

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

Розрахунково-графічна робота
“Розрахунок однофазного кола синусоїдного струму”
Варіант № 411

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 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.

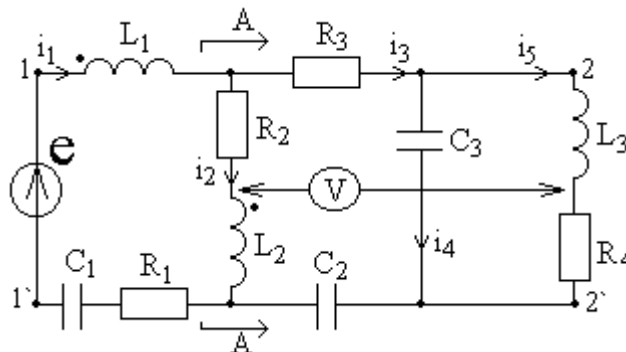
$$E := 160 \quad \psi := -60 \quad R_1 := 11 \quad R_2 := 13 \quad R_3 := 15 \quad R_4 := 17 \quad X_{L1} := 30 \quad X_{L2} := 35 \quad X_{L3} := 40$$

$$X_{C1} := 10 \quad X_{C2} := 15 \quad X_{C3} := 20 \quad X_M := 20 \quad f := 50$$

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

$$U = 80 - 138.564i$$

$$F(U) = (160 \quad -60)$$



Символічний метод

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

$$Z_1 = 11 + 20i$$

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

$$Z_2 = 13 + 35i$$

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

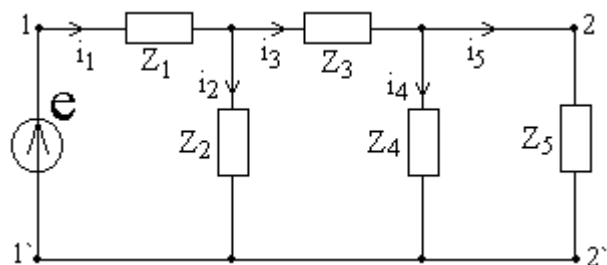
$$Z_3 = 15 - 15i$$

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

$$Z_4 = -20i$$

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

$$Z_5 = 17 + 40i$$



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

$$Z_{345} = 24.869 - 46.611i$$

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

$$Z_E = 56.224 + 40.85i$$

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

$$I_1 = -0.241 - 2.29i$$

$$F(I_1) = (2.302 \quad -96.001)$$

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

$$I_2 = -2.382 - 1.938i$$

$$F(I_2) = (3.071 \quad -140.873)$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_3 = 2.141 - 0.352i$$

$$F(I_3) = (2.17 \quad -9.331)$$

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

$$I_4 = 3.558 + 0.501i$$

$$F(I_4) = (3.593 \quad 8.008)$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_5 = -1.417 - 0.852i$$

$$F(I_5) = (1.654 \quad -148.967)$$

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 :

$$S_r := U \cdot I_1$$

$$S_r = 298.007 + 216.521i$$

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

$$P = 298.007$$

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

$$Q = 216.521i$$

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

$$V = 103.906$$

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

$$V = 103.906$$

Будуємо сумісну векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

$$\phi_a := 0$$

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

$$\phi_b = -22.896 + 2.407i$$

$$F(\phi_b) = (23.023 \quad 173.999)$$

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

$$\phi_c = -25.544 - 22.779i$$

$$F(\phi_c) = (34.225 \quad -138.274)$$

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

$$\phi_d = 42.278 - 106.153i$$

$$F(\phi_d) = (114.262 \quad -68.284)$$

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

$$\phi_e = 11.311 - 131.344i$$

$$F(\phi_e) = (131.83 \quad -85.078)$$

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

$$\phi_1 = 80 - 138.564i$$

$$F(\phi_1) = (160 \quad -60)$$

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

$$\phi_A = 1.421 \times 10^{-14} - 2.842i \times 10^{-14}$$

$$F(\phi_A) = (3.178 \times 10^{-14} \quad -63.435)$$

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

$$\phi_k = -30.822 - 54.9i$$

$$F(\phi_k) = (62.961 \quad -119.31)$$

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

$$\phi_z = -20.81 - 126.066i$$

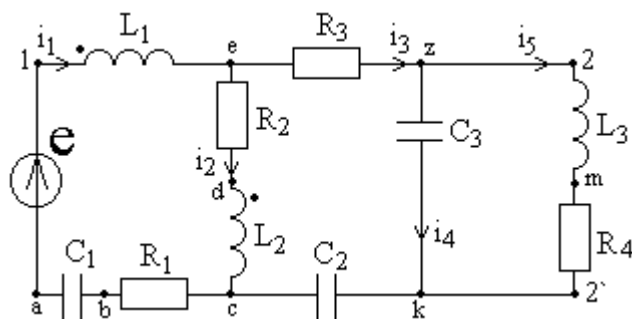
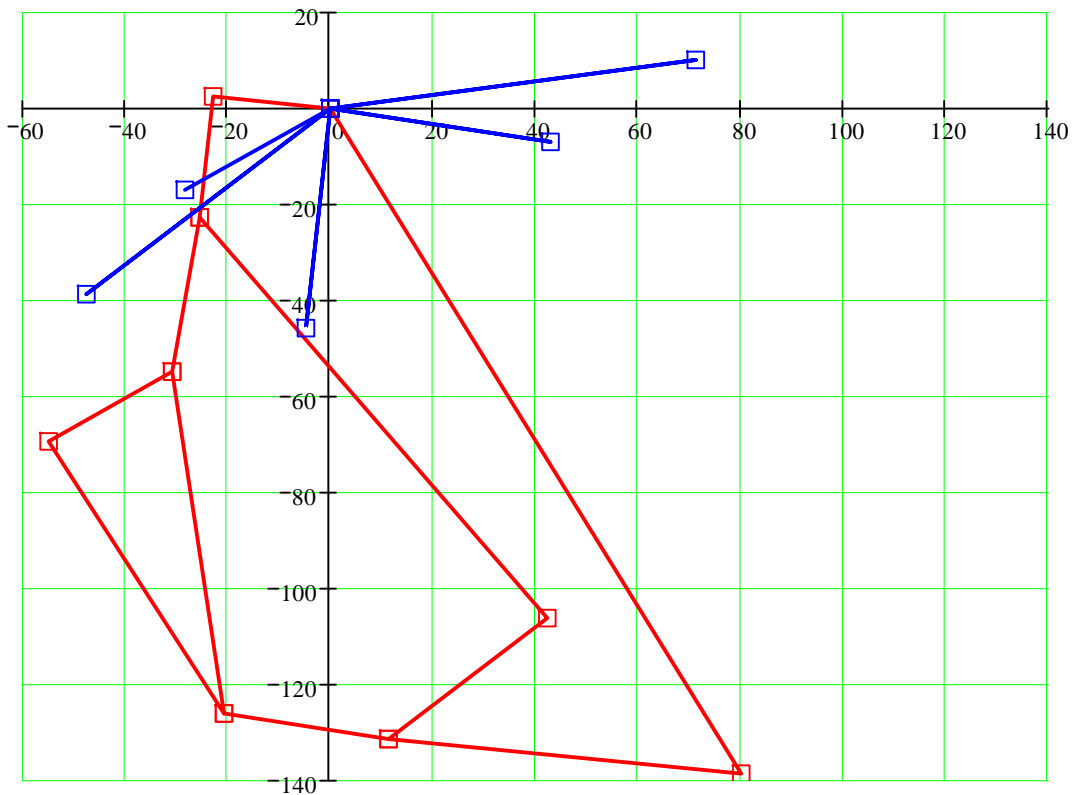
$$F(\phi_z) = (127.772 \quad -99.374)$$

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

$$\phi_m = -54.908 - 69.392i$$

$$F(\phi_m) = (88.488 \quad -128.354)$$

Суміщена векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг:



Прийнявши активний опір R2 за нульовий і вважаючи реактивний опір цієї вітки невідомий, розрахувати його за умови резонансу струмів.

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

$$Z_3 = -15i$$

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

$$Z_4 = 15 + 40i$$

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

$$Z_5 = 17 - 20i$$

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

$$Z_E = 29.045 - 21.278i$$

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

$$R_E = 29.045$$

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

$$X_E = -21.278$$

Умова резонансу струмів на ділянці "ab" :

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

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

$$B_2 = 0.016$$

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

$$X_2 = 60.925$$

Додатній знак свідчить про індуктивний характер опору

Розрахувати струми для резонансного стану кола;

$$Z_1 := R_1 + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i \quad Z_1 = 11 + 20i$$

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

$$Z_4 := -X_{C3} \cdot i \quad Z_4 = -20i$$

$$Z_5 := R_4 + X_{L3} \cdot i \quad Z_5 = 17 + 40i$$

$$Z_{345} := \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 \quad Z_{345} = 24.869 - 46.611i$$

Вхідний опір кола:

$$Z_{VX}(X_N) := \frac{Z_{345} \cdot i \cdot X_N}{Z_{345} + i \cdot X_N} + Z_1 \rightarrow \left(\frac{32115}{689} + \frac{17135}{689} \cdot i \right) \cdot \frac{X_N}{\left(\frac{17135}{689} - \frac{32115}{689} \cdot i + i \cdot X_N \right)} + 11 + 20 \cdot i$$

$$Z_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-\left(706530 \cdot X_N - 24714 \cdot X_N^2 - 21153550 - 638450 \cdot i \cdot X_N + 18335 \cdot i \cdot X_N^2 - 38461000 \cdot i \right)}{\left(1923050 - 64230 \cdot X_N + 689 \cdot X_N^2 \right)}$$

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

$$X_{VX}(X_N) := \text{Im}(Z_{VX}(X_N)) \left| \begin{array}{l} \text{complex} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -5 \cdot \frac{\left(-127690 \cdot X_N + 3667 \cdot X_N^2 - 7692200 \right)}{\left(1923050 - 64230 \cdot X_N + 689 \cdot X_N^2 \right)}$$

Нулі функції (уявної частини вхідного опору) дорівнюють:

$$X_N := X_{VX}(X_N) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } X_N \\ \text{float, } 50 \end{array} \right. \rightarrow \left(\begin{array}{l} 66.408793502605438764086195777274254459794294679555 \\ -31.587413628048580296674142327587862313625764545931 \end{array} \right)$$

Отже резонанс кола неможливий при будь-яких опорах у другій вітці, так як: $X_N = \left(\begin{array}{l} 66.409 \\ -31.587 \end{array} \right)$

$$X_n := X_{N0} \quad X_n = 66.409 \quad Z_{VX}(X_n) = 119.544$$

$$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)} \quad I_1 = 0.669 - 1.159i \quad F(I_1) = (1.338 \quad -60)$$

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n} \quad I_2 = -2.096 - 0.745i \quad F(I_2) = (2.224 \quad -160.44)$$

$$I_3 := I_1 - I_2 \quad I_3 = 2.765 - 0.414i \quad F(I_3) = (2.796 \quad -8.522)$$

$$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad I_4 = 4.575 + 0.71i \quad F(I_4) = (4.63 \quad 8.817)$$

$$I_5 := I_3 - I_4 \quad I_5 = -1.81 - 1.124i \quad F(I_5) = (2.131 \quad -148.158)$$

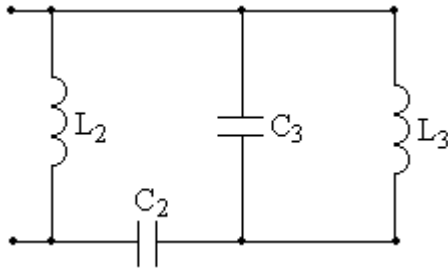
$$S_1 := U \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 214.147$$

$$P := \left(|I_1| \right)^2 \cdot R_1 + \left(|I_3| \right)^2 \cdot R_3 + \left(|I_5| \right)^2 \cdot R_4 \quad P = 214.147$$

$$Q := \left(|I_1| \right)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + \left(|I_2| \right)^2 \cdot X_n + \left(|I_3| \right)^2 \cdot (-X_{C2}) + \left(|I_4| \right)^2 \cdot (-X_{C3}) + \left(|I_5| \right)^2 \cdot X_{L3} \quad Q = 1.137 \times 10^{-13}$$

При	$X_n := X_{N_1}$	$X_n = -31.587$	$Z_{VX}(X_n) = 14.685$
$I_1 := \frac{U}{Z_{VX}(X_n)}$		$I_1 = 5.448 - 9.436i$	$F(I_1) = (10.895 \quad -60)$
$I_2 := I_1 \cdot \frac{Z_{345}}{Z_{345} + i \cdot X_n}$		$I_2 = 4.55 - 5.339i$	$F(I_2) = (7.015 \quad -49.56)$
$I_3 := I_1 - I_2$		$I_3 = 0.898 - 4.097i$	$F(I_3) = (4.194 \quad -77.642)$
$I_4 := I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5}$		$I_4 = 3.44 - 6.032i$	$F(I_4) = (6.945 \quad -60.303)$
$I_5 := I_3 - I_4$		$I_5 = -2.543 + 1.936i$	$F(I_5) = (3.196 \quad 142.722)$
$S_1 := U \cdot \overline{I_1}$		$S_1 = 1.743 \times 10^3$	
$P := \left(I_1 \right)^2 \cdot R_1 + \left(I_3 \right)^2 \cdot R_3 + \left(I_5 \right)^2 \cdot R_4$		$P = 1.743 \times 10^3$	
$Q := \left(I_1 \right)^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + \left(I_2 \right)^2 \cdot X_n + \left(I_3 \right)^2 \cdot (-X_{C2}) + \left(I_4 \right)^2 \cdot (-X_{C3}) + \left(I_5 \right)^2 \cdot X_{L3}$			$Q = -5.684 \times 10^{-13}$

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



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

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

$$L_3 = 0.127$$

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

$$C_2 = 2.122 \times 10^{-4}$$

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

$$C_3 = 1.592 \times 10^{-4}$$

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

$$L_2 = 0.111$$

Знаходимо нулі: $Z(p) = 0$

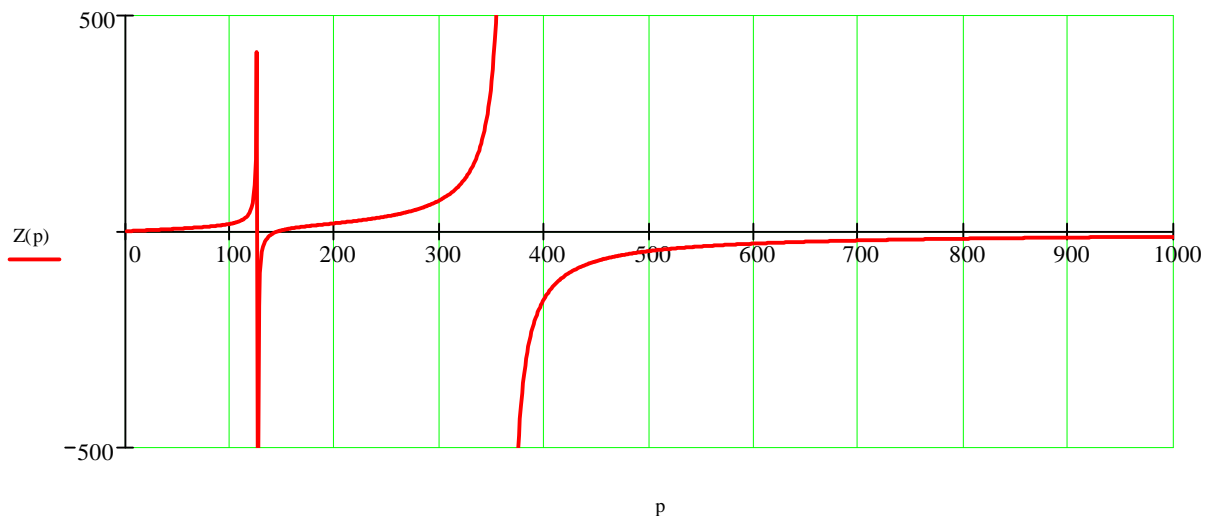
$$w_1 := Z(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 145. \\ -145. \end{pmatrix}$$

$$w_1 := \begin{pmatrix} w_{10} \\ w_{11} \end{pmatrix} \quad w_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 145 \end{pmatrix}$$

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

$$w := \frac{1}{Z(p)} \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 363.6787829 \\ -363.6787829 \\ 125.6256696 \\ -125.6256696 \end{pmatrix}$$

$$w := \begin{pmatrix} w_0 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad w = \begin{pmatrix} 363.679 \\ 125.626 \end{pmatrix}$$



2. ПРИ НАЯВНОСТІ МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ІНДУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ L1 T/ L2 (ОДНОЙМЕННІ ПОЧАТКИ ПОЗНАЧЕНІ НА СХЕМІ ТОЧКАМИ):

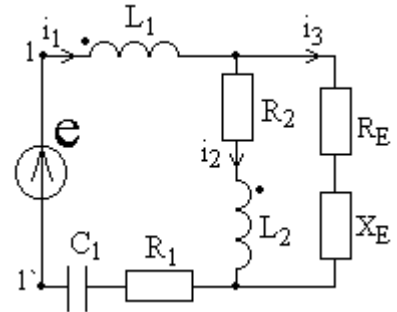
2.1. Перетворивши схему до двох незалежних контурів, розрахувати струми у всіх вітках схеми методом контурних струмів, визначити покази вольметра;

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

$$\begin{aligned} Z_3 &:= R_3 - X_{C2} \cdot i & Z_3 &= 15 - 15i \\ Z_4 &:= -X_{C3} \cdot i & Z_4 &= -20i \\ Z_5 &:= R_4 + X_{L3} \cdot i & Z_5 &= 17 + 40i \\ Z_{345} &:= \frac{Z_5 \cdot Z_4}{Z_5 + Z_4} + Z_3 & Z_{345} &= 24.869 - 46.611i \end{aligned}$$



$$R_E := \operatorname{Re}(Z_{345}) \quad R_E = 24.869 \quad X_E := \operatorname{Im}(Z_{345}) \quad X_E = -46.611$$

Знайдемо контурні та міжконтурні опори схеми:

$$\begin{aligned} Z_{11} &:= R_1 + R_2 + X_{L2} \cdot i + X_{L1} \cdot i - X_{C1} \cdot i + 2 \cdot X_M \cdot i & Z_{11} &= 24 + 95i \\ Z_{22} &:= R_E + X_E \cdot i + X_{L2} \cdot i + R_2 & Z_{22} &= 37.869 - 11.611i \\ Z_{12} &:= R_2 + X_{L2} \cdot i + X_M \cdot i & Z_{21} &:= Z_{12} & Z_{12} &= 13 + 55i \\ U &= 80 - 138.564i & F(U) &= (160 \quad -60) \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned} I_1 \cdot (Z_{11}) - I_3 \cdot (Z_{12}) &= U \\ -I_1 \cdot (Z_{21}) + I_3 \cdot (Z_{22}) &= 0 \\ \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} &:= \operatorname{Find}(I_1, I_3) & I_2 &:= I_1 - I_3 & I_1 &= -0.174 - 1.201i & F(I_1) &= (1.214 \quad -98.254) \\ & & I_2 &= -1.901 - 1.065i & I_2 &= -1.901 - 1.065i & F(I_2) &= (2.179 \quad -150.735) \\ & & I_3 &= 1.726 - 0.136i & I_3 &= 1.726 - 0.136i & F(I_3) &= (1.732 \quad -4.507) \\ I_4 &:= I_3 \cdot \frac{Z_5}{Z_4 + Z_5} & I_4 &= 2.796 + 0.637i & I_4 &= 2.796 + 0.637i & F(I_4) &= (2.867 \quad 12.832) \\ I_5 &:= I_3 - I_4 & I_5 &= -1.069 - 0.773i & I_5 &= -1.069 - 0.773i & F(I_5) &= (1.319 \quad -144.142) \end{aligned}$$

Баланс потужностей електричного кола :

$$\begin{aligned} S_r &:= U \cdot \overline{I_1} & S_r &= 152.496 + 120.236i \\ P_r &:= \operatorname{Re}(S_r) & P_r &= 152.496 & Q_r &:= \operatorname{Im}(S_r) & Q_r &= 120.236 \\ S_{M1} &:= \overline{I_1} \cdot I_2 \cdot X_M \cdot i & S_{M1} &= 41.948 + 32.21i & F(S_{M1}) &= (52.887 \quad 37.519) \\ S_{M2} &:= \overline{I_2} \cdot I_1 \cdot X_M \cdot i & S_{M2} &= -41.948 + 32.21i & F(S_{M2}) &= (52.887 \quad 142.481) \\ S_{KC} &:= (|I_1|)^2 \cdot (X_{L1} \cdot i + R_1 - X_{C1} \cdot i) + (|I_2|)^2 \cdot (R_2 + X_{L2} \cdot i) + (|I_3|)^2 \cdot (R_E + X_E \cdot i) + S_{M1} + S_{M2} \\ S_{KC} &= 152.496 + 120.236i \end{aligned}$$

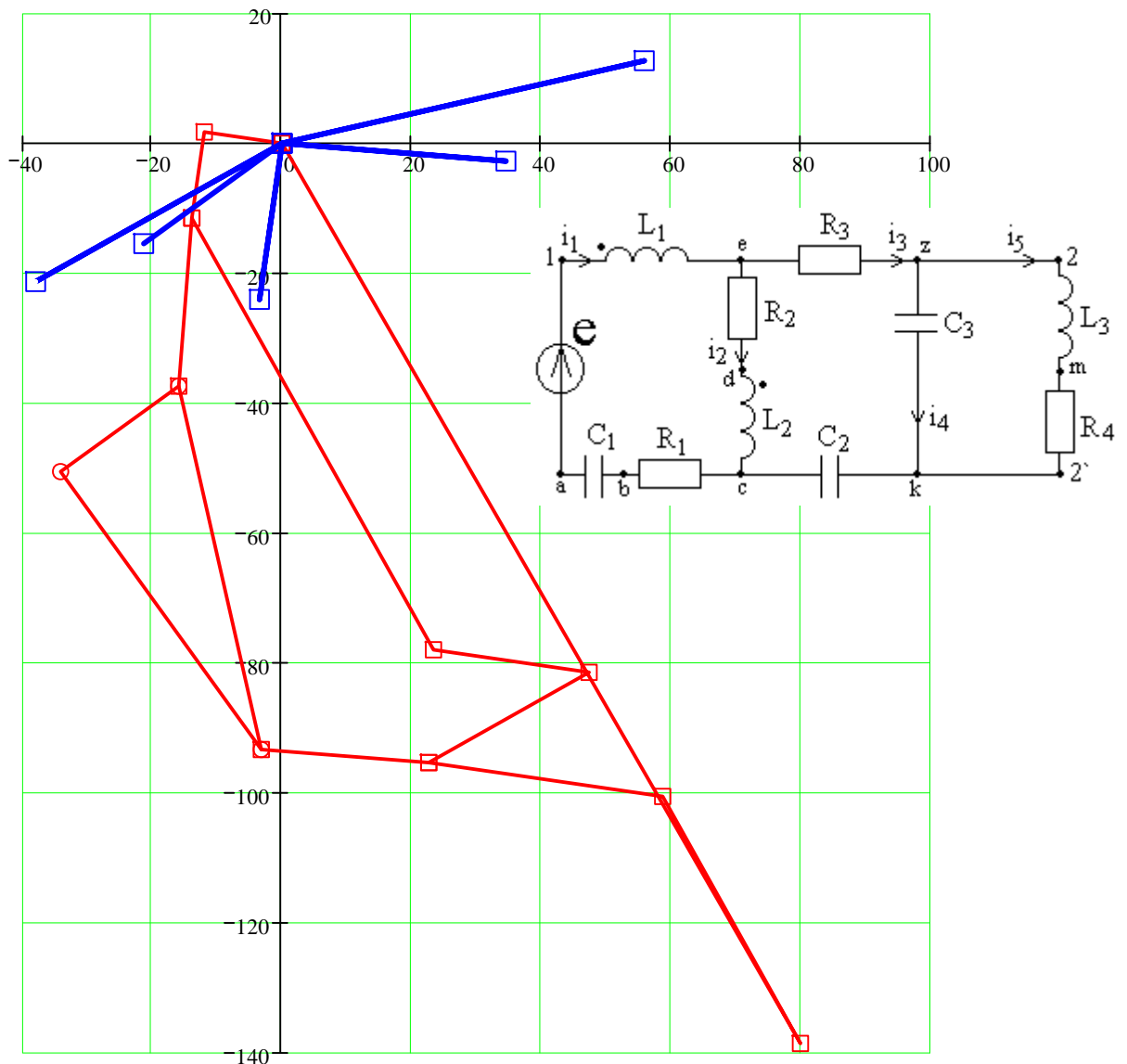
Знаходимо покази вольметра:

$$\begin{aligned} V &:= \left| -I_2 \cdot (R_2 + X_M \cdot i) + I_3 \cdot (R_3 - X_{C2} \cdot i) + I_5 \cdot (X_{L3} \cdot i) \right| & V &= 63.731 \\ V &:= \left| I_2 \cdot i \cdot (X_{L2}) - I_3 \cdot [-i \cdot (X_{C2})] - I_5 \cdot (R_4) \right| & V &= 63.731 \end{aligned}$$

Визначимо потенціали всіх точок позначених на схемі:

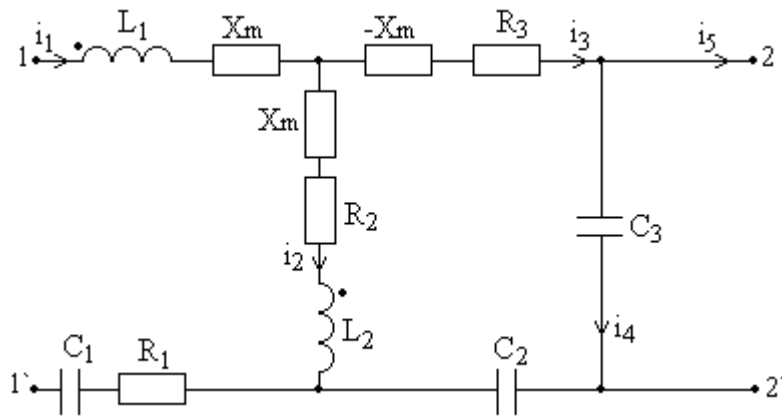
$\phi_a := 0$			
$\phi_b := \phi_a + I_1 \cdot (-X_{C1} \cdot i)$	$\phi_b = -12.011 + 1.742i$	$F(\phi_b) = (12.137 \ 171.746)$	
$\phi_c := \phi_b + I_1 \cdot R_1$	$\phi_c = -13.928 - 11.47i$	$F(\phi_c) = (18.043 \ -140.528)$	
$\phi_{d'} := \phi_c + I_2 \cdot X_{L2} \cdot i$	$\phi_{d'} = 23.35 - 77.993i$	$F(\phi_{d'}) = (81.413 \ -73.333)$	
$\phi_d := \phi_{d'} + I_1 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_d = 47.372 - 81.478i$	$F(\phi_d) = (94.249 \ -59.826)$	
$\phi_e := \phi_d + I_2 \cdot R_2$	$\phi_e = 22.664 - 95.324i$	$F(\phi_e) = (97.981 \ -76.626)$	
$\phi_{1'} := \phi_e + I_1 \cdot X_{L1} \cdot i$	$\phi_{1'} = 58.698 - 100.551i$	$F(\phi_{1'}) = (116.43 \ -59.725)$	
$\phi_1 := \phi_{1'} + I_2 \cdot X_M \cdot i$	$\phi_1 = 80 - 138.564i$	$F(\phi_1) = (160 \ -60)$	
$\phi_A := \phi_1 - U$	$\phi_A = 2.558 \times 10^{-15} + 1.137i \times 10^{-13}$	$F(\phi_A) = (2.799 \times 10^{-13} \ 23.962)$	
$\phi_k := \phi_c + I_3 \cdot (-X_{C2} \cdot i)$	$\phi_k = -15.969 - 37.366i$	$F(\phi_k) = (40.636 \ -113.14)$	
$\phi_z := \phi_k + I_4 \cdot (-X_{C3} \cdot i)$	$\phi_z = -3.232 - 93.283i$	$F(\phi_z) = (93.339 \ -91.984)$	
$\phi_e := \phi_z + I_3 \cdot R_3$	$\phi_e = 22.664 - 95.324i$	$F(\phi_e) = (97.981 \ -76.626)$	
$\phi_m := \phi_k + I_5 \cdot R_4$	$\phi_m = -34.149 - 50.506i$	$F(\phi_m) = (60.968 \ -124.064)$	
$\phi_z := \phi_m + I_5 \cdot X_{L3} \cdot i$	$\phi_z = -3.232 - 93.283i$	$F(\phi_z) = (93.339 \ -91.984)$	

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" :

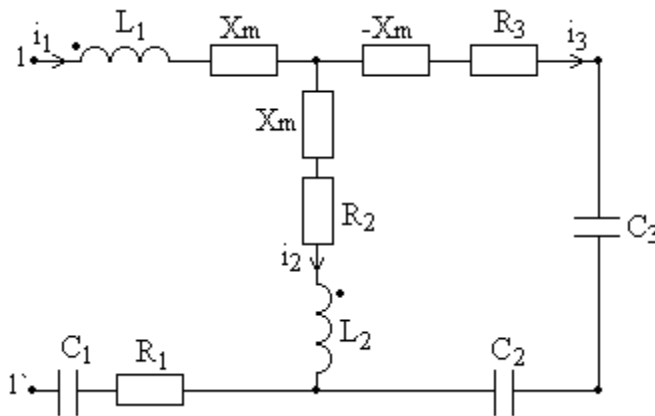
1) Розрахувати коефіцієнти чотириполосника **A, B, C, D**



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

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

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



$$Z_1 := R_1 + j \cdot (X_{L1} + X_M - X_{C1}) \quad Z_1 = 11 + 40i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 13 + 55i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C3} + X_{C2}) \quad Z_3 = 15 - 55i$$

$$Z_{10} := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_{10} = 126 + 43.929i$$

$$Z_{20} := \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \quad Z_{20} = 20.99 - 31.834i$$

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

$$I_{10} = 0.224 - 1.178i$$

$$F(I_{10}) = (1.199 \quad -79.221)$$

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

$$I_{30} = 2.418 - 0.106i$$

$$F(I_{30}) = (2.42 \quad -2.519)$$

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

$$U_{20} = -2.127 - 48.357i$$

$$F(U_{20}) = (48.404 \quad -92.519)$$

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

$$A = 2.787 + 1.777i$$

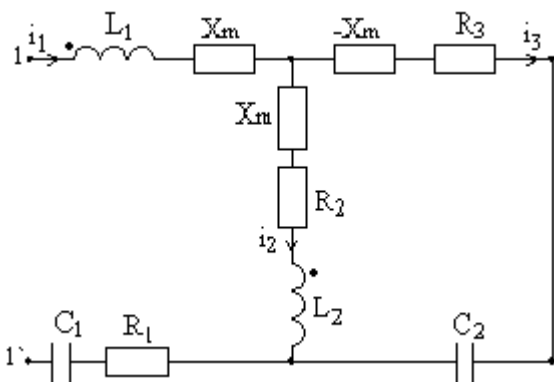
$$F(A) = (3.306 \quad 32.519)$$

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

$$C = 0.024 + 5.698i \times 10^{-3}$$

$$F(C) = (0.025 \quad 13.299)$$

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



$$Z_1 = 11 + 40i$$

$$Z_2 := R_2 + j \cdot (X_{L2} + X_M) \quad Z_2 = 13 + 55i$$

$$Z_3 := R_3 - j \cdot (X_M + X_{C2}) \quad Z_3 = 15 - 35i$$

$$Z_K := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1 \quad Z_K = 67.385 + 12.939i$$

$$I_{1K} := \frac{U_K}{Z_K} \quad I_{1K} = 0.764 - 2.203i \quad F(I_{1K}) = (2.332 \quad -70.87)$$

$$I_{2K} := I_{1K} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad I_{2K} = 3.327 - 1.898i \quad F(I_{2K}) = (3.83 \quad -29.706)$$

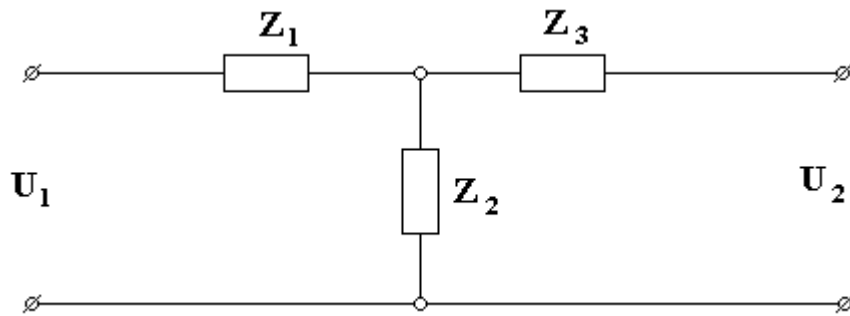
$$B := \frac{U}{I_{2K}} \quad B = 36.072 - 21.074i \quad F(B) = (41.777 \quad -30.294)$$

$$D := \frac{I_{1K}}{I_{2K}} \quad D = 0.458 - 0.401i \quad F(D) = (0.609 \quad -41.164)$$

Перевірка

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

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



$$Z_1 := \frac{A - 1}{C} \quad Z_1 = 86.714 + 53.214i \quad F(Z_1) = (101.74 \quad 31.536)$$

$$Z_2 := \frac{1}{C} \quad Z_2 = 13 + 55i \quad F(Z_2) = (56.515 \quad 76.701)$$

$$Z_3 := \frac{D - 1}{C} \quad Z_3 = -25 - 10.714i \quad F(Z_3) = (27.199 \quad -156.801)$$

$$R_1 := \operatorname{Re}(Z_1) \quad R_1 = 86.714 \quad X_1 := \operatorname{Im}(Z_1) \quad X_1 = 53.214$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(Z_2) \quad R_2 = 39.286 \quad X_2 := \operatorname{Im}(Z_2) \quad X_2 = -9.286$$

$$R_3 := \operatorname{Re}(Z_3) \quad R_3 = -25 \quad X_3 := \operatorname{Im}(Z_3) \quad X_3 = -10.714$$

$$L_1 := \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad C_2 := -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_2} \quad C_3 := -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_3}$$

$$L_1 = 0.169 \quad C_2 = 3.428 \times 10^{-4} \quad C_3 = 2.971 \times 10^{-4}$$