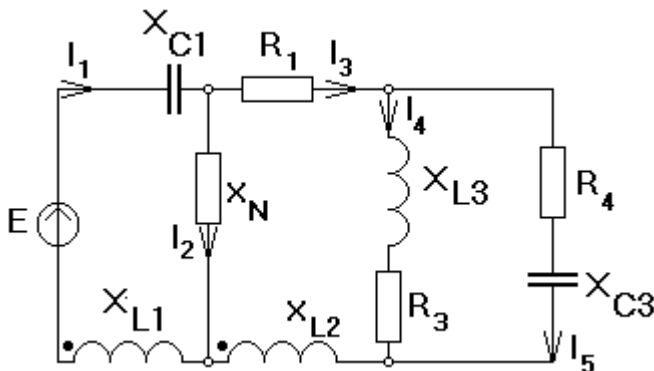
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \operatorname{Re}(Z_E) \quad R_E = 29.092 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_E) \quad X_E = 27.028$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -0.017 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -58.341$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 24i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 18 + 27i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 14 + 20i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 12 - 6i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 29.092 + 27.028i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 3 \cdot \frac{(1057 \cdot X_N^2 + 104427 \cdot i \cdot X_N + 1854 \cdot i \cdot X_N^2 + 1374984 \cdot i)}{(171873 + 5892 \cdot X_N + 109 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \operatorname{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -20.986119853488390326 \\ -35.339122864958211616 \end{pmatrix} \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці  $X_N = \begin{pmatrix} -20.986 \\ -35.339 \end{pmatrix}$  який носить ємнісний характер ( $X_{N0} = -20.986$ ). ( $X_{N1} = -35.339$ )

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -20.986 \quad Z_{VX}(X_n) = 14.513$$

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

$$I_1 = 5.656 + 15.54i$$

$$F(I_1) = (16.537 \quad 70)$$

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

$$I_2 = -4.278 + 21.683i$$

$$F(I_2) = (22.101 \quad 101.162)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 9.934 - 6.143i$$

$$F(I_3) = (11.68 \quad -31.732)$$

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

$$I_4 = 0.315 - 5.297i$$

$$F(I_4) = (5.307 \quad -86.598)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 9.619 - 0.846i$$

$$F(I_5) = (9.656 \quad -5.024)$$

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

$$S_1 = 3.969 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 3.969 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 2.274 \times 10^{-12}$$

При  $X_n := X_{N1} \quad X_n = -35.339 \quad Z_{VX}(X_n) = 39.688$

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

$$I_1 = 2.068 + 5.682i$$

$$F(I_1) = (6.047 \quad 70)$$

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

$$I_2 = -4.977 + 6.182i$$

$$F(I_2) = (7.936 \quad 128.838)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 7.045 - 0.499i$$

$$F(I_3) = (7.063 \quad -4.055)$$

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

$$I_4 = 1.657 - 2.748i$$

$$F(I_4) = (3.209 \quad -58.921)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 5.389 + 2.249i$$

$$F(I_5) = (5.839 \quad 22.652)$$

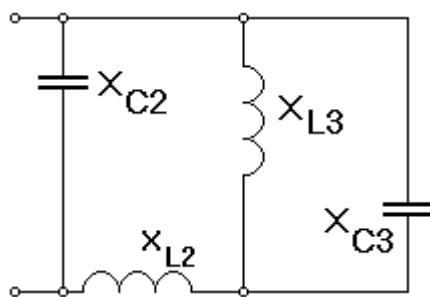
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 1.451 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 1.451 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 2.558 \times 10^{-13}$$

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



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

$$L_2 = 0.086$$

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

$$L_3 = 0.064$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{1000 \cdot \pi}$$

$$C_2 = 3.183 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{600 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 5.305 \times 10^{-4}$$

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

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

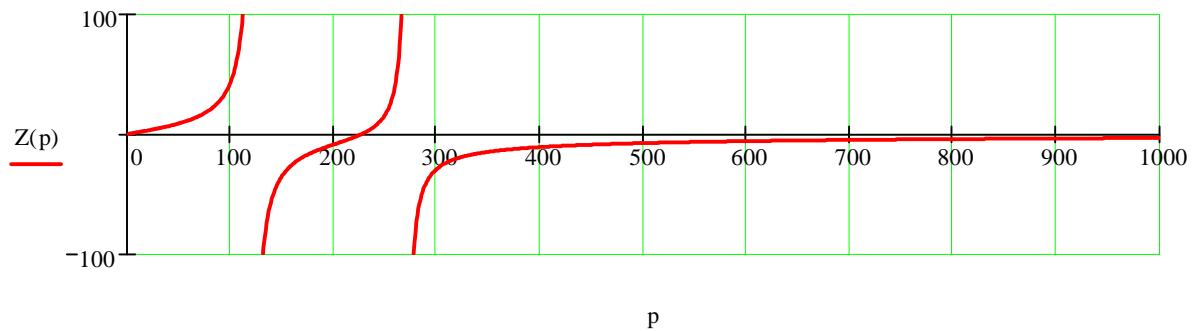
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 227.0270 \\ -227.0270 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 227.027 \\ -227.027 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (227.027 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

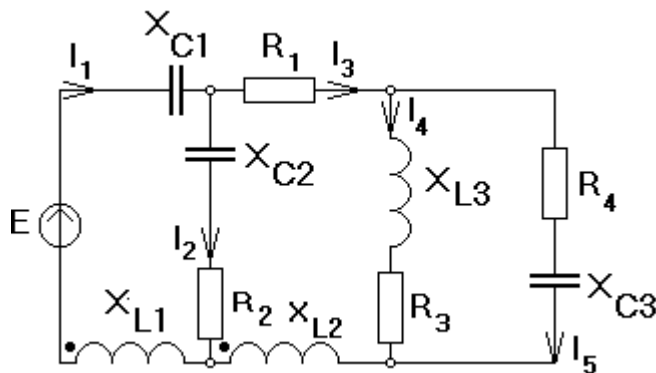
$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 270.80837956 \\ 121.48324728 \\ -121.48324728 \\ -270.80837956 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 270.808 \\ 121.483 \\ -121.483 \\ -270.808 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{1_0} \\ \omega_{1_2} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 270.808 \\ -121.483 \end{pmatrix}$$



### При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

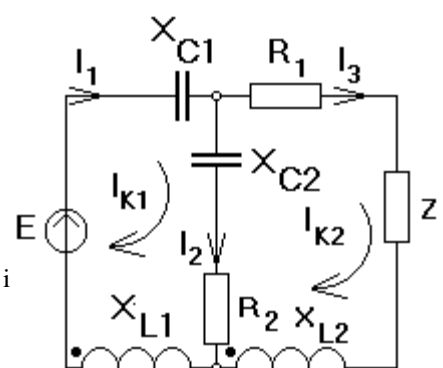
- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

імпеданс



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

$$Z = 11.092 + 0.028i$$



$$Z_{11} := R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}) \rightarrow 16 + 14 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 16 - 25 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 45.09174 + 17.02752 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 5.3982722867585517448 + 2.7813050367279085764 \cdot i \\ 2.3630266021241357023 - 2.8983669583280223728 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 5.398 + 2.781i$$

$$I_{K2} = 2.363 - 2.898i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 5.398 + 2.781i$$

$$F(I_1) = (6.073 \ 27.258)$$

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

$$I_2 = 3.035 + 5.68i$$

$$F(I_2) = (6.44 \ 61.88)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = 2.363 - 2.898i$$

$$F(I_3) = (3.74 \ -50.81)$$

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

$$I_4 = -0.459 - 1.636i$$

$$F(I_4) = (1.699 \ -105.676)$$

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

$$I_5 = 2.822 - 1.263i$$

$$F(I_5) = (3.092 \quad -24.103)$$

*Перевірка за першим законом Кіргофа:*

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

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

$$S_{M1} = -333.277 + 70.425i$$

$$F(S_{M1}) = (340.637 \quad 168.068)$$

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

$$S_{M2} = 333.277 + 70.425i$$

$$F(S_{M2}) = (340.637 \quad 11.932)$$

*Перевірка за балансом потужностей*

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

$$S_1 = 1.07 \times 10^3 + 989.149i$$

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

$$P = 1.07 \times 10^3$$

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

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

$$Q = 989.149i$$

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

*Знаходимо потенціали точок:*

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -102.908 + 199.736i$$

$$F(\phi_b) = (224.688 \quad 117.258)$$

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

$$\phi_{b'} = -59.433 + 235.181i$$

$$F(\phi_{b'}) = (242.575 \quad 104.182)$$

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

$$\phi_c = -10.869 + 326.056i$$

$$F(\phi_c) = (326.237 \quad 91.909)$$

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

$$\phi_d = 45.928 + 295.704i$$

$$F(\phi_d) = (299.249 \quad 81.172)$$

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

$$\phi_1 = 82.085 + 225.526i$$

$$F(\phi_1) = (240 \quad 70)$$

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

$$\phi_{1'} = -2.842 \times 10^{-14} - 2.842i \times 10^{-14}$$

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

$$\phi_{e'} = 18.823 + 298.983i$$

$$F(\phi_{e'}) = (299.575 \quad 86.398)$$

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

$$\phi_e = -22.896 + 379.957i$$

$$F(\phi_e) = (380.647 \quad 93.449)$$

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

$$\phi_m = -29.323 + 357.056i$$

$$F(\phi_m) = (358.258 \quad 94.695)$$

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

$$\phi_n = 3.393 + 347.874i$$

$$F(\phi_n) = (347.891 \quad 89.441)$$

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

$$\phi_k = -30.472 + 363.025i$$

$$F(\phi_k) = (364.301 \quad 94.798)$$

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

$$\phi_n = 3.393 + 347.874i$$

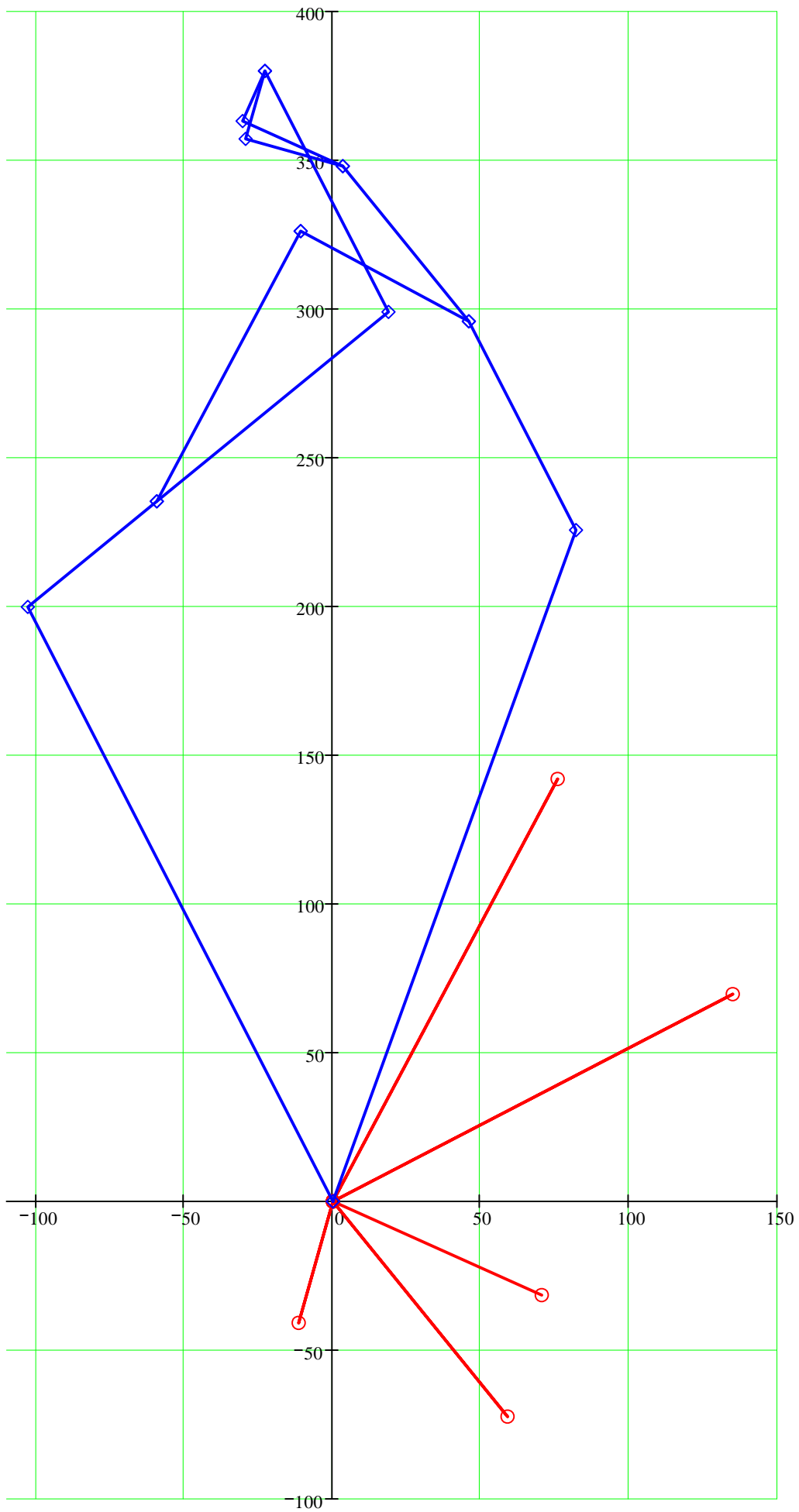
$$F(\phi_n) = (347.891 \quad 89.441)$$

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

$$\phi_d = 45.928 + 295.704i$$

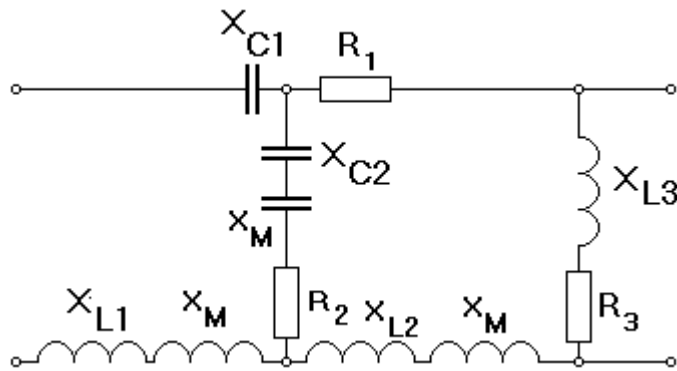
$$F(\phi_d) = (299.249 \quad 81.172)$$





**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":**

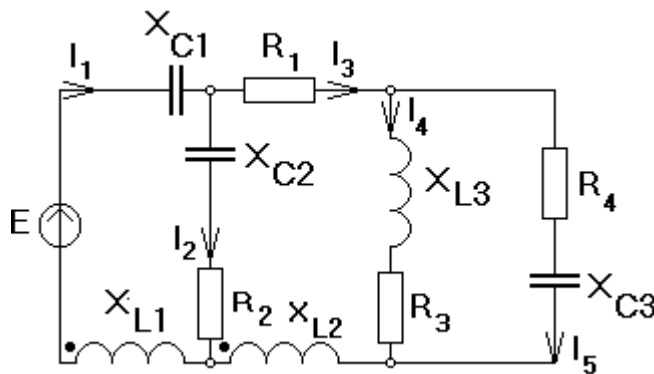
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



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

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 16 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 32 + 62 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 28.881 + 20.738i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_E} \quad I_{10} = 5.575 + 3.806i$$

$$F(I_{10}) = (6.75 \quad 34.32)$$

$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = 1.619 - 2.883i$$

$$F(I_{30}) = (3.306 \quad -60.687)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 80.311 - 7.986i$$

$$F(U_{20}) = (80.707 \quad -5.679)$$

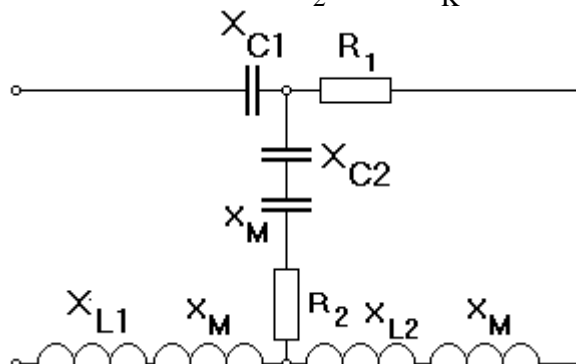
$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 0.736 + 2.881i$$

$$F(A) = (2.974 \quad 75.679)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.064 + 0.054i$$

$$F(C) = (0.084 \quad 39.999)$$

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



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

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 16 - 25 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 18 + 42 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 34.094 + 28.482i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 4.673 + 2.711i \quad F(I_{1K}) = (5.402 \quad 30.124)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = 2.49 - 3.405i \quad F(I_{3K}) = (4.218 \quad -53.821)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -31.669 + 47.268i \quad F(B) = (56.896 \quad 123.821)$$

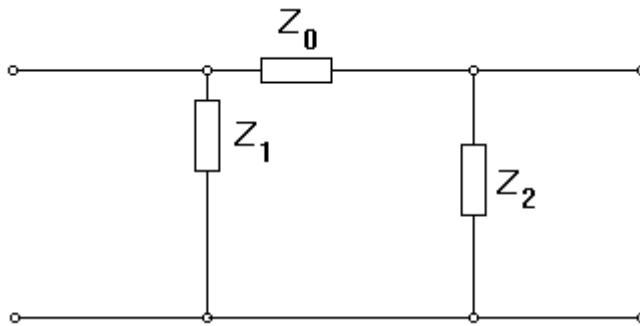
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = 0.135 + 1.274i \quad F(D) = (1.281 \quad 83.946)$$

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

$$F(A) = (2.974 \quad 75.679) \quad F(B) = (56.896 \quad 123.821)$$

$$F(C) = (0.084 \quad 39.999) \quad F(D) = (1.281 \quad 83.946)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -31.669 + 47.268i \quad F(Z_0) = (56.896 \quad 123.821)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.027 + 1.704i \times 10^{-4} \quad F(Y_1) = (0.027 \quad 0.361)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.045 - 0.024i \quad F(Y_2) = (0.051 \quad -28.578)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -31.669 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 47.268$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 36.957 - 0.233i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 36.957 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 0.233$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 17.268 + 9.406i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 17.268 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 9.406$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 0.014 \quad L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 0.03$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.15$$