

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 133

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 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, 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" :

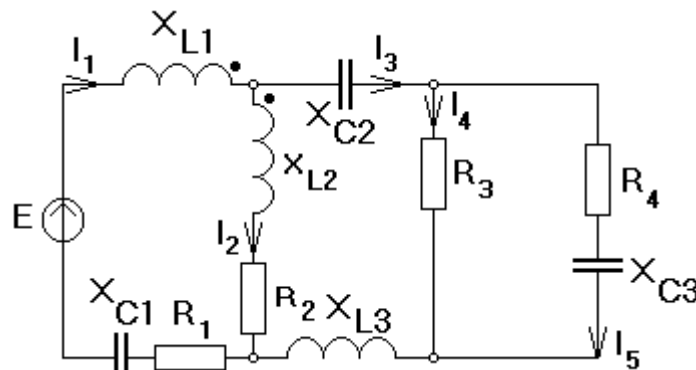
3.1 Розрахувати коефіцієнти чотирьохполосника **A,B,C,D**;

3.2 Розрахувати параметри R,L,C віток схеми ("Т" чи "П") заміщення.

$$E := 100 \quad \psi := -20 \quad R_1 := 5 \quad R_2 := 7 \quad R_3 := 9 \quad R_4 := 12 \quad X_{L1} := 40 \quad X_{L2} := 45 \quad X_{L3} := 50$$

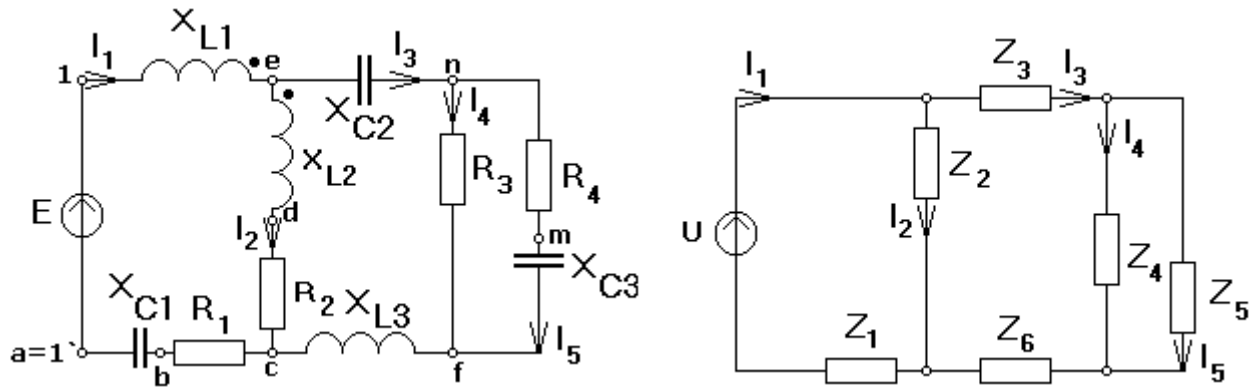
$$X_{C1} := 20 \quad X_{C2} := 25 \quad X_{C3} := 30 \quad X_M := 25 \quad f := 50$$

$$U := E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} \quad U = 93.969 - 34.202i \quad F(U) = (100 \quad -20)$$



Для електричного кола без взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символьним методом



$$Z_1 := R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1}) \rightarrow 5 + 20 \cdot i$$

$$Z_4 := R_3 \rightarrow 9$$

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2}) \rightarrow 7 + 45 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 12 - 30 \cdot i$$

$$Z_3 := -i \cdot X_{C2} \rightarrow -25 \cdot i$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L3} \rightarrow 50 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 9.154 + 35.406i$$

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

$$I_1 = -0.262 - 2.722i$$

$$F(I_1) = (2.734 \quad -95.504)$$

$$I_2 := \frac{I_1 \cdot \left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6}$$

$$I_2 = -0.195 - 0.938i$$

$$F(I_2) = (0.958 \quad -101.753)$$

$$I_3 := \frac{I_1 \cdot Z_2}{\left(Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right)}$$

$$I_3 = -0.067 - 1.784i$$

$$F(I_3) = (1.785 \quad -92.154)$$

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

$$I_4 = -0.417 - 1.519i$$

$$F(I_4) = (1.575 \quad -105.345)$$

$$I_5 := I_3 \cdot \frac{Z_4}{Z_4 + Z_5}$$

$$I_5 = 0.35 - 0.265i$$

$$F(I_5) = (0.439 \quad -37.147)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ $I_3 - I_4 - I_5 = 0$ $I_2 + I_5 + I_4 - I_1 = 0$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) = 2.842 \times 10^{-14} - 1.776i \times 10^{-15}$$

$$I_2 \cdot (R_2 + i \cdot X_{L2}) - I_4 \cdot R_3 - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2} + i \cdot X_{L3}) = -7.105 \times 10^{-15} + 1.554i \times 10^{-15}$$

$$I_4 \cdot R_3 - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = 1.332 \times 10^{-15} - 1.776i \times 10^{-15}$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 68.448 + 264.737i$$

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

$$P = 68.448$$

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

$$Q = 264.737$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -54.436 + 5.245i$$

$$F(\phi_b) = (54.689 \quad 174.496)$$

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

$$\phi_c = -55.748 - 8.364i$$

$$F(\phi_c) = (56.372 \quad -171.467)$$

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

$$\phi_d = -57.114 - 14.93i$$

$$F(\phi_d) = (59.033 \quad -165.35)$$

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

$$\phi_e = -14.904 - 23.712i$$

$$F(\phi_e) = (28.006 \quad -122.151)$$

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

$$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$$

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

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

$$\phi_{1'} = -2.842 \times 10^{-14} + 7.105i \times 10^{-15}$$

$$\phi_f := \phi_c + I_3 \cdot i \cdot X_{L3}$$

$$\phi_f = 33.443 - 11.719i$$

$$F(\phi_f) = (35.437 \quad -19.312)$$

$$\phi_n := \phi_f + I_4 \cdot R_3$$

$$\phi_n = 29.692 - 25.389i$$

$$F(\phi_n) = (39.067 \quad -40.534)$$

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

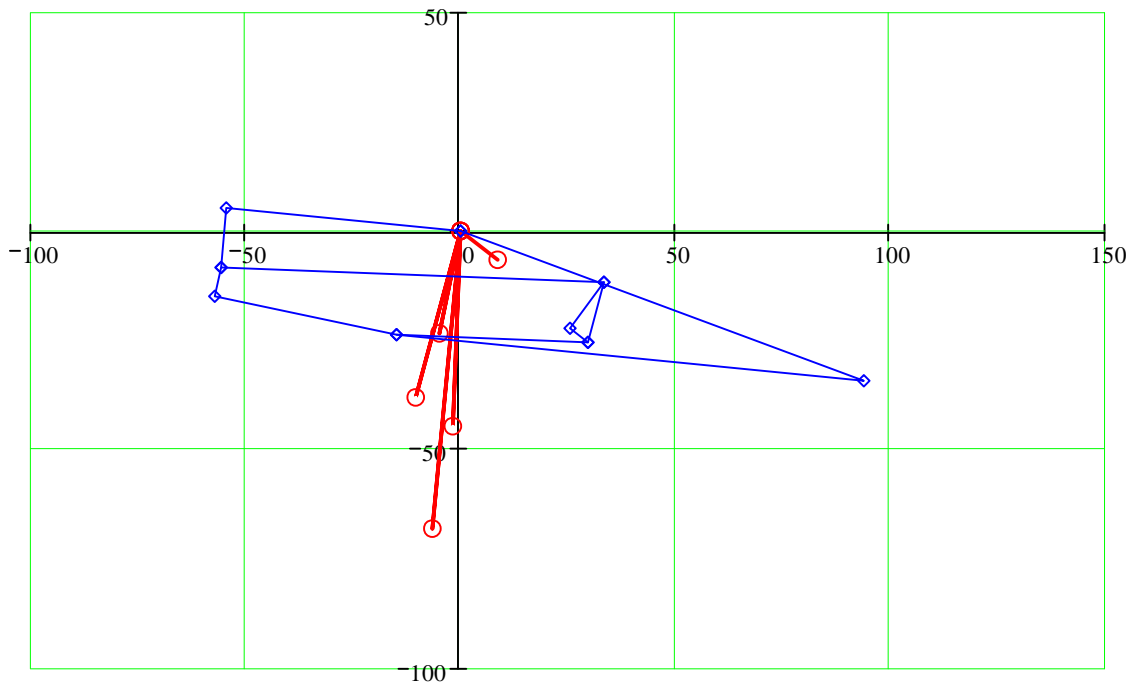
$$\phi_m = 25.495 - 22.21i$$

$$F(\phi_m) = (33.813 \quad -41.061)$$

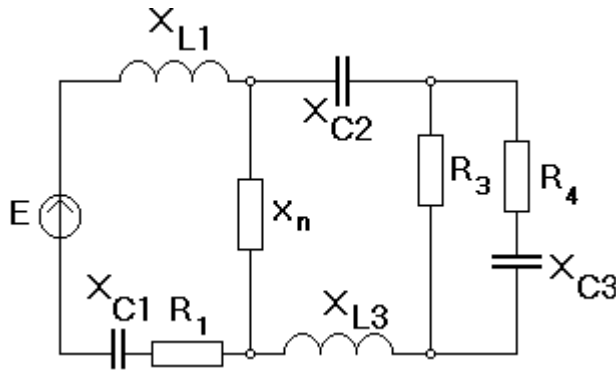
$$\phi_n := \phi_m + I_5 \cdot R_4$$

$$\phi_n = 29.692 - 25.389i$$

$$F(\phi_n) = (39.067 \quad -40.534)$$



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



$$Z_E := \frac{R_3 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (-X_{C3})} - i \cdot (X_{C2} + X_{L3}) \quad Z_E = 7.732 - 76.812i$$

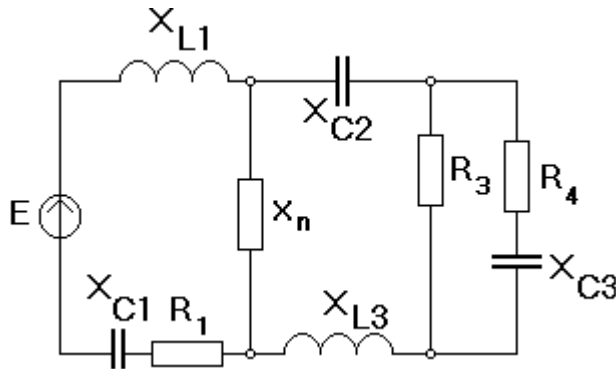
$$Z_E = R_E - j \cdot X_E \quad R_E := \text{Re}(Z_E) \quad R_E = 7.732 \quad X_E := \text{Im}(Z_E) \quad X_E = -76.812$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = 0.013 \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = 77.59$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$Z_1 := R_1 - X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i \quad Z_1 = 5 + 20i$$

$$Z_3 := -X_{C2} \cdot i + X_{L3} \cdot i \quad Z_3 = 25i$$

$$Z_4 := R_3 \quad Z_4 = 9$$

$$Z_5 := R_4 - X_{C3} \cdot i \quad Z_5 = 12 - 30i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 \quad Z_{345} = 7.732 + 23.188i$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(34550 \cdot X_N + 1897 \cdot X_N^2 + 445105 + 227221 \cdot i \cdot X_N + 6435 \cdot i \cdot X_N^2 + 1780420 \cdot i)}{(89021 + 6910 \cdot X_N + 149 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \rightarrow \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \left(\begin{array}{l} -11.736927861969656293 \\ -23.573250848209053885 \end{array} \right) \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -11.737 \\ -23.573 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N0} = -11.737$). ($X_{N1} = -23.573$)

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -11.737 \quad Z_{VX}(X_n) = 10.579$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 8.883 - 3.233i \quad F(I_1) = (9.453 \quad -20)$$

$$\begin{aligned}
I_2 &:= I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} & I_2 &= 16.673 - 1.287i & F(I_2) &= (16.722 \quad -4.413) \\
I_3 &:= I_1 - I_2 & I_3 &= -7.79 - 1.946i & F(I_3) &= (8.03 \quad -165.973) \\
I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 &= -7.084 - 0.103i & F(I_4) &= (7.085 \quad -179.164) \\
I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 &= -0.706 - 1.843i & F(I_5) &= (1.973 \quad -110.965) \\
S_1 &:= U \cdot \overline{I_1} & S_1 &= 945.259
\end{aligned}$$

$$P := \left(|I_1|\right)^2 \cdot R_1 + \left(|I_4|\right)^2 \cdot R_3 + \left(|I_5|\right)^2 \cdot R_4 \quad P = 945.259$$

$$Q := \left(|I_1|\right)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + \left(|I_2|\right)^2 \cdot X_n + \left(|I_3|\right)^2 \cdot (X_{L3} - X_{C2}) + \left(|I_5|\right)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 3.695 \times 10^{-13}$$

$$\text{При } X_n := X_{N_1} \quad X_n = -23.573 \quad Z_{VX}(X_n) = 76.696$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 1.225 - 0.446i \quad F(I_1) = (1.304 \quad -20)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = 2.396 + 3.348i \quad F(I_2) = (4.117 \quad 54.413)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = -1.171 - 3.794i \quad F(I_3) = (3.97 \quad -107.147)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = -1.769 - 3.024i \quad F(I_4) = (3.503 \quad -120.337)$$

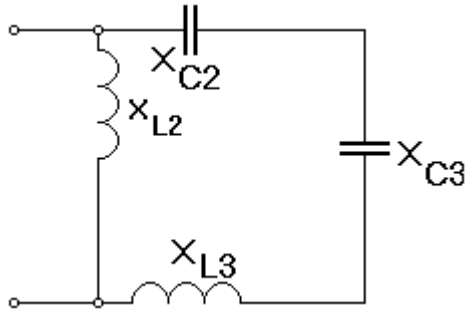
$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = 0.599 - 0.77i \quad F(I_5) = (0.976 \quad -52.139)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 130.385$$

$$P := \left(|I_1|\right)^2 \cdot R_1 + \left(|I_4|\right)^2 \cdot R_3 + \left(|I_5|\right)^2 \cdot R_4 \quad P = 130.385$$

$$Q := \left(|I_1|\right)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + \left(|I_2|\right)^2 \cdot X_n + \left(|I_3|\right)^2 \cdot (X_{L3} - X_{C2}) + \left(|I_5|\right)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 1.279 \times 10^{-13}$$

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



$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{1}{2 \cdot \pi} \quad L_3 = 0.159$$

$$C_2 := \frac{1}{X_{C2} \cdot \omega} \rightarrow \frac{1}{2500 \cdot \pi} \quad C_2 = 1.273 \times 10^{-4}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{3000 \cdot \pi} \quad C_3 = 1.061 \times 10^{-4}$$

$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{9}{20 \cdot \pi} \quad L_2 = 0.143$$

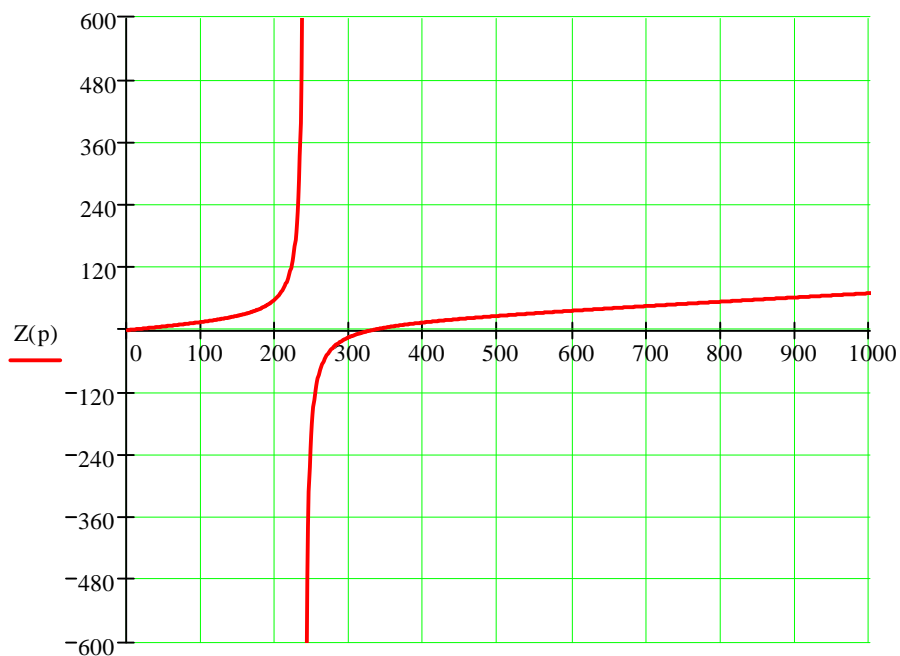
$$Z(p) := \frac{\left(\frac{-1}{C_2 \cdot p} - \frac{1}{C_3 \cdot p} + L_3 \cdot p \right) \cdot L_2 \cdot p}{L_2 \cdot p + \frac{-1}{C_2 \cdot p} - \frac{1}{C_3 \cdot p} + L_3 \cdot p} \rightarrow \frac{9}{20} \cdot \frac{\left(\frac{-5500}{p} \cdot \pi + \frac{1}{2} \cdot \frac{p}{\pi} \right)}{\pi} \cdot \frac{p}{\left(\frac{19}{20} \cdot \frac{p}{\pi} - \frac{5500}{p} \cdot \pi \right)}$$

Знаходимо нулі:

$$p' := Z(p) \text{ solve, } p \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{10 \cdot 110^2 \cdot \pi} \\ \frac{1}{-10 \cdot 110^2 \cdot \pi} \\ 0 \end{pmatrix} \quad p' = \begin{pmatrix} 329.493 \\ -329.493 \\ 0 \end{pmatrix} \quad p' := \begin{pmatrix} p'_0 \\ p'_2 \end{pmatrix} \quad p' = \begin{pmatrix} 329.493 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Знаходимо полюси:

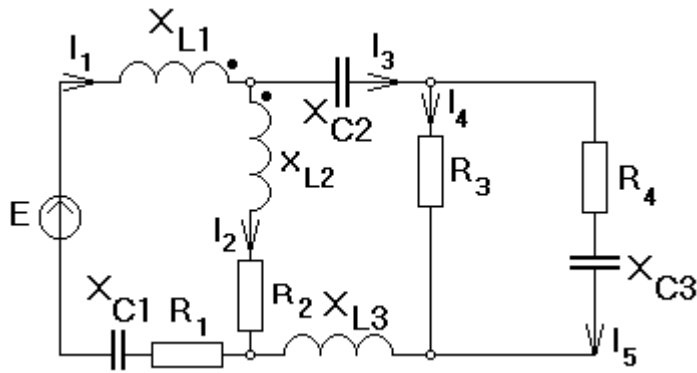
$$p'' := \frac{1}{Z(p)} \text{ solve, } p \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{\frac{100}{19} \cdot 209^2 \cdot \pi} \\ \frac{1}{-\frac{100}{19} \cdot 209^2 \cdot \pi} \end{pmatrix} \quad p'' = \begin{pmatrix} 239.039 \\ -239.039 \end{pmatrix} \quad p'' := p''_0 \quad p'' = 239.039$$



p

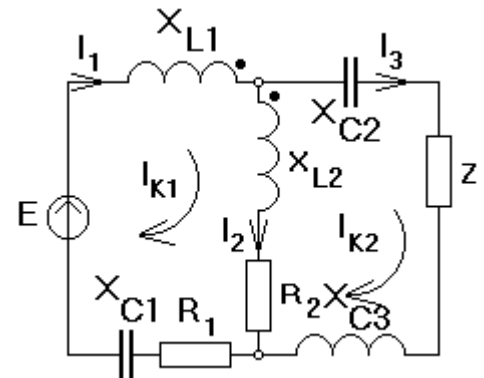
При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

- 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;
- 3) Побудувати сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг



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

$$Z = 7.732 - 1.812i$$



$$Z_{11} := R_1 + R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} + X_{L2} - 2 \cdot X_M) \rightarrow 12 + 15 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M) \rightarrow 7 + 20 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2} + X_{L3}) + Z \rightarrow \frac{2195}{149} + \frac{10160}{149} \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \text{ float, 15} \rightarrow \begin{pmatrix} 3.21666447799940 - 6.99243654756331 \cdot i \\ .707072778912973 - 2.22838752092304 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 3.217 - 6.992i$$

$$I_{K2} = 0.707 - 2.228i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 3.217 - 6.992i$$

$$F(I_1) = (7.697 \quad -65.297)$$

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

$$I_2 = 2.51 - 4.764i$$

$$F(I_2) = (5.385 \quad -62.221)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = 0.707 - 2.228i$$

$$F(I_3) = (2.338 \quad -72.396)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{R_4 - i \cdot X_{C3}}{R_4 + R_3 + i \cdot (-X_{C3})}$$

$$I_4 = 0.159 - 2.057i$$

$$F(I_4) = (2.063 \quad -85.586)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 0.548 - 0.172i$$

$$F(I_5) = (0.575 \quad -17.388)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ $I_3 - I_4 - I_5 = 0$ $I_2 + I_5 + I_4 - I_1 = 0$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [R_1 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_M)] + U - I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M)] = 3.553i \times 10^{-14}$$

$$I_2 \cdot [R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M)] - I_4 \cdot R_3 - I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2} + i \cdot X_M + i \cdot X_{L3}) = -1.421 \times 10^{-13} - 3.624i \times 10^{-13}$$

$$I_4 \cdot R_3 - I_5 \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3}) = -1.199 \times 10^{-14} - 1.066i \times 10^{-14}$$

$$\mathbf{S}_{\mathbf{M1}} := -\mathbf{I}_1 \cdot \overline{\mathbf{I}_2} \cdot \mathbf{i} \cdot \mathbf{X}_{\mathbf{M}} \quad \mathbf{S}_{\mathbf{M1}} = -55.595 - 1.035\mathbf{i} \times 10^3 \quad \mathbf{F}(\mathbf{S}_{\mathbf{M1}}) = \begin{pmatrix} 1.036 \times 10^3 & -93.076 \end{pmatrix}$$

$$S_{M2} := -I_1 \cdot I_2 \cdot i \cdot X_M \quad S_{M2} = 55.595 - 1.035i \times 10^3 \quad F(S_{M2}) = \begin{pmatrix} 1.036 \times 10^3 & -86.924 \end{pmatrix}$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 541.423 + 547.058i$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 541.423$$

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

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

$$Q = 547.058i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -139.849 - 64.333i$$

$$F(\phi_b) = (153.936 \quad -155.297)$$

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

$$\phi_c = -123.765 - 99.295i$$

$$F(\phi_c) = (158.674 \quad -141.26)$$

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

$$\phi_d = -106.198 - 132.644i$$

$$F(\phi_d) = (169.919 \quad -128.682)$$

$$\phi_{d'} := \phi_d + I_2 \cdot i \cdot X_{L2}$$

$$\phi_{d'} = 108.184 - 19.712i$$

$$F(\phi_{d'}) = (109.965 \quad -10.327)$$

$$\phi_e := \phi_{d'} - I_1 \cdot i \cdot X_M$$

$$\phi_e = -66.627 - 100.129i$$

$$F(\phi_e) = (120.27 \quad -123.64)$$

$$\phi_{e'} := \phi_e - I_2 \cdot i \cdot X_M$$

$$\phi_{e'} = -185.728 - 162.869i$$

$$F(\phi_{e'}) = (247.025 \quad -138.752)$$

$$\phi_1 := \phi_{e'} + I_1 \cdot i \cdot X_{L1}$$

$$\phi_1 = 93.969 - 34.202i$$

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

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

$$\phi_{1'} = -2.842 \times 10^{-14} - 3.553i \times 10^{-14}$$

$$\phi_f := \phi_c + I_3 \cdot i \cdot X_{L3}$$

$$\phi_f = -12.346 - 63.942i$$

$$F(\phi_f) = (65.123 \quad -100.928)$$

$$\phi_n := \phi_f + I_4 \cdot R_3$$

$$\phi_n = -10.917 - 82.452i$$

$$F(\phi_n) = (83.172 \quad -97.543)$$

$$\phi_e := \phi_n + I_3 \cdot (-i \cdot X_{C2})$$

$$\phi_e = -66.627 - 100.129i$$

$$F(\phi_e) = (120.27 \quad -123.64)$$

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

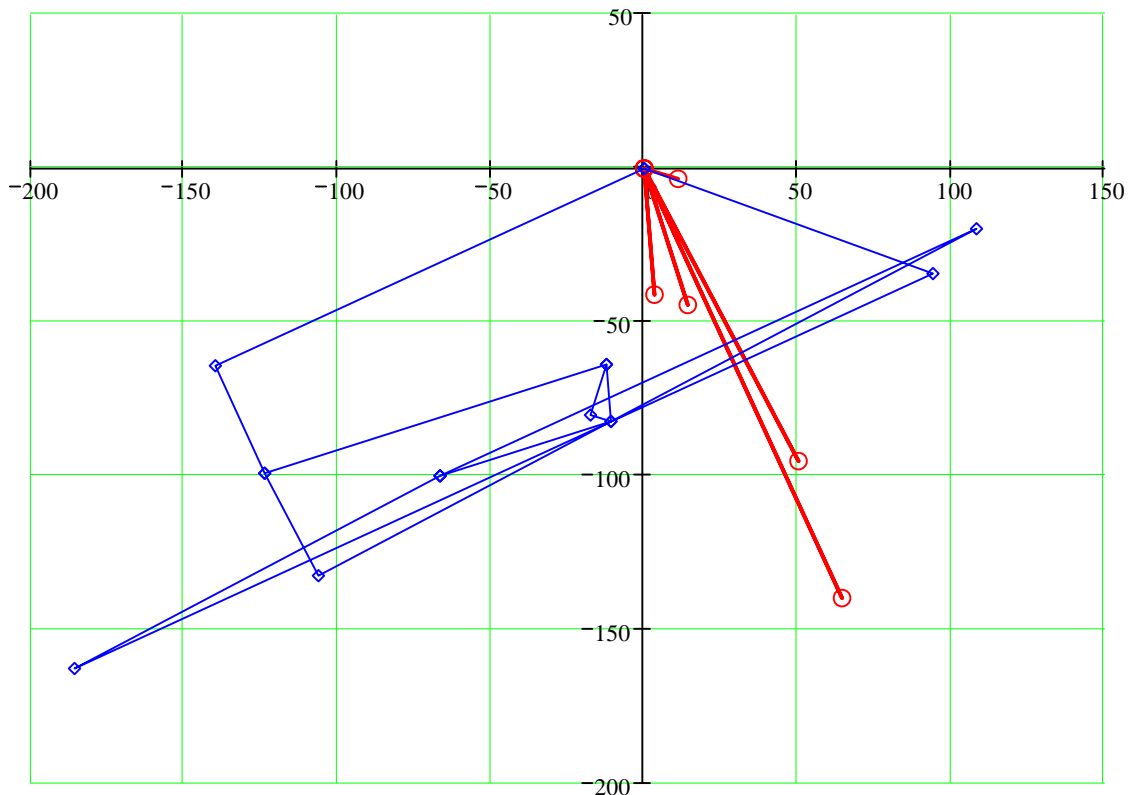
$$\phi_m = -17.497 - 80.392i$$

$$F(\phi_m) = (82.274 \quad -102.279)$$

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

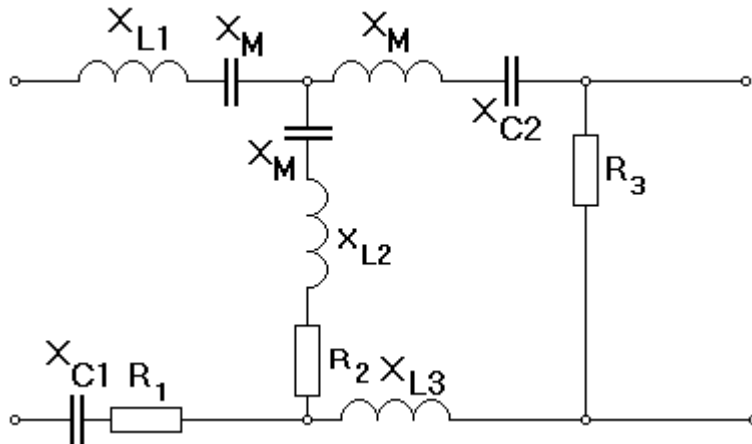
$$\phi_n = -10.917 - 82.452i$$

$$F(\phi_n) = (83.172 \quad -97.543)$$



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

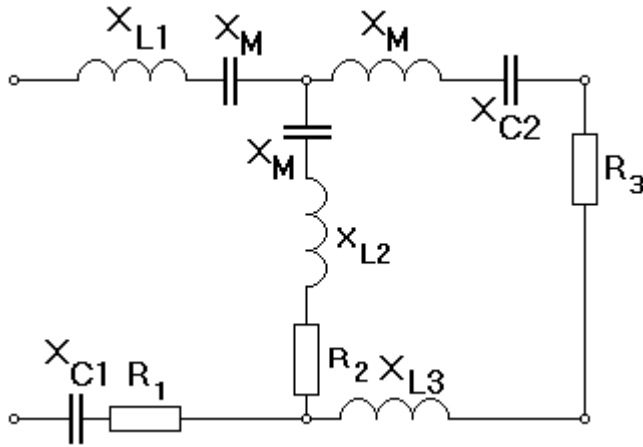
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполюсника A, B, C, D



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

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

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



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

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M) \rightarrow 7 + 20 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + i \cdot (X_{L3} - X_{C2} + X_M) \rightarrow 9 + 50 \cdot i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 9.288 + 9.366i \quad Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 16.033 + 46.626i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_{10}} \quad I_{10} = 3.175 - 6.884i \quad F(I_{10}) = (7.581 \quad -65.239)$$

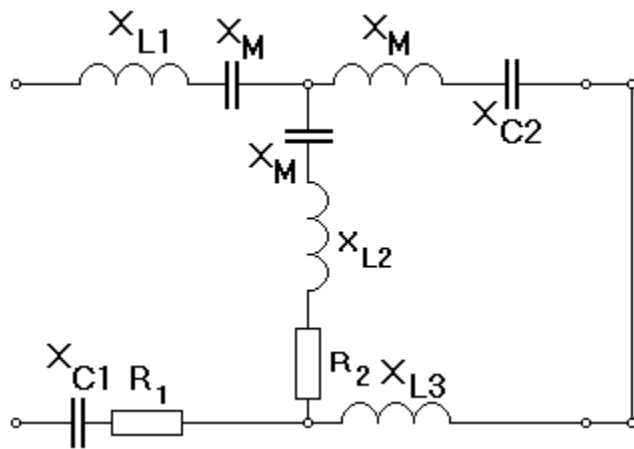
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = 0.704 - 2.124i \quad F(I_{30}) = (2.237 \quad -71.655)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot R_3 \quad U_{20} = 6.337 - 19.112i \quad F(U_{20}) = (20.135 \quad -71.655)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 3.081 + 3.895i \quad F(A) = (4.966 \quad 51.655)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.374 + 0.042i \quad F(C) = (0.377 \quad 6.415)$$

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



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

$$Z_2 := R_2 + i \cdot (X_{L2} - X_M) \rightarrow 7 + 20 \cdot i$$

$$Z_3 := i \cdot (X_{L3} - X_{C2} + X_M) \rightarrow 50 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 8.536 + 9.639i$$

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

$$I_{1K} = 2.85 - 7.225i$$

$$F(I_{1K}) = (7.767 \quad -68.474)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

$$I_{3K} = 0.323 - 2.317i$$

$$F(I_{3K}) = (2.339 \quad -82.053)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}}$$

$$B = 20.033 + 37.762i$$

$$F(B) = (42.747 \quad 62.053)$$

$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}}$$

$$D = 3.227 + 0.78i$$

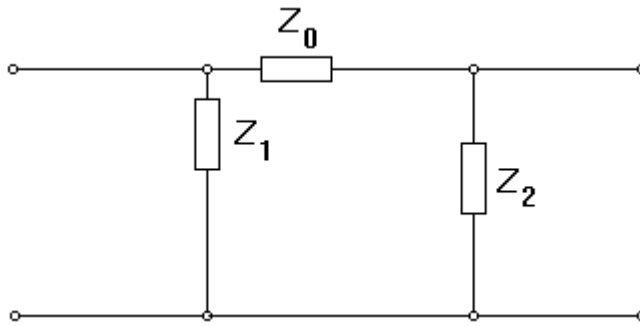
$$F(D) = (3.32 \quad 13.579)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (4.966 \quad 51.655) \quad F(B) = (42.747 \quad 62.053)$$

$$F(C) = (0.377 \quad 6.415) \quad F(D) = (3.32 \quad 13.579)$$

Розрахувати параметри R, L, C віток схеми "П" заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = 20.033 + 37.762i \quad F(Z_0) = (42.747 \quad 62.053)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.041 - 0.037i \quad F(Y_1) = (0.055 \quad -42.763)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 0.103 - 3.047i \times 10^{-4} \quad F(Y_2) = (0.103 \quad -0.169)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = 20.033 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 37.762$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 13.3 + 12.3i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 13.3 \quad X_{L1} := \operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{L1} = 12.3$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 9.679 + 0.029i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 9.679 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 0.029$$

$$L_1 := \frac{X_{L1}}{\omega} \quad L_1 = 0.039$$

$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 9.088 \times 10^{-5}$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.12$$

