

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
Факультет інформатики і обчислювальної техніки

Розрахунково-графічна робота

Періодичні несинусоїдні струми у лінійних е
ричних колах

Варіант 113

Виконав студент групи ІО-01
Редько Олександр

1. Вихідні дані

В електричному колі діє джерело несинусоїдної ЕРС. Дано схему кола та графік ЕРС. Кутова частота $\omega = 100$ рад/с.

Параметри:

$$E_m = 100$$

$$R = 30 \text{ Ом};$$

$$L = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$C = 10 \times 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Рис 1.- Задане лінійне електричне коло

Рис 2.- Заданий графік ЕРС

2. Розрахунки

1. Розкласти задану ЕРС в ряд Фур'є до 5-ої гармонічної складової включно.

Функція $u(x)$, де $x = \omega \cdot t$, ($0 \leq x \leq 2\pi$, $T = 2\pi$) має вигляд:

$$u(x) = \begin{cases} \frac{E_m}{2} & \text{if } \left(\frac{\pi}{6} \leq x < \frac{\pi}{3}\right) + \left(\frac{2\pi}{3} \leq x < \frac{5\pi}{6}\right) \\ E_m & \text{if } \frac{\pi}{3} \leq x < \frac{2\pi}{3} \\ 0 & \text{if } \left(0 \leq x < \frac{\pi}{6}\right) + \left(\frac{5\pi}{6} \leq x < \pi\right) \\ (-u(x - \pi)) & \text{if } \pi \leq x < 2\pi \end{cases}$$

Використаємо формули розкладу функції в ряд Фур'є:

$$f(\vartheta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\vartheta) + b_n \sin(n\vartheta);$$

$$\text{де } a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \cos(n\vartheta) d\vartheta; \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \sin(n\vartheta) d\vartheta.$$

Оскільки задана функція ЕРС непарна, то коефіцієнти $a_n = 0$. Знайдемо коефіцієнти b_n :

$$b_n = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} u(x) \cdot \sin(n \cdot x) dx = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}} \frac{E_m}{2} \cdot \sin(n \cdot x) dx + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} E_m \cdot \sin(n \cdot x) dx + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{6}} \frac{E_m}{2} \cdot \sin(n \cdot x) dx \right).$$

Після нескладних математичних перетворень, отримаємо:

$$b_n = \frac{E_m}{\pi \cdot n} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot n}{3}\right) - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{3}\right) + \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{6}\right) - \cos\left(\frac{5 \cdot \pi \cdot n}{6}\right) \right).$$

Підставимо b_n в ряд. Отримаємо:

$$u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \cdot \cos(n \cdot x)) = \frac{E_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi \cdot n}{3}\right) - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{3}\right) + \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{6}\right) - \cos\left(\frac{5 \cdot \pi \cdot n}{6}\right) \right] \cdot \sin(n \cdot x) \right],$$

або

$$u(\omega \cdot t) = \frac{E_m}{\pi} \cdot \left(\sin(\omega \cdot t) + \sqrt{3} \cdot \sin(\omega \cdot t) - \frac{2 \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t)}{3} + \frac{\sin(5 \cdot \omega \cdot t)}{5} - \frac{\sqrt{3} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t)}{5} + \dots \right).$$

Обмежувачись п'ятьма гармоніками:

$$u(t) = 69.571 \sin(1000t) - 16.977 \sin(3 \cdot 1000t) - 3.7283 \sin(5 \cdot 1000t) \text{ В.}$$

2. Побудувати в одній системі координат часові графіки армонік і сумарну криву ЕРС. Порівняти її з заданою.

Розкладена ЕРС в ряд Фур'є:

$$u_F(x) = \frac{E_m}{\pi} \cdot \left(\sin(x) + \sqrt{3} \cdot \sin(x) - \frac{2 \cdot \sin(3 \cdot x)}{3} + \frac{\sin(5 \cdot x)}{5} - \frac{\sqrt{3} \cdot \sin(5 \cdot x)}{5} \right) = 69.571 \sin(x) - 16.977 \sin(3 \cdot x) - 3.728 \sin(5 \cdot x)$$

Перша гармоніка: $u_{F1}(x) = \frac{E_m}{\pi} \cdot (\sin(x) + \sqrt{3} \cdot \sin(x)) = 69.571 \sin(x) \text{ В}.$

Третя гармоніка: $u_{F3}(x) = \frac{E_m}{\pi} \cdot \left(-\frac{2 \cdot \sin(3 \cdot x)}{3.0} \right) = -21.221 \sin(3 \cdot x) \text{ В}.$

П'ята гармоніка: $u_{F5}(x) = \frac{E_m}{\pi} \cdot \left(\frac{\sin(5 \cdot x)}{5} - \frac{\sqrt{3} \cdot \sin(5 \cdot x)}{5} \right) = -3.728 \sin(5 \cdot x) \text{ В}.$

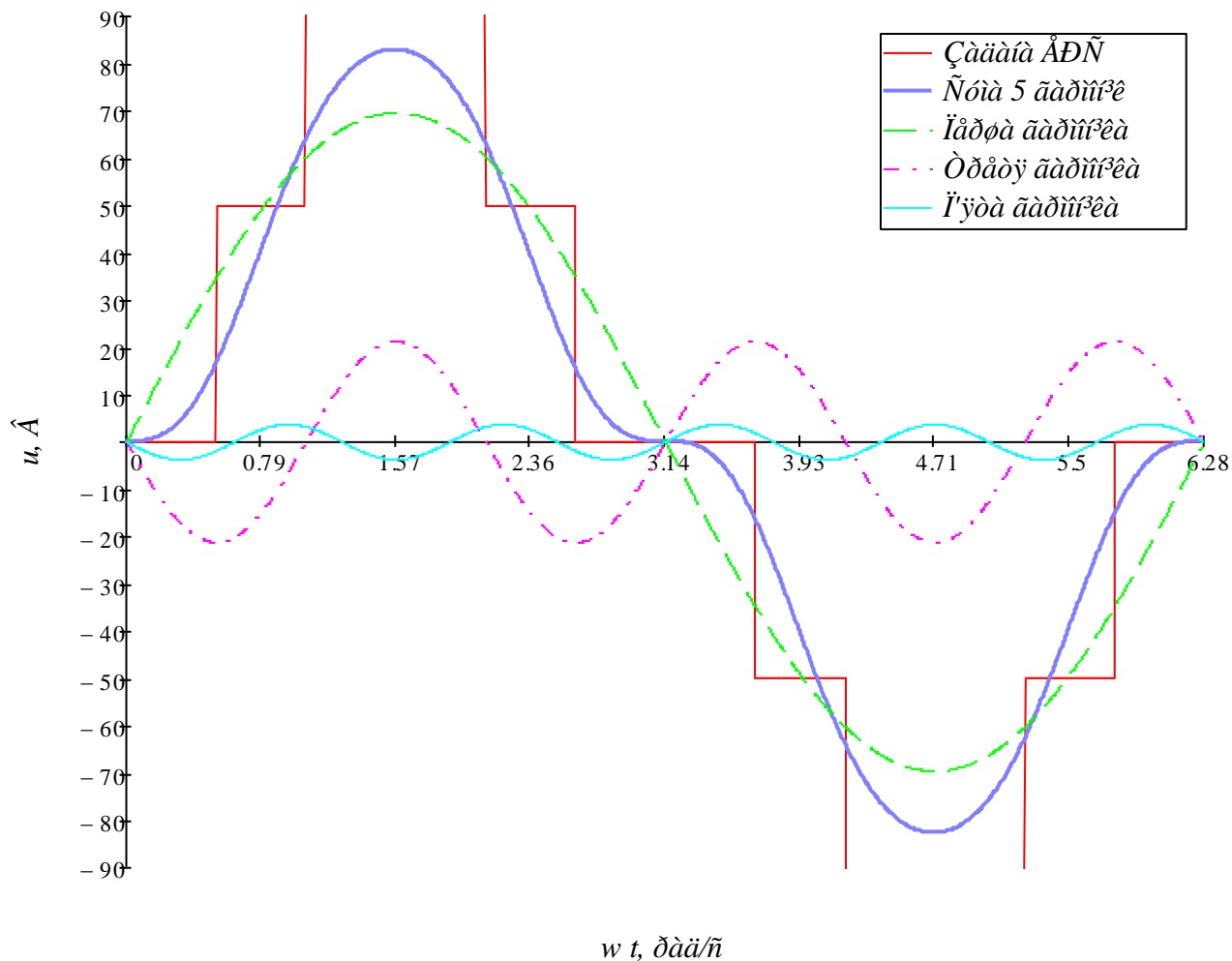


Рис.3.- Часові графіки гармонік і сумарна крива ЕРС

3. Розрахувати миттєві значення струмів у всіх гілках за кола.

Струми для гармонічних складових ряду розраховуємо в комплексній формі.

Комплексний опір кола:

$$Z_n = \frac{1}{j n \cdot \omega \cdot C} + \frac{R \cdot j \cdot n \cdot \omega \cdot L - (n \cdot \omega \cdot L)^2}{R + 2j n \cdot \omega \cdot L}.$$

Для напруги основної гармоніки $n = 1$; $u_1(t) = (u_{f1}(1000t)) = 69.571 \cdot \sin(1000t)$,

$$U_1 = \frac{83.917e^{j \frac{16.528 \cdot \frac{\pi}{180}}}}{\sqrt{2}} = 56.886 + 16.881j \text{ В}.$$

Рис 4.- Схема для визначення струмів першої гармоніки

$$Z_1 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} + \frac{R \cdot j \cdot \omega \cdot L - (\omega \cdot L)^2}{R + 2j \omega \cdot L} = \frac{1}{j \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} + \frac{30j \cdot 10008 \cdot 10^{-3} - (10008 \cdot 10^{-3})^2}{30 + 2j \cdot 10008 \cdot 10^{-3}} = 1.661 - 92.886j \text{ Ом},$$

показникова форма - модуль: $|Z_1| = 92.901$; аргумент: $\arg_{\deg}(Z_1) = -88.976$.

$$I_{11} = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{56.886 + 16.881j}{1.661 - 92.886j} = -0.171 + 0.615j \text{ А},$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I11} = |I_{11}| = 0.639$; аргумент: $\varphi_{11} = \arg_{\deg}(I_{11}) = 105.504$.

За формулою чужого опору:

$$I_{21} = I_{11} \cdot \frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{R + 2j \omega \cdot L} = (-0.171 + 0.615j) \cdot \frac{30 + j \cdot 10008 \cdot 10^{-3}}{30 + 2j \cdot 10008 \cdot 10^{-3}} = -0.024 + 0.583j \text{ А},$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I21} = |I_{21}| = 0.583$; аргумент: $\varphi_{21} = \arg_{\deg}(I_{21}) = 92.363$.

Миттєві значення струмів першої гармоніки

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I31} = |I_{31}| = 0.15$; аргумент: $\varphi_{31} = \arg_{\deg}(I_{31}) = 167.431$.

$$i_{11}(\omega, t) = \text{mod}_{I11} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{11}) = 0.639 \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 105.504) \text{ А},$$

$$i_{21}(\omega, t) = \text{mod}_{I21} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{21}) = 0.583 \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 92.363) \text{ А},$$

$$i_{31}(\omega, t) = \text{mod}_{I31} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{31}) = 0.15 \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 167.431) \text{ А}.$$

Визначимо струми для третьої гармоніки.

$$n = 3; \quad u_3(t) = (u_B(1000t)) = -21.221 \sin(3000t), \quad U_3 = \frac{23.873e^{30 \cdot \frac{\pi \cdot j}{180}}}{\sqrt{2}} = 14.619 + 8.44j \text{ В.}$$

$$|U_3| = 16.881$$

$$\arg_{\deg}(U_3) = 30$$

Рис 5.- Схема для визначення струмів третьої гармоніки

$$Z_3 = \frac{1}{j \cdot 3\omega \cdot C} + \frac{R \cdot j \cdot 3\omega \cdot L - (3\omega \cdot L)^2}{R + 2j \cdot 3\omega \cdot L} = \frac{1}{j \cdot 3 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} + \frac{30j \cdot 3 \cdot 10008 \cdot 10^{-3} - (3 \cdot 10008 \cdot 10^{-3})^2}{30 + 2j \cdot 3 \cdot 10008 \cdot 10^{-3}} = 5.393 - 17.963j \text{ Ом,}$$

показникова форма - модуль: $|Z_3| = 18.755$; аргумент: $\arg_{\deg}(Z_3) = -73.288$.

$$I_{13} = \frac{U_3}{Z_3} = \frac{14.619 + 8.44j}{5.393 - 17.963j} = -0.207 + 0.876j \text{ А,}$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I_{13}} = |I_{13}| = 0.9$; аргумент: $\varphi_{13} = \arg_{\deg}(I_{13}) = 103.288$.

За формулою чужого опору:

$$I_{23} = I_{13} \frac{R + j \cdot 3\omega \cdot L}{R + 2j \cdot 3\omega \cdot L} = (-0.207 + 0.876j) \cdot \frac{30 + j \cdot 3 \cdot 10008 \cdot 10^{-3}}{30 + 2j \cdot 3 \cdot 10008 \cdot 10^{-3}} = 0.064 + 0.608j \text{ А,}$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I_{23}} = |I_{23}| = 0.611$; аргумент: $\varphi_{23} = \arg_{\deg}(I_{23}) = 83.953$.

$$I_{33} = I_{13} - I_{23} = -0.207 + 0.876j - (0.064 + 0.608j) = -0.271 + 0.268j \text{ А,}$$

Миттєві значення струмів третьої гармоніки:

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I_{33}} = |I_{33}| = 0.382$; аргумент: $\varphi_{33} = \arg_{\deg}(I_{33}) = 135.293$.

$$i_{13}(\omega, t) = \text{mod}_{I_{13}} \sqrt{2} \cdot \sin(3\omega \cdot t + \varphi_{13}) = 0.9 \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 103.288) \text{ А,}$$

$$i_{23}(\omega, t) = \text{mod}_{I_{23}} \sqrt{2} \cdot \sin(3\omega \cdot t + \varphi_{23}) = 0.611 \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 83.953) \text{ А,}$$

$$i_{33}(\omega, t) = \text{mod}_{I_{33}} \sqrt{2} \cdot \sin(3\omega \cdot t + \varphi_{33}) = 0.382 \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 135.293) \text{ А.}$$

Для п'ятої гармоніки напруги:

$$n=5; \quad u_5(t) = (u_5(1000t)) = -3.728 \sin(5000t), \quad U_5 = \frac{13.783e^{-60 \cdot \frac{\pi \cdot j}{180}}}{\sqrt{2}} = 4.873 - 8.44j \text{ В.}$$

$$|U_5| = 9.746$$

$$\arg_{\deg}(U_5) = -60$$

Рис 5.- Схема для визначення струмів п'ятої гармоніки

$$Z_5 = \frac{1}{j \cdot 5\omega \cdot C} + \frac{R \cdot j \cdot 5\omega \cdot L - (5\omega \cdot L)^2}{R + 2j \cdot 5\omega \cdot L} = \frac{1}{j \cdot 5 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} + \frac{30j \cdot 5 \cdot 10008 \cdot 10^{-3} - (5 \cdot 10008 \cdot 10^{-3})^2}{30 + 2j \cdot 5 \cdot 10008 \cdot 10^{-3}} = 6.575 + 2.466j \text{ Ом,}$$

показникова форма - модуль: $|Z_5| = 7.022$; аргумент: $\arg_{\deg}(Z_5) = 20.556$.

$$I_{15} = \frac{U_5}{Z_5} = \frac{4.873 - 8.44j}{6.575 + 2.466j} = 0.228 - 1.369j \text{ А,}$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I15} = |I_{15}| = 1.388$; аргумент: $\varphi_{15} = \arg_{\deg}(I_{15}) = -80.556$.

За формулою чужого опору:

$$I_{25} = I_{15} \frac{R + j \cdot 5\omega \cdot L}{R + 2j \cdot 5\omega \cdot L} = (0.228 - 1.369j) \cdot \frac{30 + j \cdot 5 \cdot 10008 \cdot 10^{-3}}{30 + 2j \cdot 5 \cdot 10008 \cdot 10^{-3}} = -0.097 - 0.806j \text{ А,}$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I25} = |I_{25}| = 0.812$; аргумент: $\varphi_{25} = \arg_{\deg}(I_{25}) = -96.87$.

$$I_{35} = I_{15} - I_{25} = 0.228 - 1.369j - (-0.097 - 0.806j) = 0.325 - 0.563j \text{ А,}$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{I35} = |I_{35}| = 0.65$; аргумент: $\varphi_{35} = \arg_{\deg}(I_{35}) = -60$.

Миттєві значення струмів п'ятої гармоніки:

$$i_{15}(\omega, t) = \text{mod}_{I15} \sqrt{2} \cdot \sin(5\omega \cdot t + \varphi_{15}) = 1.388 \sqrt{2} \cdot \sin(5\omega \cdot t - 80.556) \text{ А,}$$

$$i_{25}(\omega, t) = \text{mod}_{I25} \sqrt{2} \cdot \sin(5\omega \cdot t + \varphi_{25}) = 0.812 \sqrt{2} \cdot \sin(5\omega \cdot t - 96.87) \text{ А,}$$

$$i_{35}(\omega, t) = \text{mod}_{I35} \sqrt{2} \cdot \sin(5\omega \cdot t + \varphi_{35}) = 0.65 \sqrt{2} \cdot \sin(5\omega \cdot t - 60) \text{ А.}$$

Миттєві значення струмів дорівнюють сумі миттєвих значень окремих гармонік:

$$i_1(\omega, t) = i_{11}(\omega, t) + i_{13}(\omega, t) + i_{15}(\omega, t)$$

$$i_2(\omega, t) = i_{21}(\omega, t) + i_{23}(\omega, t) + i_{25}(\omega, t)$$

$$i_3(\omega, t) = i_{31}(\omega, t) + i_{33}(\omega, t) + i_{35}(\omega, t)$$

$$i_1(\omega, t) = 1.388\sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - 80.55^\circ) + 0.639\sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 105.50^\circ) + 0.9\sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 103.28^\circ) \text{ А}$$

$$i_2(\omega, t) = 0.611\sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 83.95^\circ) + 0.583\sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 92.36^\circ) + 0.812\sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - 96.87^\circ) \text{ А},$$

$$i_3(\omega, t) = 0.15\sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 167.43^\circ) + 0.382\sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 135.29^\circ) + 0.65\sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - 60^\circ) \text{ А}.$$

4. Визначити покази амперметрів та вольтметрів електрної системи.

Покази амперметрів:

$$I_1 = \sqrt{(\text{mod}_{I1})^2 + (\text{mod}_{I3})^2 + (\text{mod}_{I5})^2} = \sqrt{0.63^2 + 0.9^2 + 1.388^2} = 1.773 \text{ А};$$

$$I_2 = \sqrt{(\text{mod}_{I2})^2 + (\text{mod}_{I3})^2 + (\text{mod}_{I5})^2} = \sqrt{0.583^2 + 0.611^2 + 0.812^2} = 1.172 \text{ А};$$

$$I_3 = \sqrt{(\text{mod}_{I3})^2 + (\text{mod}_{I3})^2 + (\text{mod}_{I5})^2} = \sqrt{0.15^2 + 0.382^2 + 0.65^2} = 0.768 \text{ А}.$$

Обчислимо покази вольтметра:

$$U_{V1} = I_2 j \cdot \omega \cdot L = (-0.024 + 0.583j) \cdot j \cdot 10008 \cdot 10^{-3} = -4.662 - 0.192j \text{ В},$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{U_{V1}} = |U_{V1}| = 4.666$; аргумент: $\phi_1 = \arg_{\deg}(U_{V1}) = -177.637^\circ$.

$$U_{V3} = I_2 j \cdot 3 \cdot \omega \cdot L = (0.064 + 0.608j) \cdot j \cdot 3 \cdot 10008 \cdot 10^{-3} = -14.58 + 1.545j \text{ В},$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{U_{V3}} = |U_{V3}| = 14.662$; аргумент: $\phi_3 = \arg_{\deg}(U_{V3}) = 173.953^\circ$.

$$U_{V5} = I_2 j \cdot 5 \cdot \omega \cdot L = (-0.097 - 0.806j) \cdot j \cdot 5 \cdot 10008 \cdot 10^{-3} = 32.254 - 3.886j \text{ В},$$

показникова форма - модуль: $\text{mod}_{U_{V5}} = |U_{V5}| = 32.487$; аргумент: $\phi_5 = \arg_{\deg}(U_{V5}) = 173.953^\circ$.

$$\text{Отже, } U_V = \sqrt{(\text{mod}_{U_{V1}})^2 + (\text{mod}_{U_{V3}})^2 + (\text{mod}_{U_{V5}})^2} = \sqrt{4.666^2 + 14.662^2 + 32.487^2} = 35.946 \text{ В}.$$

5. Розрахувати потужності P, Q, S , Ті коефіцієнт потужності джерела.

Активна потужність джерела розраховується за формулою:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_{(n)} = U_{(0)} I_{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{(n)} I_{(n)} \cos \phi_{(n)},$$

$$P = U_1 \cdot \text{mod}_{111} \cdot \cos(\phi_{11}^\circ) + U_3 \cdot \text{mod}_{113} \cdot \cos(\phi_{13}^\circ) + U_5 \cdot \text{mod}_{115} \cdot \cos(\phi_{15}^\circ)$$

$$P = (56.886 + 16.881j) \cdot 0.639 \cos(105.504^\circ) + (14.619 + 8.44j) \cdot 0.9 \cos(103.288^\circ) + (4.873 - 8.44j) \cdot 1.388 \cos(-80.556^\circ) = -11.627 - 6.55j \text{ Вт.}$$

Цю потужність показує ватметр.

Потужність, що споживається активними опорами:

$$P_{\text{нi}} = R \cdot \left[(\text{mod}_{131})^2 + (\text{mod}_{133})^2 + (\text{mod}_{135})^2 \right] = 30 (0.15^2 + 0.38^2 + 0.65^2) = 17.712 \text{ Вт.}$$

$$\text{Баланс активних потужностей виконується } (P = P_{\text{нi}}) : 2.113 = 2.113.$$

Реактивна потужність обчислюється за формулою:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_{(n)} I_{(n)} \sin \phi_{(n)}.$$

$$Q = U_1 \cdot \text{mod}_{111} \cdot \sin(\phi_{11}^\circ) + U_3 \cdot \text{mod}_{113} \cdot \sin(\phi_{13}^\circ) + U_5 \cdot \text{mod}_{115} \cdot \sin(\phi_{15}^\circ)$$

$$Q = (56.886 + 16.881j) \cdot 0.639 \sin(105.504^\circ) + (14.619 + 8.44j) \cdot 0.9 \sin(103.288^\circ) + (4.873 - 8.44j) \cdot 1.388 \sin(-80.556^\circ) = 41.148 + 29.339j \text{ Вар.}$$

$$\text{Повна потужність } S = U \cdot I.$$

Визначимо діюче значення вхідної напруги, обмежуючись трьома змінними:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2} = \sqrt{(56.886 + 16.881j)^2 + (14.619 + 8.44j)^2 + (4.873 - 8.44j)^2} = 58.041 + 17.962j \text{ В.}$$

$$\text{Тоді } S = U \cdot I_1 = (58.041 + 17.962j) \cdot 1.773 = 102.918 + 31.851j \text{ ВА}$$

$$\text{Потужність спотворення } T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = 95.344 + 20.92j \text{ ВА.}$$

$$\text{Коефіцієнт потужності } \lambda = \frac{P}{S} = -0.121 - 0.026j.$$

6. Записати умову резонансу кола для k-ї гармоніки. Розрахувати величину ємності C чи індуктивності L у вітці з джерелом \mathcal{E} за умовою резонансу для всього кола для третьої гармоніки. Визначити вхідний опір кола для третьої гармоніки при резонансі.

Вхідний опір для k-ї гармоніки:

$$Z(k) = \frac{1}{j \cdot k \cdot \omega C} + \frac{(R + j \cdot k \cdot \omega L) \cdot j \cdot k \cdot \omega L}{R + 2j \cdot k \cdot \omega L}$$

$$Z(k) = \frac{L^2 \cdot R \cdot k^2 \cdot \omega^2}{4L^2 \cdot k^2 \cdot \omega^2 + R^2} - \frac{4L^2 \cdot k^2 \cdot \omega^2 - 2 \cdot C \cdot L^3 \cdot k^4 \cdot \omega^4 - C \cdot L \cdot R^2 \cdot k^2 \cdot \omega^2 + R^2}{4 \cdot C \cdot L^2 \cdot k^3 \cdot \omega^3 + C \cdot R^2 \cdot k \cdot \omega} \cdot j$$

Умова резонансу: реактивна складова вхідного опору рівна нулю ($\text{Im}(Z(k)) = 0$)

$$X_k = -\frac{4L^2 \cdot k^2 \cdot \omega^2 - 2 \cdot C \cdot L^3 \cdot k^4 \cdot \omega^4 - C \cdot L \cdot R^2 \cdot k^2 \cdot \omega^2 + R^2}{4 \cdot C \cdot L^2 \cdot k^3 \cdot \omega^3 + C \cdot R^2 \cdot k \cdot \omega} = 0$$

Для третьої гармоніки ($k=3$) знайдемо ємність за умовою резонансу:

$$-\frac{4L^2 \cdot 3^2 \cdot \omega^2 - 2 \cdot C \cdot L^3 \cdot 3^4 \cdot \omega^4 - C \cdot L \cdot R^2 \cdot 3^2 \cdot \omega^2 + R^2}{4 \cdot C \cdot L^2 \cdot 3^3 \cdot \omega^3 + C \cdot R^2 \cdot 3 \cdot \omega} = 0 \text{ solve, } C = \frac{89}{4104000} = 21.686 \times 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Вхідний опір кола для третьої гармоніки при резонансі:

$$\text{Re}(Z(3)) = \frac{480}{89} = 5.393 \text{ Ом.}$$