

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 745

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.

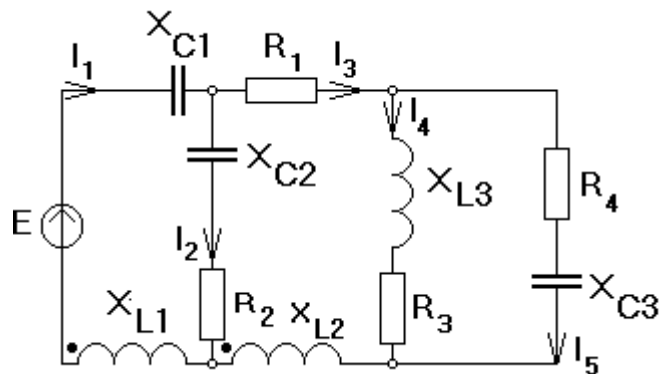
2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L_1 ТА L_2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

- 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" :

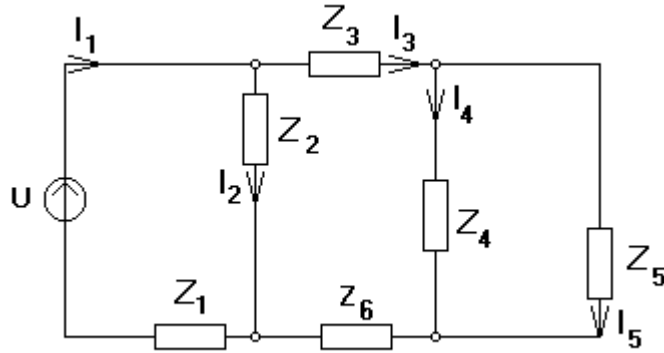
- 3.1. Розрахувати коефіцієнти A, B, C, D чотирьохполосника;
- 3.2. Розрахувати параметри R, L, C віток схеми заміщення.

$$\begin{aligned} E &:= 220 & \psi &:= 50 & R_1 &:= 16 & R_2 &:= 14 & R_3 &:= 12 & R_4 &:= 10 \\ X_{L1} &:= 45 & X_{L2} &:= 50 & X_{L3} &:= 55 & X_{C1} &:= 25 & X_{C2} &:= 30 & X_{C3} &:= 35 \\ X_M &:= 27 & f &:= 60 & & & & & & & & \\ U &:= E \cdot e^{j \cdot \psi \cdot \frac{\pi}{180}} & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & U = 141.413 + 168.53i & F(U) = (220 \ 50) \end{aligned}$$



Для електричного кола без взаємної індукції:

Розрахувати всі струми символьним методом



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

$$Z_4 := R_3 + i \cdot X_{L3} \rightarrow 12 + 55 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2}) \rightarrow 14 - 30 \cdot i$$

$$Z_5 := R_4 - i \cdot X_{C3} \rightarrow 10 - 35 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 \rightarrow 16$$

$$Z_6 := i \cdot X_{L2} \rightarrow 50 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{\left(\frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6 \right) \cdot Z_2}{Z_2 + \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 + Z_6} + Z_1 \quad Z_E = 19.249 + 1.462i$$

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

$$I_1 = 7.966 + 8.151i$$

$$F(I_1) = (11.397 \quad 45.658)$$

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

$$I_2 = 3.636 + 8.451i$$

$$F(I_2) = (9.2 \quad 66.718)$$

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

$$I_3 = 4.329 - 0.3i$$

$$F(I_3) = (4.34 \quad -3.964)$$

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

$$I_4 = -2.68 - 4.588i$$

$$F(I_4) = (5.313 \quad -120.292)$$

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

$$I_5 = 7.009 + 4.288i$$

$$F(I_5) = (8.217 \quad 31.454)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad I_2 + I_5 + I_4 - I_1 = 1.776i \times 10^{-15}$$

Перевірка за другим законом Кіргофа:

$$-I_1 \cdot [i \cdot (X_{L1} - X_{C1})] + U - I_2 \cdot (R_2 - i \cdot X_{C2}) = 2.132i \times 10^{-14}$$

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

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

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 2.5 \times 10^3 + 189.841i$$

$$P := (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 + (|I_3|)^2 \cdot R_1 \quad P = 2.5 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (-X_{C1} + X_{L1}) + (|I_2|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot (X_{L3}) + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 189.841$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

$$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot i \cdot X_{L1} \quad \phi_b = -366.775 + 358.451i \quad F(\phi_b) = (512.846 \quad 135.658)$$

$$\phi_c := \phi_b + I_2 \cdot R_2 \quad \phi_c = -315.866 + 476.758i \quad F(\phi_c) = (571.9 \quad 123.526)$$

$$\phi_d := \phi_c + I_2 \cdot (-i \cdot X_{C2}) \quad \phi_d = -62.35 + 367.669i \quad F(\phi_d) = (372.918 \quad 99.625)$$

$$\phi_l := \phi_d + I_1 \cdot (-i \cdot X_{C1}) \quad \phi_l = 141.413 + 168.53i \quad F(\phi_l) = (220 \quad 50)$$

$$\phi_{l'} := \phi_l - U \quad \phi_{l'} = 2.842 \times 10^{-14}$$

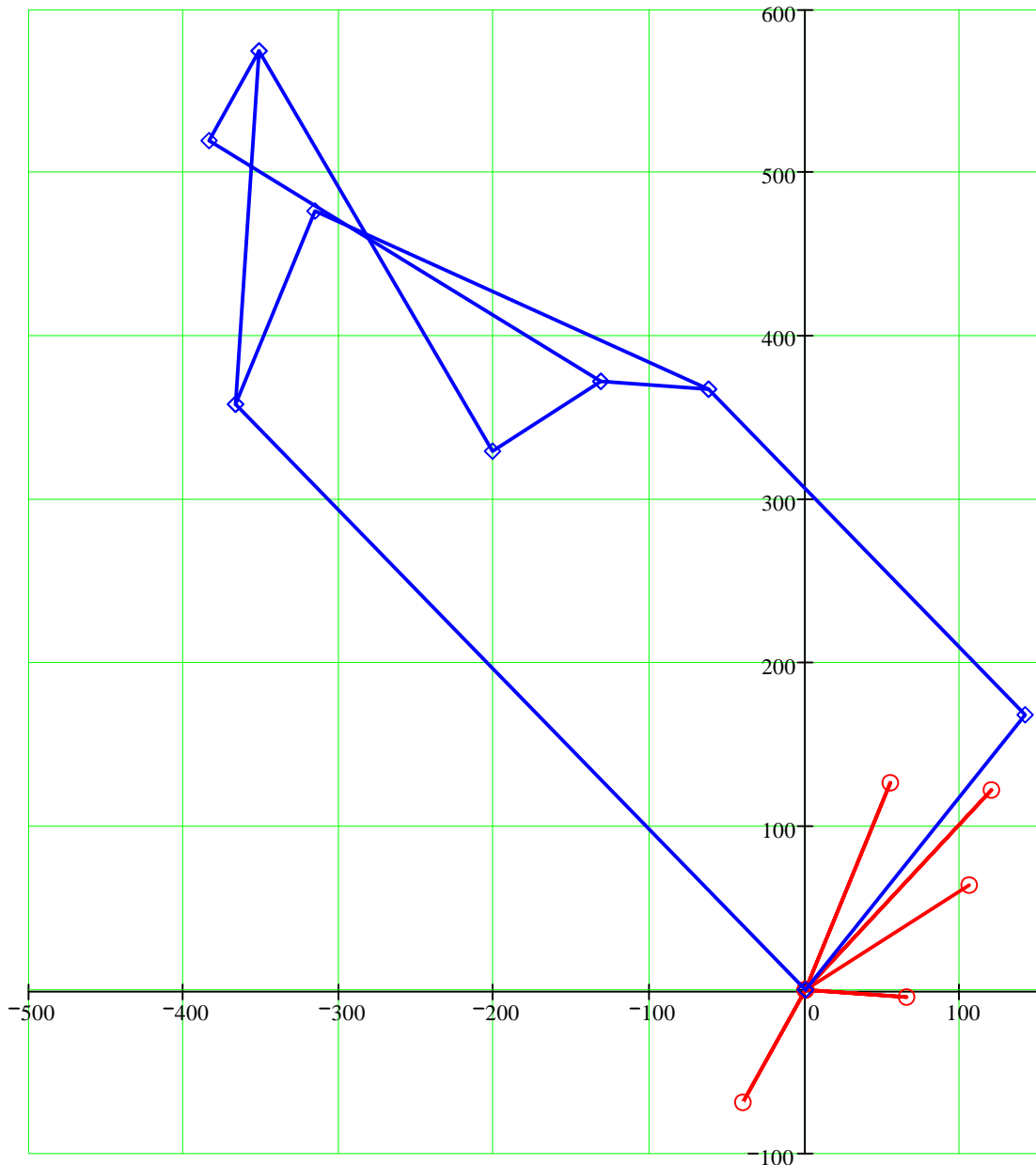
$$\phi_e := \phi_b + I_3 \cdot i \cdot X_{L2} \quad \phi_e = -351.775 + 574.914i \quad F(\phi_e) = (673.997 \quad 121.461)$$

$$\phi_m := \phi_e + I_4 \cdot R_3 \quad \phi_m = -383.934 + 519.864i \quad F(\phi_m) = (646.269 \quad 126.447)$$

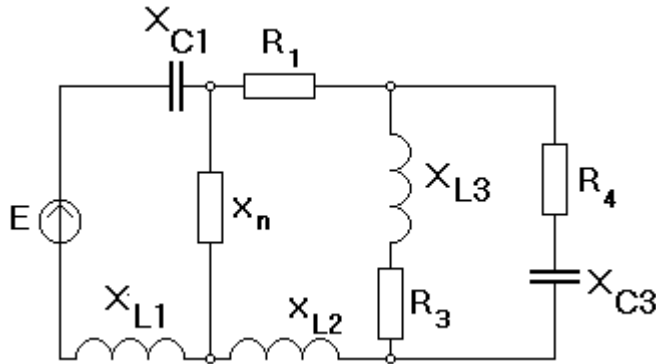
$$\phi_n := \phi_m + I_4 \cdot i \cdot X_{L3} \quad \phi_n = -131.619 + 372.469i \quad F(\phi_n) = (395.04 \quad 109.462)$$

$$\phi_k := \phi_e + I_5 \cdot (-i \cdot X_{C3}) \quad \phi_k = -201.71 + 329.593i \quad F(\phi_k) = (386.418 \quad 121.467)$$

$$\phi_n := \phi_k + I_5 \cdot R_4 \quad \phi_n = -131.619 + 372.469i \quad F(\phi_n) = (395.04 \quad 109.462)$$



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



$$Z_E := \frac{(R_3 + i \cdot X_{L3}) \cdot (R_4 - i \cdot X_{C3})}{R_3 + R_4 + i \cdot (X_{L3} - X_{C3})} + i \cdot X_{L2} + R_1 \quad Z_E = 69.835 + 6.968i$$

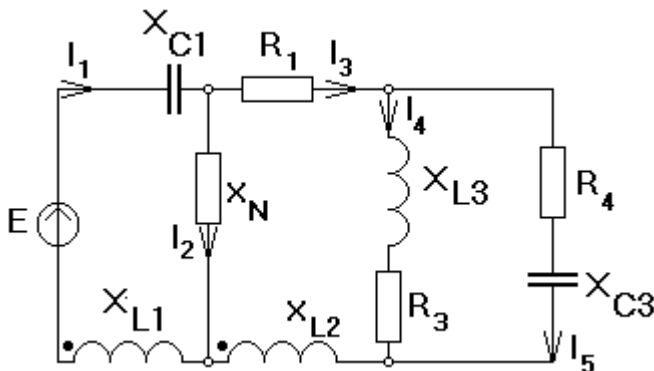
$$Z_E = R_E + j \cdot X_E \quad R_E := \text{Re}(Z_E) \quad R_E = 69.835 \quad X_E := \text{Im}(Z_E) \quad X_E = 6.968$$

За умовою резонансу:

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

$$B_n := \frac{-X_E}{X_E^2 + R_E^2} \quad B_n = -1.415 \times 10^{-3} \quad \text{Реактивний опір вітки: } X_n := \frac{1}{B_n} \quad X_n = -706.836$$

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



$$\begin{aligned} Z_1 &:= -X_{C1} \cdot i + X_{L1} \cdot i & Z_1 &= 20i \\ Z_3 &:= R_1 + X_{L2} \cdot i & Z_3 &= 16 + 50i \\ Z_4 &:= R_3 + X_{L3} \cdot i & Z_4 &= 12 + 55i \\ Z_5 &:= R_4 - X_{C3} \cdot i & Z_5 &= 10 - 35i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_4 \cdot Z_5}{Z_4 + Z_5} + Z_3 & Z_{345} &= 69.835 + 6.968i \end{aligned}$$

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

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(61734 \cdot X_N^2 + 4600509 \cdot i \cdot X_N + 23840 \cdot i \cdot X_N^2 + 87082180 \cdot i)}{(4354109 + 12320 \cdot X_N + 884 \cdot X_N^2)}$$

$$X_N := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{solve, } X_N \\ \text{float, 20} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -21.274148366405967766 \\ -171.70022243896315975 \end{pmatrix} \quad X_N := \begin{pmatrix} X_{N0} \\ X_{N1} \end{pmatrix}$$

Отже резонанс кола може бути при реактивному опорі у другій вітці $X_N = \begin{pmatrix} -21.274 \\ -171.7 \end{pmatrix}$ який носить ємнісний характер ($X_{N0} = -21.274$), ($X_{N1} = -171.7$)

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = -21.274 \quad Z_{VX}(X_n) = 6.22$$

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

$$I_1 = 22.736 + 27.096i$$

$$F(I_1) = (35.371 \quad 50)$$

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

$$I_2 = 13.452 + 32.12i$$

$$F(I_2) = (34.823 \quad 67.275)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 9.284 - 5.024i$$

$$F(I_3) = (10.556 \quad -28.423)$$

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

$$I_4 = -10.554 - 7.458i$$

$$F(I_4) = (12.923 \quad -144.751)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 19.838 + 2.434i$$

$$F(I_5) = (19.986 \quad 6.995)$$

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

$$S_1 = 7.782 \times 10^3$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 7.782 \times 10^3$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 1.819 \times 10^{-12}$$

При $X_n := X_{N1} \quad X_n = -171.7 \quad Z_{VX}(X_n) = 64.31$

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

$$I_1 = 2.199 + 2.621i$$

$$F(I_1) = (3.421 \quad 50)$$

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

$$I_2 = -0.725 + 1.129i$$

$$F(I_2) = (1.342 \quad 122.725)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 2.924 + 1.492i$$

$$F(I_3) = (3.283 \quad 27.026)$$

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

$$I_4 = 0.049 - 4.019i$$

$$F(I_4) = (4.019 \quad -89.302)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = 2.875 + 5.511i$$

$$F(I_5) = (6.216 \quad 62.445)$$

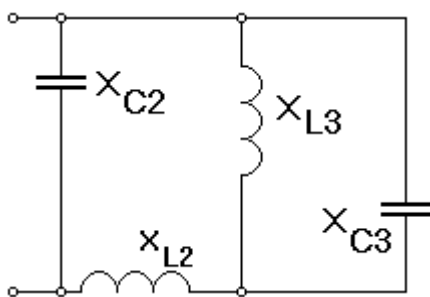
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$$

$$S_1 = 752.601$$

$$P := (|I_3|)^2 \cdot R_1 + (|I_4|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 752.601$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (X_{L2}) + (|I_4|)^2 \cdot X_{L3} + (|I_5|)^2 \cdot (-X_{C3}) \quad Q = 2.274 \times 10^{-13}$$

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



$$L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \rightarrow \frac{5}{12 \cdot \pi}$$

$$L_2 = 0.133$$

$$L_3 := \frac{X_{L3}}{\omega} \rightarrow \frac{11}{24 \cdot \pi}$$

$$L_3 = 0.146$$

$$C_2 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C2}} \rightarrow \frac{1}{3600 \cdot \pi}$$

$$C_2 = 8.842 \times 10^{-5}$$

$$C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}} \rightarrow \frac{1}{4200 \cdot \pi}$$

$$C_3 = 7.579 \times 10^{-5}$$

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

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

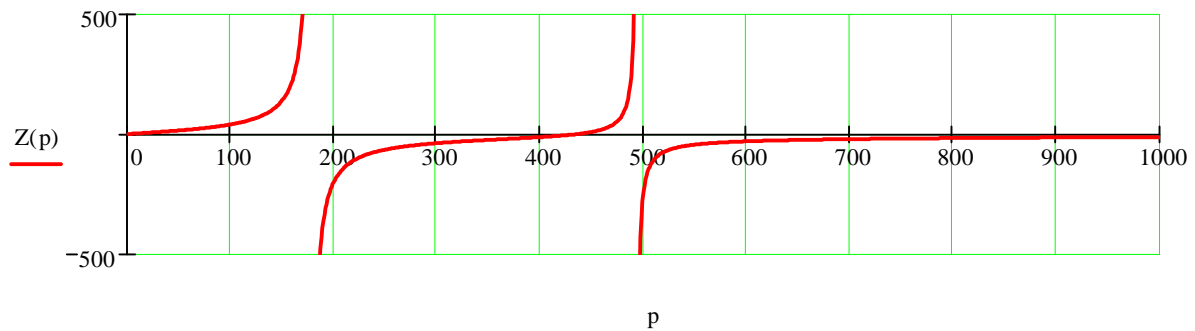
Знаходимо нулі:

$$\omega := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 435.8062 \\ -435.8062 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega = \begin{pmatrix} 435.806 \\ -435.806 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\omega := (\omega_0 \ \omega_2) \quad \omega = (435.806 \ 0)$$

Знаходимо полюси:

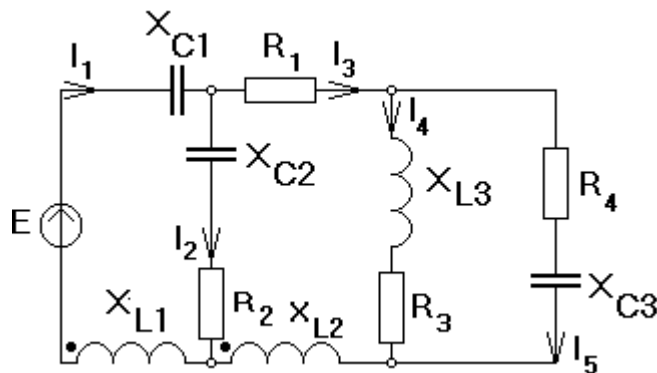
$$\omega_1 := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 11} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 493.48977643 \\ -493.48977643 \\ 177.95589545 \\ -177.95589545 \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 493.49 \\ -493.49 \\ 177.956 \\ -177.956 \end{pmatrix} \quad \omega_1 := \begin{pmatrix} \omega_{10} \\ \omega_{12} \end{pmatrix} \quad \omega_1 = \begin{pmatrix} 493.49 \\ 177.956 \end{pmatrix}$$



При наявності магнітного зв'язку між індуктивними елементами

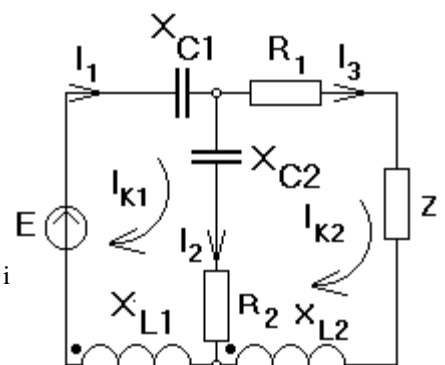
- 1) Перетворити схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;
- 2) Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей, визначити активну і реактивну потужності магнітного зв'язку;

імпеданс



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

$$Z = 53.835 - 43.032i$$



$$Z_{11} := R_2 + i \cdot (X_{L1} - X_{C1} - X_{C2}) \rightarrow 14 - 10 \cdot i$$

$$Z_{12} := R_2 + i \cdot (-X_{C2} - X_M) \rightarrow 14 - 57 \cdot i$$

$$Z_{22} := R_2 + R_1 + i \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + Z \text{ float, 7} \rightarrow 83.83484 - 23.03167 \cdot i$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{K1}, I_{K2}) \rightarrow \begin{pmatrix} 4.1844208204741048664 + 2.2647017993304164503 \cdot i \\ 2.7116122041803174861 - 1.7218760615723063853 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$I_{K1} = 4.184 + 2.265i$$

$$I_{K2} = 2.712 - 1.722i$$

$$I_1 := I_{K1}$$

$$I_1 = 4.184 + 2.265i$$

$$F(I_1) = (4.758 \ 28.423)$$

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

$$I_2 = 1.473 + 3.987i$$

$$F(I_2) = (4.25 \ 69.724)$$

$$I_3 := I_{K2}$$

$$I_3 = 2.712 - 1.722i$$

$$F(I_3) = (3.212 \ -32.416)$$

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

$$I_4 = -3.362 - 2.04i$$

$$F(I_4) = (3.933 \ -148.744)$$

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

$$I_5 = 6.073 + 0.319i$$

$$F(I_5) = (6.082 \quad 3.003)$$

Перевірка за першим законом Кіргофа:

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

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

$$S_{M1} = -360.343 + 201.069i$$

$$F(S_{M1}) = (412.645 \quad 150.839)$$

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

$$S_{M2} = 360.343 + 201.069i$$

$$F(S_{M2}) = (412.645 \quad 29.161)$$

Перевірка за балансом потужностей

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

$$S_1 = 973.402 + 384.941i$$

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

$$P = 973.402$$

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

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

$$Q = 384.941i$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Знаходимо потенціали точок:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -101.912 + 188.299i$$

$$F(\phi_b) = (214.109 \quad 118.423)$$

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

$$\phi_{b'} = -55.421 + 261.512i$$

$$F(\phi_{b'}) = (267.32 \quad 101.965)$$

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

$$\phi_c = -34.802 + 317.325i$$

$$F(\phi_c) = (319.227 \quad 96.259)$$

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

$$\phi_d = 84.796 + 273.14i$$

$$F(\phi_d) = (286 \quad 72.753)$$

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

$$\phi_1 = 141.413 + 168.53i$$

$$F(\phi_1) = (220 \quad 50)$$

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

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

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

$$\phi_{e'} = 30.673 + 397.093i$$

$$F(\phi_{e'}) = (398.276 \quad 85.583)$$

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

$$\phi_e = -30.474 + 510.072i$$

$$F(\phi_e) = (510.982 \quad 93.419)$$

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

$$\phi_m = -70.815 + 485.587i$$

$$F(\phi_m) = (490.723 \quad 98.297)$$

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

$$\phi_n = 41.41 + 300.69i$$

$$F(\phi_n) = (303.528 \quad 82.159)$$

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

$$\phi_k = -19.324 + 297.504i$$

$$F(\phi_k) = (298.131 \quad 93.716)$$

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

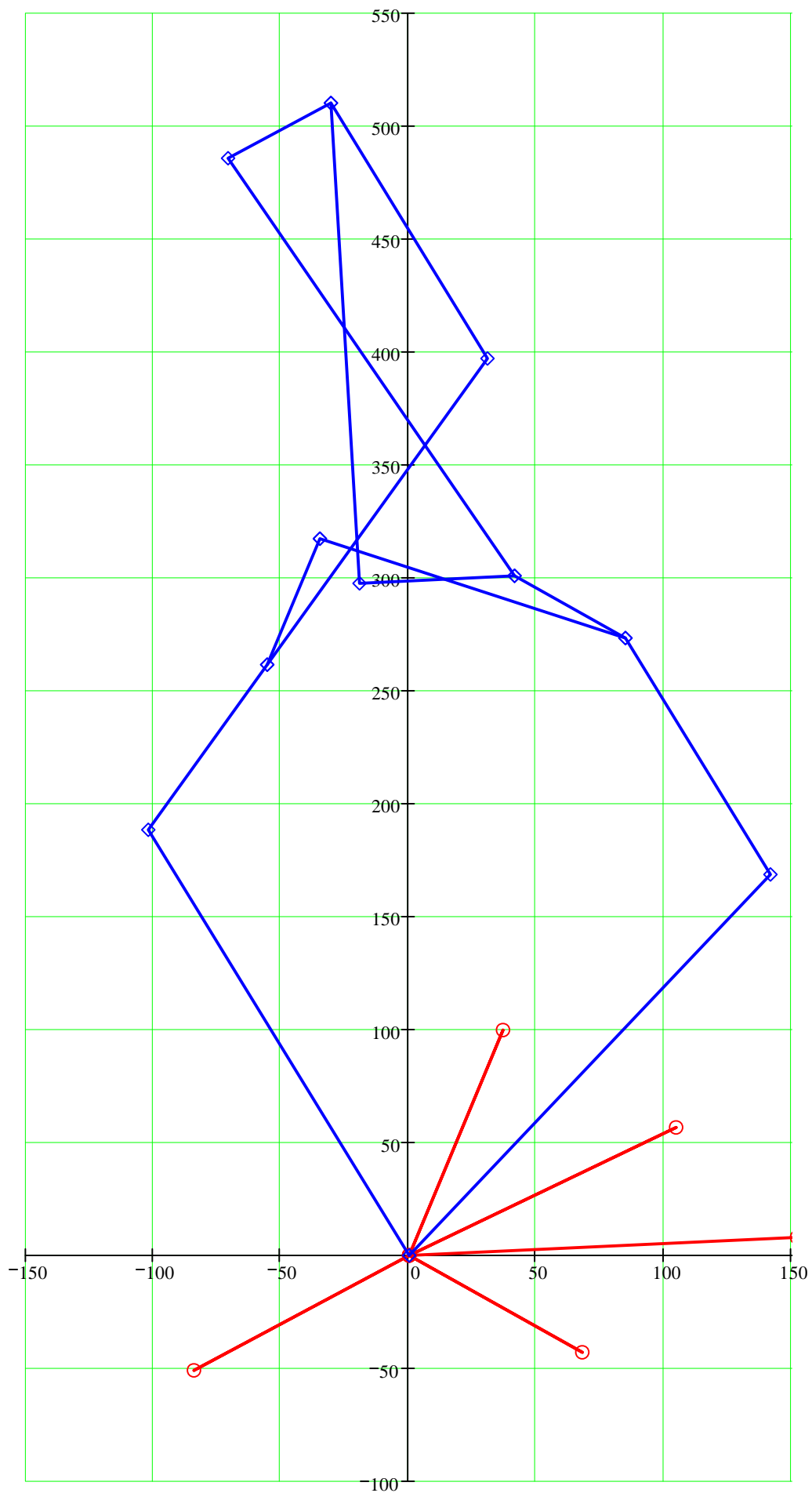
$$\phi_n = 41.41 + 300.69i$$

$$F(\phi_n) = (303.528 \quad 82.159)$$

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

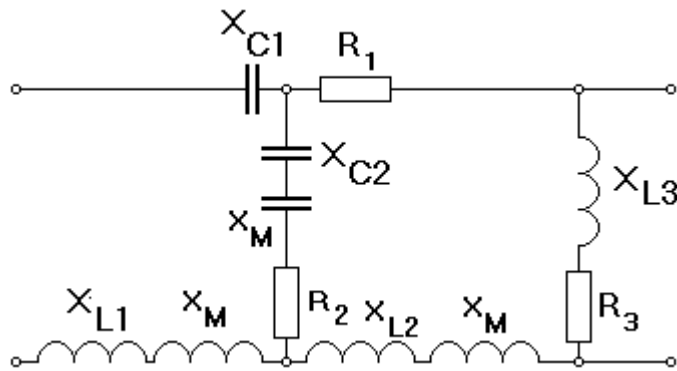
$$\phi_d = 84.796 + 273.14i$$

$$F(\phi_d) = (286 \quad 72.753)$$



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":

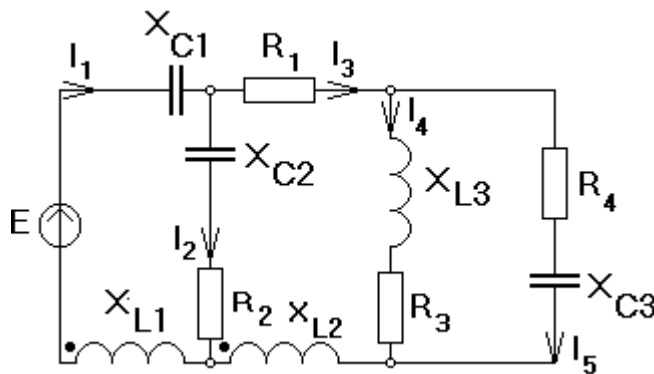
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 47 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 14 - 57 \cdot i$$

$$Z_3 := R_3 + R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_{L3} + X_M) \rightarrow 28 + 132 \cdot i$$

$$Z_E := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_E = 47.553 - 31.917i$$

$$I_{10} := \frac{U_{10}}{Z_E} \quad I_{10} = 0.41 + 3.819i \quad F(I_{10}) = (3.841 \quad 83.869)$$

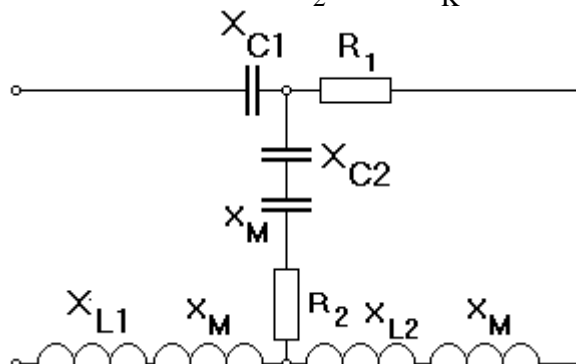
$$I_{30} := I_{10} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{30} = 1.575 - 2.097i \quad F(I_{30}) = (2.623 \quad -53.083)$$

$$U_{20} := I_{30} \cdot (R_3 + i \cdot X_{L3}) \quad U_{20} = 134.244 + 61.487i \quad F(U_{20}) = (147.655 \quad 24.609)$$

$$A := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad A = 1.346 + 0.639i \quad F(A) = (1.49 \quad 25.391)$$

$$C := \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad C = 0.013 + 0.022i \quad F(C) = (0.026 \quad 59.26)$$

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



$$Z_1 := i \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \rightarrow 47 \cdot i$$

$$Z_2 := R_2 - i \cdot (X_{C2} + X_M) \rightarrow 14 - 57 \cdot i$$

$$Z_3 := R_1 + i \cdot (X_{L2} + X_M) \rightarrow 16 + 77 \cdot i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 109.008 - 20.138i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 0.978 + 1.727i \quad F(I_{1K}) = (1.985 \quad 60.467)$$

$$I_{3K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{3K} = 2.101 - 2.454i \quad F(I_{3K}) = (3.231 \quad -49.424)$$

$$B := \frac{U_K}{I_{3K}} \quad B = -11.149 + 67.177i \quad F(B) = (68.096 \quad 99.424)$$

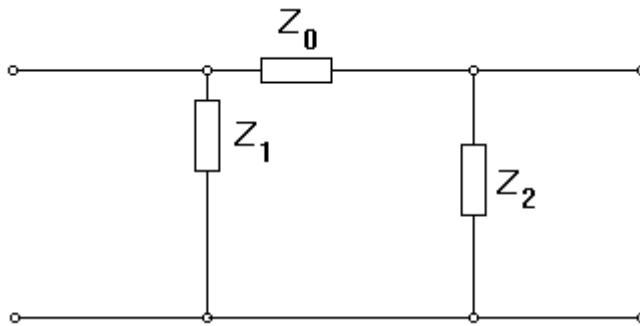
$$D := \frac{I_{1K}}{I_{3K}} \quad D = -0.209 + 0.578i \quad F(D) = (0.614 \quad 109.891)$$

Перевірка $A \cdot D - B \cdot C = 1$

$$F(A) = (1.49 \quad 25.391) \quad F(B) = (68.096 \quad 99.424)$$

$$F(C) = (0.026 \quad 59.26) \quad F(D) = (0.614 \quad 109.891)$$

Розрахувати параметри віток схеми П заміщення;



$$Z_0 := B \quad Z_0 = -11.149 + 67.177i \quad F(Z_0) = (68.096 \quad 99.424)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B} \quad Y_1 = 0.011 + 0.016i \quad F(Y_1) = (0.02 \quad 55.038)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B} \quad Y_2 = 8.424 \times 10^{-3} - 6.549i \times 10^{-3} \quad F(Y_2) = (0.011 \quad -37.864)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0) \quad R_0 = -11.149 \quad X_{L0} := \operatorname{Im}(Z_0) \quad X_{L0} = 67.177$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1} \quad Z_1 = 29.122 - 41.65i \quad R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 29.122 \quad X_{C1} := -\operatorname{Im}(Z_1) \quad X_{C1} = 41.65$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2} \quad Z_2 = 73.99 + 57.526i \quad R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 73.99 \quad X_{L2} := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_{L2} = 57.526$$

$$C_1 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad C_1 = 6.369 \times 10^{-5} \quad L_2 := \frac{X_{L2}}{\omega} \quad L_2 = 0.153$$

$$L_0 := \frac{X_{L0}}{\omega} \quad L_0 = 0.178$$