

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 281

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.

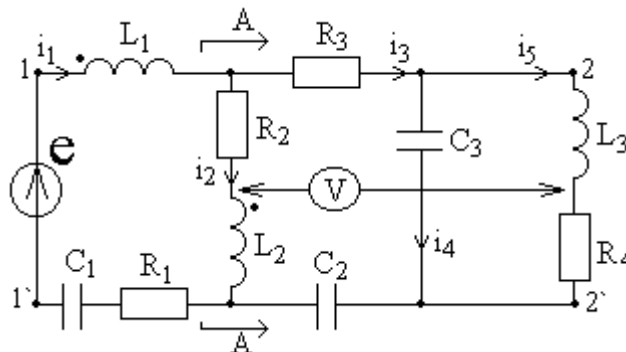
$$E := 120 \quad \psi := -30 \quad R_1 := 7 \quad R_2 := 9 \quad R_3 := 11 \quad R_4 := 13 \quad X_{L1} := 60 \quad X_{L2} := 50 \quad X_{L3} := 43$$

$$X_{C1} := 20 \quad X_{C2} := 15 \quad X_{C3} := 13 \quad X_M := 32 \quad f := 100$$

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

$$U = 103.923 - 60i$$

$$F(U) = (120 \quad -30)$$



Символічний метод

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

$$Z_1 = 7 + 40i$$

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

$$Z_2 = 9 + 50i$$

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

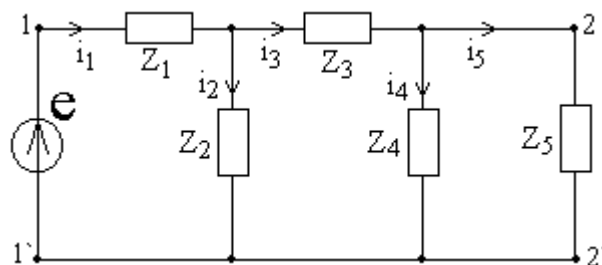
$$Z_3 = 11 - 15i$$

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

$$Z_4 = -13i$$

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

$$Z_5 = 13 + 43i$$



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

$$Z_{345} = 13.055 - 32.743i$$

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

$$Z_E = 64.225 + 11.459i$$

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

$$I_1 = 1.407 - 1.185i$$

$$F(I_1) = (1.839 \quad -40.117)$$

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

$$I_2 = -1.929 - 1.281i$$

$$F(I_2) = (2.315 \quad -146.42)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 3.336 + 0.095i$$

$$F(I_3) = (3.337 \quad 1.638)$$

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

$$I_4 = 4.537 + 0.657i$$

$$F(I_4) = (4.585 \quad 8.245)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -1.202 - 0.562i$$

$$F(I_5) = (1.327 \quad -154.934)$$

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 :

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

$$S_r = 217.295 + 38.771i$$

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

$$P = 217.295$$

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

$$Q = 38.771i$$

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

$$V = 87.451$$

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

$$V = 87.451$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -23.704 - 28.133i$$

$$F(\phi_b) = (36.788 \quad -130.117)$$

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

$$\phi_c = -13.858 - 36.429i$$

$$F(\phi_c) = (38.976 \quad -110.827)$$

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

$$\phi_d = 50.171 - 132.873i$$

$$F(\phi_d) = (142.03 \quad -69.314)$$

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

$$\phi_e = 32.811 - 144.399i$$

$$F(\phi_e) = (148.079 \quad -77.198)$$

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

$$\phi_1 = 103.923 - 60i$$

$$F(\phi_1) = (120 \quad -30)$$

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

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

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

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

$$\phi_k = -12.427 - 86.462i$$

$$F(\phi_k) = (87.351 \quad -98.179)$$

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

$$\phi_z = -3.88 - 145.448i$$

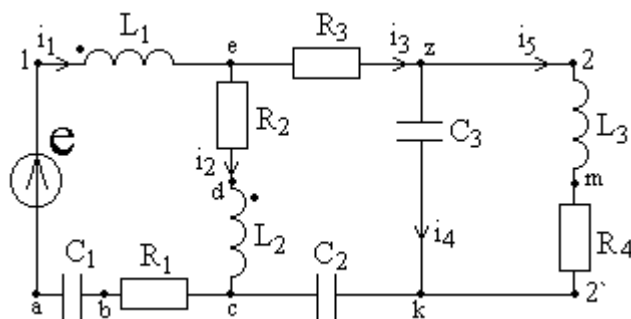
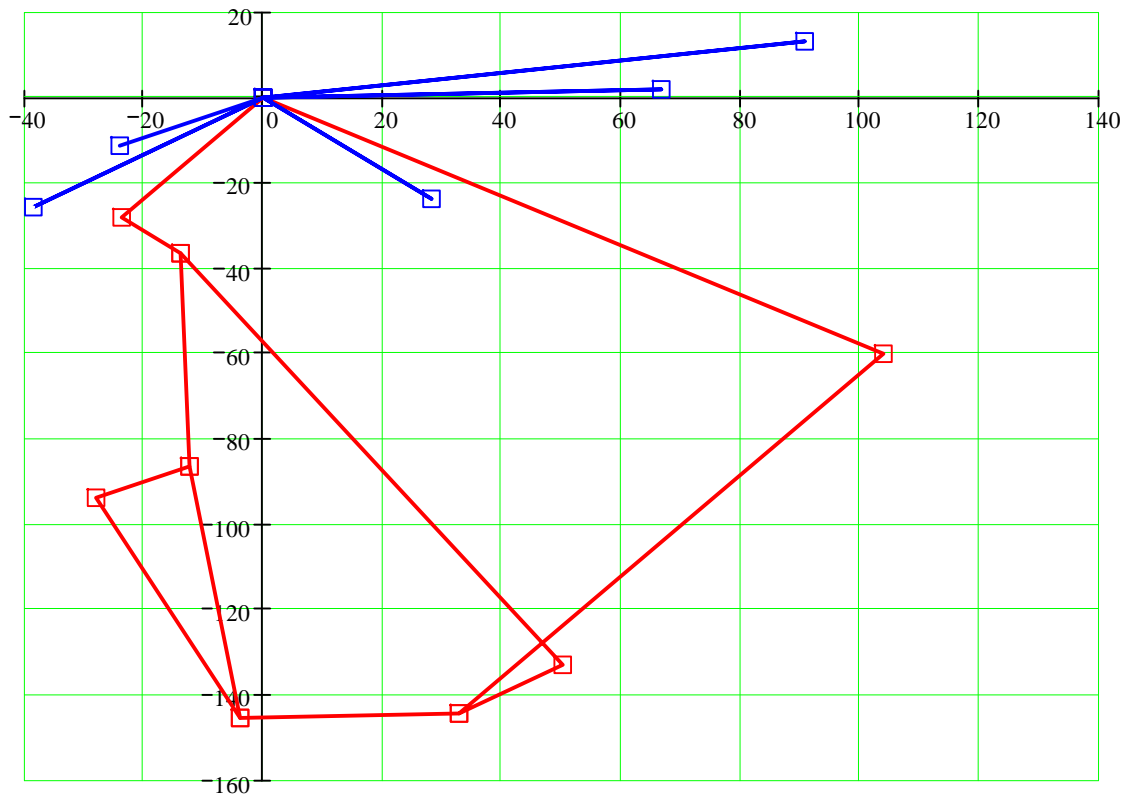
$$F(\phi_z) = (145.499 \quad -91.528)$$

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

$$\phi_m = -28.051 - 93.77i$$

$$F(\phi_m) = (97.875 \quad -106.654)$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



Прийнявши активний опір R_2 за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів.

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

$$Z_3 = -15i$$

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

$$Z_4 = 11 + 43i$$

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

$$Z_5 = 13 - 13i$$

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

$$Z_E = 19.87 - 22.504i$$

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

$$R_E = 19.87$$

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

$$X_E = -22.504$$

Умова резонансу струмів на ділянці "ab" :

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

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

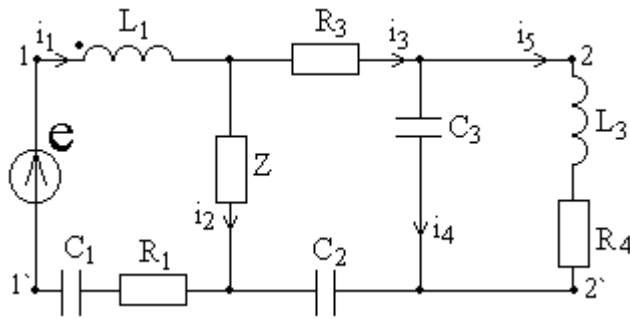
$$B_2 = 0.025$$

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

$$X_2 = 40.048$$

Додатний знак свідчить про індуктивний характер опору

Розрахувати струми для резонансного стану кола;



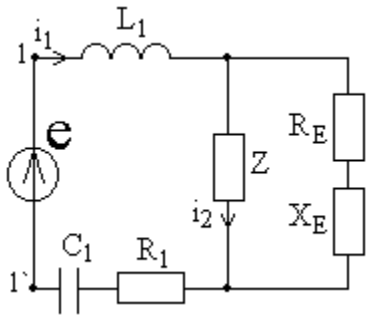
$$Z := \frac{(R_4 + X_{L3} \cdot i) \cdot (-X_{C3} \cdot i)}{R_4 + X_{L3} \cdot i - X_{C3} \cdot i} + R_3 - X_{C2} \cdot i$$

$$Z = 13.055 - 32.743i$$

$$Z = R_E - X_E \cdot i$$

$$R_E := \text{Re}(Z) \quad R_E = 13.055$$

$$X_E := |\text{Im}(Z)| \quad X_E = 32.743$$



За умовою резонансу: $B_X = B_E = \frac{-X_E}{R_E^2 + X_E^2}$

$$B_X := \frac{-X_E}{R_E^2 + X_E^2} \quad B_X = -0.026$$

Реактивний опір вітки: $X := \left| \frac{1}{B_X} \right| \quad X = 37.948$

Розрахувати струми для резонансного стану кола

$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i \quad Z_1 = 7 + 40i$$

$$Z_3 := R_3 - X_{C2} \cdot i \quad Z_3 = 11 - 15i$$

$$Z_4 := -X_{C3} \cdot i \quad Z_4 = -13i$$

$$Z_5 := R_4 + X_{L3} \cdot i \quad Z_5 = 13 + 43i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \quad Z_{345} = 13.055 - 32.743i$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left(\frac{35002}{1069} + \frac{13956}{1069} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left(\frac{13956}{1069} - \frac{35002}{1069} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 7 + 40 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(-490028 \cdot X_N + 21439 \cdot X_N^2 + 9297820 - 1471900 \cdot i \cdot X_N + 7758 \cdot i \cdot X_N^2 + 53130400 \cdot i)}{(1328260 - 70004 \cdot X_N + 1069 \cdot X_N^2)}$$

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

$$X_{VX}(X_N) := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 2 \cdot \frac{(-735950 \cdot X_N + 3879 \cdot X_N^2 + 26565200)}{(1328260 - 70004 \cdot X_N + 1069 \cdot X_N^2)}$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, } 50 \end{array} \right. \rightarrow \left(\begin{array}{l} 141.23784549715605641427610109041013390271925798216 \\ 48.488888197095039228930911026114743643039958310694 \end{array} \right)$$

Отже резонанс кола неможливий при будь-яких опорах у другій вітці, так як: $X_N = \begin{pmatrix} 141.238 \\ 48.489 \end{pmatrix}$

$$X_n := X_{N_0} \quad X_n = 141.238 \quad Z_{VX}(X_n) = 28.808$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 3.607 - 2.083i \quad F(I_1) = (4.165 \quad -30)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = -1.343 + 0.033i \quad F(I_2) = (1.344 \quad 178.6)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 4.951 - 2.116i \quad F(I_3) = (5.384 \quad -23.139)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = 7.091 - 2.105i \quad F(I_4) = (7.397 \quad -16.531)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -2.141 - 0.011i \quad F(I_5) = (2.141 \quad -179.71)$$

$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 499.856$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 499.856$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = -1.421 \times 10^{-13}$$

При $X_n := X_{N_1} \quad X_n = 48.489 \quad Z_{VX}(X_n) = 80.367$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 1.293 - 0.747i \quad F(I_1) = (1.493 \quad -30)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = -2.196 - 1.341i \quad F(I_2) = (2.573 \quad -148.6)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 3.489 + 0.594i \quad F(I_3) = (3.54 \quad 9.662)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = 4.669 + 1.362i \quad F(I_4) = (4.863 \quad 16.27)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -1.179 - 0.768i \quad F(I_5) = (1.407 \quad -146.909)$$

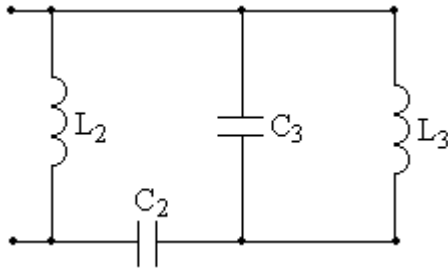
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 179.179$$

$$P := (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_3|)^2 \cdot R_3 + (|I_5|)^2 \cdot R_4 \quad P = 179.179$$

$$Q := (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + (|I_2|)^2 \cdot X_n + (|I_3|)^2 \cdot (-X_{C2}) + (|I_4|)^2 \cdot (-X_{C3}) + (|I_5|)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = 1.421 \times 10^{-14}$$

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

закоротити



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

$$L_3 = 0.068$$

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

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

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

$$C_3 = 1.224 \times 10^{-4}$$

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

$$L_2 = 0.08$$

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

Знаходимо нулі: $Z(p) = 0$

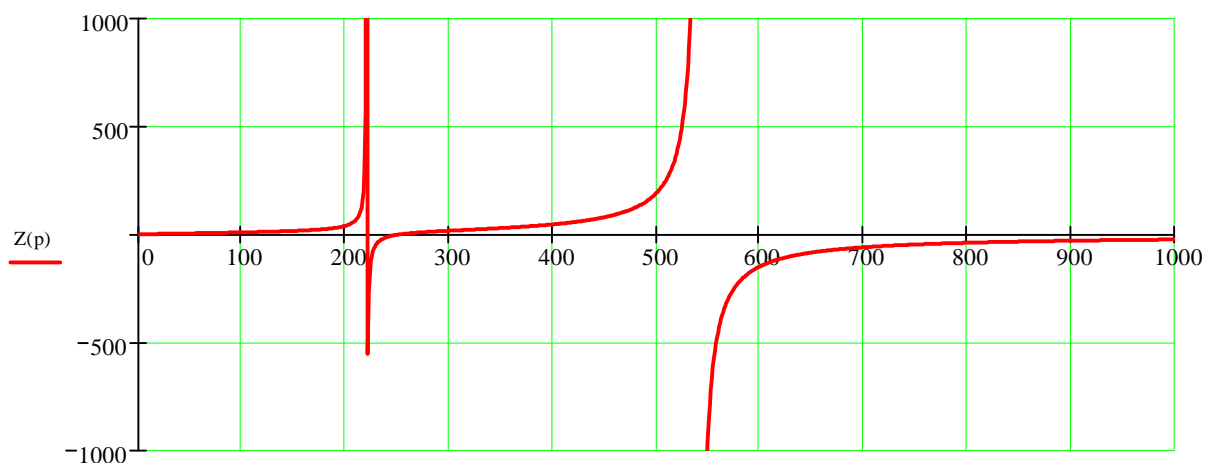
$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 252. \\ -252. \end{pmatrix}$$

$$w_1 := \begin{pmatrix} w_{10} \\ w_{11} \end{pmatrix} \quad w_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 252 \end{pmatrix}$$

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

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 540.3954782 \\ -540.3954782 \\ 220.0118669 \\ -220.0118669 \end{pmatrix}$$

$$w := \begin{pmatrix} w_0 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad w = \begin{pmatrix} 540.395 \\ 220.012 \end{pmatrix}$$



p

2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 ТА L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

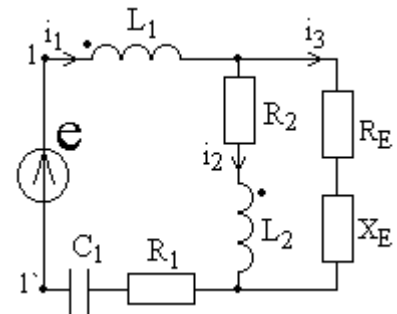
2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів, визначити покази вольтметра;

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).

Спростимо схему до двох незалежних контурів

$$\begin{aligned} Z_3 &:= R_3 - X_{C2} \cdot i & Z_3 &= 11 - 15i \\ Z_4 &:= -X_{C3} \cdot i & Z_4 &= -20i \\ Z_5 &:= R_4 + X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 13 + 43i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 & Z_{345} &= 13.055 - 32.743i \end{aligned}$$



$$R_E := \operatorname{Re}(Z_{345}) \quad R_E = 13.055 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_{345}) \quad X_E = -32.743$$

Знайдемо контурні та міжконтурні опори схеми:

$$\begin{aligned} Z_{11} &:= R_1 + R_2 + X_{L2} \cdot i + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i + 2 \cdot X_M \cdot i & Z_{11} &= 16 + 154i \\ Z_{22} &:= R_E + X_E \cdot i + X_{L2} \cdot i + R_2 & Z_{22} &= 22.055 + 17.257i \\ Z_{12} &:= R_2 + X_{L2} \cdot i + X_M \cdot i & Z_{21} &:= Z_{12} \\ U &= 103.923 - 60i & F(U) &= (120 \quad -30) \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned} I_1 \cdot (Z_{11}) - I_3 \cdot (Z_{12}) &= U \\ -I_1 \cdot (Z_{21}) + I_3 \cdot (Z_{22}) &= 0 \\ \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} &:= \operatorname{Find}(I_1, I_3) & I_2 &:= I_1 - I_3 \\ I_1 &= 0.654 - 0.223i & F(I_1) &= (0.691 \quad -18.813) \\ I_2 &= -1.162 - 1.143i & F(I_2) &= (1.63 \quad -135.454) \\ I_3 &= 1.816 + 0.92i & F(I_3) &= (2.036 \quad 26.882) \\ I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 &= 2.333 + 1.543i & F(I_4) &= (2.797 \quad 33.489) \\ I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 &= -0.517 - 0.623i & F(I_5) &= (0.809 \quad -129.689) \end{aligned}$$

Баланс потужностей електричного кола :

$$\begin{aligned} S_r &:= U \cdot \overline{I_1} & S_r &= 81.354 - 16.089i \\ P_r &:= \operatorname{Re}(S_r) & P_r &= 81.354 & Q_r &:= \operatorname{Im}(S_r) & Q_r &= -16.089 \\ S_{M1} &:= \overline{I_1} \cdot I_2 \cdot X_M \cdot i & S_{M1} &= 32.217 - 16.162i & F(S_{M1}) &= (36.044 \quad -26.641) \\ S_{M2} &:= \overline{I_2} \cdot I_1 \cdot X_M \cdot i & S_{M2} &= -32.217 - 16.162i & F(S_{M2}) &= (36.044 \quad -153.359) \\ S_{KC} &:= (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i + R_1 - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (R_2 + X_{L2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot (R_E + X_E \cdot i) + S_{M1} + S_{M2} \\ S_{KC} &= 81.354 - 16.089i \end{aligned}$$

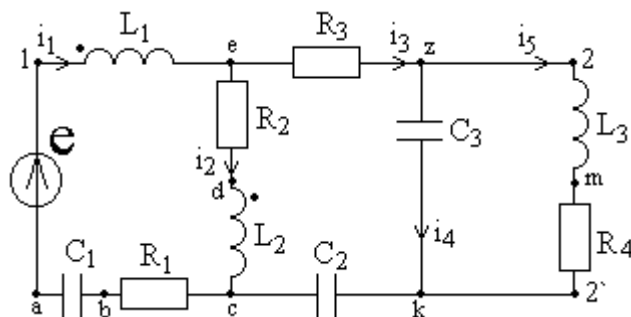
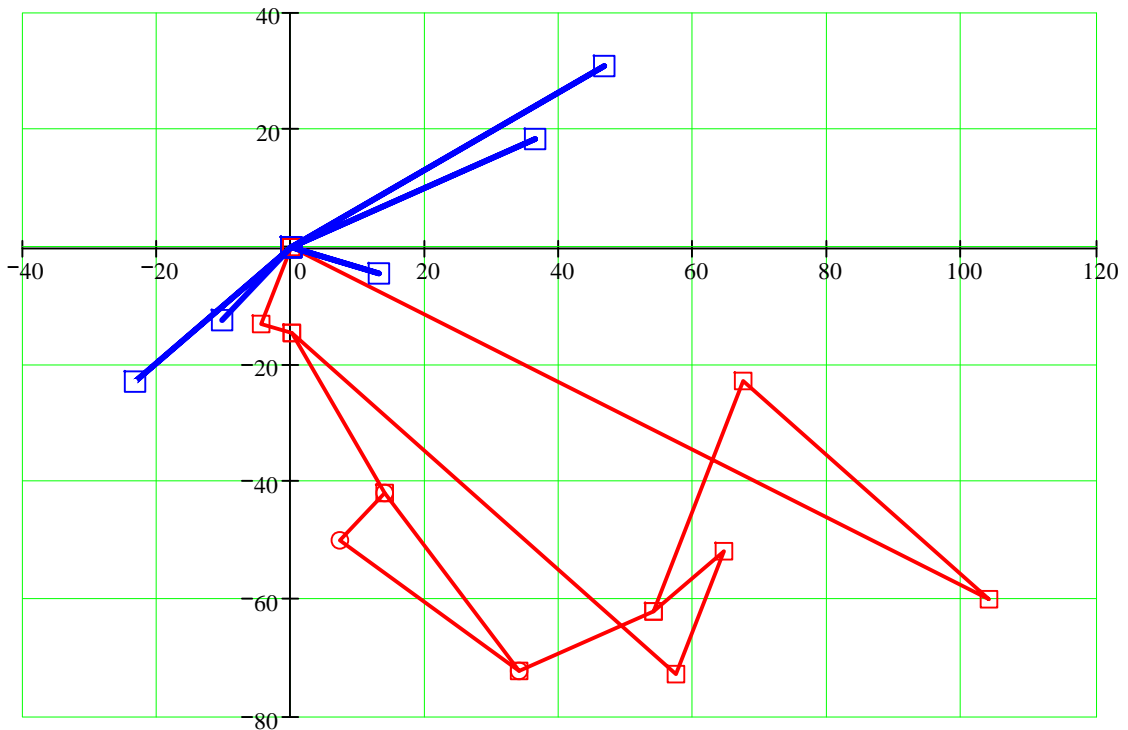
Знаходимо покази вольтметра:

$$\begin{aligned} V &:= \left| -I_2 \cdot (R_2 + X_M \cdot i) + I_3 \cdot (R_3 - X_{C2} \cdot i) + I_5 \cdot (X_{L3} \cdot i) \right| & V &= 55.003 \\ V &:= \left| I_2 \cdot i \cdot (X_{L2}) - I_3 \cdot [-i \cdot (X_{C2})] - I_5 \cdot (R_4) \right| & V &= 55.003 \end{aligned}$$

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

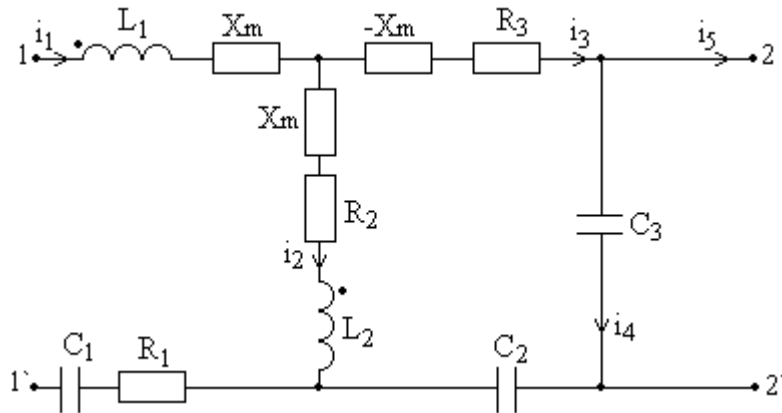
$\phi_a := 0$		
$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$	$\phi_b = -4.457 - 13.083i$	$F(\phi_b) = (13.822 \quad -108.813)$
$\phi_c := \phi_b + I_1 \cdot R_1$	$\phi_c = -4.328 - 4.997i$	$F(\phi_c) = (6.611 \quad -130.895)$
$\phi_{d'} := \phi_c + I_2 \cdot X_{L2} \cdot i$	$\phi_{d'} = 57.288 - 72.723i$	$F(\phi_{d'}) = (92.577 \quad -51.77)$
$\phi_d := \phi_{d'} + I_1 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_d = 64.419 - 51.789i$	$F(\phi_d) = (82.656 \quad -38.797)$
$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot R_2$	$\phi_e = 53.965 - 62.079i$	$F(\phi_e) = (82.256 \quad -49)$
$\phi_{l'} := \phi_e + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$	$\phi_{l'} = 67.337 - 22.829i$	$F(\phi_{l'}) = (71.102 \quad -18.728)$
$\phi_l := \phi_{l'} + I_2 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_l = 103.923 - 60i$	$F(\phi_l) = (120 \quad -30)$
$\phi_A := \phi_l - U$	$\phi_A = -1.421i \times 10^{-14}$	$F(\phi_A) = (1.421 \times 10^{-14} \quad -90)$
$\phi_k := \phi_c + I_3 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$	$\phi_k = 13.929 - 41.88i$	$F(\phi_k) = (44.135 \quad -71.603)$
$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$	$\phi_z = 33.992 - 72.204i$	$F(\phi_z) = (79.805 \quad -64.79)$
$\phi_e := \phi_z + I_3 \cdot R_3$	$\phi_e = 53.965 - 62.079i$	$F(\phi_e) = (82.256 \quad -49)$
$\phi_m := \phi_k + I_5 \cdot R_4$	$\phi_m = 7.209 - 49.977i$	$F(\phi_m) = (50.494 \quad -81.792)$
$\phi_z := \phi_m + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$	$\phi_z = 33.992 - 72.204i$	$F(\phi_z) = (79.805 \quad -64.79)$

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" :

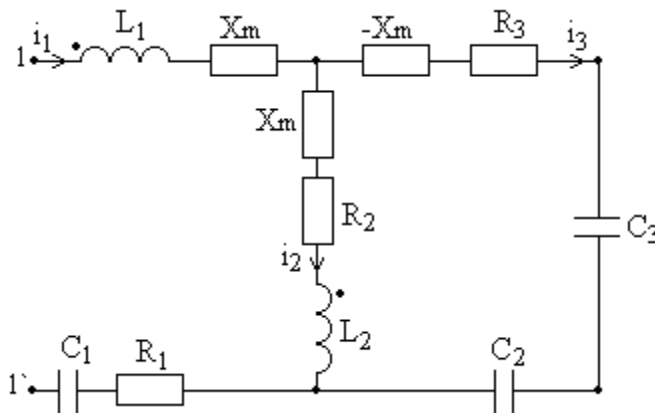
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполіусника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + j \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \quad Z_1 = 7 + 72i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 9 + 82i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C3} + X_{C2}) \quad Z_3 = 11 - 60i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 129.561 - 44.717i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 14.952 - 21.661i$$

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

$$I_{10} = 0.86 - 0.166i$$

$$F(I_{10}) = (0.876 \quad -10.958)$$

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

$$I_{30} = 2.201 + 1.029i$$

$$F(I_{30}) = (2.429 \quad 25.052)$$

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

$$U_{20} = 13.372 - 28.608i$$

$$F(U_{20}) = (31.579 \quad -64.948)$$

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

$$A = 3.115 + 2.177i$$

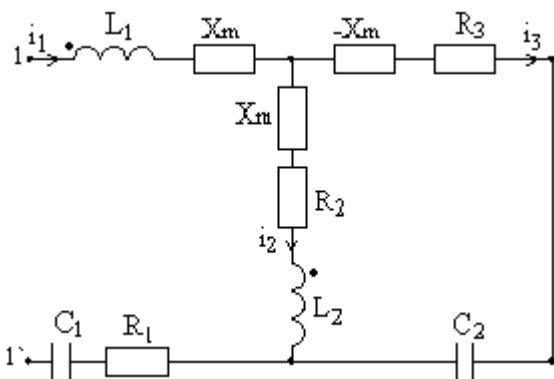
$$F(A) = (3.8 \quad 34.948)$$

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

$$C = 0.016 + 0.022i$$

$$F(C) = (0.028 \quad 53.99)$$

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



$$Z_1 = 7 + 72i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 9 + 82i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C2}) \quad Z_3 = 11 - 47i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 65.969 - 7.246i$$

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

$$I_{1K} = 1.655 - 0.728i$$

$$F(I_{1K}) = (1.808 \quad -23.732)$$

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

$$I_{2K} = 3.7 - 0.016i$$

$$F(I_{2K}) = (3.7 \quad -0.25)$$

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

$$B = 28.157 - 16.093i$$

$$F(B) = (32.431 \quad -29.75)$$

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

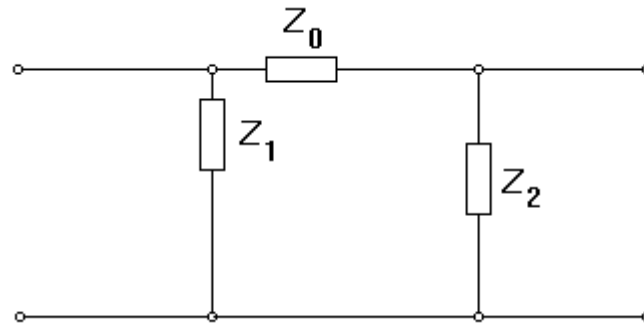
$$D = 0.448 - 0.195i$$

$$F(D) = (0.489 \quad -23.481)$$

Перевірка

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

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



$$Z_0 := B$$

$$Z_0 = 28.157 - 16.093i$$

$$F(Z_0) = (32.431 \quad -29.75)$$

$$Y_1 := \frac{D - 1}{B}$$

$$Y_1 = -0.012 - 0.014i$$

$$F(Y_1) = (0.018 \quad -130.814)$$

$$Y_2 := \frac{A - 1}{B}$$

$$Y_2 = 0.023 + 0.091i$$

$$F(Y_2) = (0.094 \quad 75.578)$$

$$R_0 := \operatorname{Re}(Z_0)$$

$$R_0 = 28.157$$

$$X_{C0} := -\operatorname{Im}(Z_0)$$

$$X_{C0} = 16.093$$

$$Z_1 := \frac{1}{Y_1}$$

$$Z_1 = -36.225 + 41.946i$$

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

$$R_1 = -36.225$$

$$X_{L1} := \operatorname{Im}(Z_1)$$

$$X_{L1} = 41.946$$

$$Z_2 := \frac{1}{Y_2}$$

$$Z_2 = 2.662 - 10.349i$$

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

$$R_2 = 2.662$$

$$X_{C2} := -\operatorname{Im}(Z_2)$$

$$X_{C2} = 10.349$$

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

$$L_1 = 0.067$$

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

$$C_2 = 1.538 \times 10^{-4}$$

$$C_0 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C0}}$$

$$C_0 = 9.89 \times 10^{-5}$$