

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧОТИРИЕЛЕМЕНТНИХ ДВОПОЛЮСНИКІВ В УМОВАХ НЕСИНУСОЇДНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВОГО РЕЖИМУ ЗРІВНОВАЖУВАННЯ

© Михайло Бурбело¹, Євген Володарський², 2005

¹Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, 286021, Вінниця. Україна

²Національний технічний університет України "КПІ",
пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна

Запропоновано спосіб вимірювання параметрів чотириелементних двополіусників в умовах несинусоїдності з використанням фазового режиму, який характеризується високою збіжністю зрівноважування.

Предложен способ измерения параметров четырехэлементных двухполюсников в условиях несинусоидальности с использованием фазового режима, характеризующийся высокой сходимостью процесса уравновешивания.

The way of measurement of parameters four-element one-ports in non-sine wave conditions with use of a phase mode described by high convergence of process of an equilibration is offered.

Вступ. Під час аналізу квазізрівноважених частотно-варіаційних систем, призначених для вимірювання параметрів електротехнічних об'єктів в умовах несинусоїдності напруги (струму) живлення, можливим є використання частотної, часової або спектральної областей. Вибір тієї чи іншої області визначається простотою та можливістю розв'язання конкретної задачі.

Застосування частотної області забезпечує розв'язання задач синтезу вимірювальних систем, формування умов та критеріїв квазірівноваги, але вимагає отримання інформації про гармонічні складові періодичних несинусоїдних сигналів, що є достатньо складною технічною задачею.

Другий підхід до вимірювання параметрів об'єктів в умовах несинусоїдності оснований на безпосередньому використанні миттєвих значень напруг і струмів. Недоліком використання миттєвих величин є різке зростання похибок визначення параметрів складних об'єктів, зумовлених наявністю похибок дискретизації та квантування, через погану зумовленість систем рівнянь, на основі яких визначають параметри.

Третій підхід до вимірювання параметрів об'єктів в умовах несинусоїдності полягає в використанні інтегральних спектральних параметрів. Розробці спектрально-варіаційних вимірювальних систем присвячені праці [1–5]. Проте такі системи, на наш погляд, досліджені недостатньо.

Ставиться задача розробки та аналізу способу вимірювання з використанням у ході зрівноваження фазового режиму.

Обґрунтування результатів. Аналіз вимірювальних систем в частотній області виконується за допомогою комплексної функції

$$\underline{W} = W e^{j\theta} = \operatorname{Re} \underline{W} + j \operatorname{Im} \underline{W},$$

яка є відношенням комплексних напруг, що характеризують вимірювання. Доцільність її застосування пояснюється двома важливими обставинами: по-перше, використання детекторів квазірівноваги передбачає порівняння складових двох комплексних напруг; по-друге, функція \underline{W} дає змогу зв'язати вихідні напруги з комплексним опором \underline{Z} чи комплексною провідністю \underline{Y} вимірюваного двополіусника, оскільки вона є раціональною або дробово-раціональною їх функцією.

Аналіз вимірювальних систем в спектральній області оснований на спектральній функції [6]

$$\underline{W}_C = W_C e^{j\theta_C} = \operatorname{Re} \underline{W}_C + j \operatorname{Im} \underline{W}_C.$$

Модуль та дійсну складову спектральної функції \underline{W}_C визначають за формулами

$$W_C = \sqrt{\frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_1^2(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_2^2(t) dt}}; \quad \operatorname{Re} \underline{W}_C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_2^2(t) dt},$$

де $u_1(t)$, $u_2(t)$ – миттєві напруги, що надходять на входи детекторів квазірівноваги.

Що стосується уявної складової спектральної функції \underline{W}_C , то її експериментальне визначення вима-

гає застосування так званих спектральних фазозсувальних пристроїв.

Спектральна функція забезпечує відповідність методів аналізу і синтезу спектрально-варіаційних та частотно-варіаційних систем.

У квазірівноважених частотно-варіаційних системах можуть бути використані модульні, компонентні, фазові, модульно-компонентні або компонентно-фазові умови квазірівноваги. У модульному режимі стану квазірівноваги відповідає встановлення рівності $W(\omega)=const$. В компонентному режимі стану квазірівноваги відповідає встановлення рівності $ReW(\omega)=const$. Фазові умови квазірівноваги характеризуються незалежністю від частоти відношень складових ReW та ωImW або ReW та ImW/ω . Інші умови характеризуються складнішими частотними залежностями складових функції $W(j\omega)$.

Для забезпечення роздільного вимірювання параметрів чотириелементного RL -двополюсника (рис. 1) з використанням фазового режиму зрівноважування в частотно-варіаційних вимірювальних системах необхідно сформувати дві комплексні функції у вигляді

$$\underline{W}_1(j\omega) = \frac{Z(j\omega) - (k_1 + k_2 j\omega\tau)R}{j\omega\tau R};$$

$$\underline{W}_2(j\omega) = \frac{Z(j\omega) - (k_1 + k_2 j\omega\tau)R}{R};$$

де R – опір зразкової міри; τ – стала часу диференціювання; k_1, k_2 – коефіцієнти масштабування.

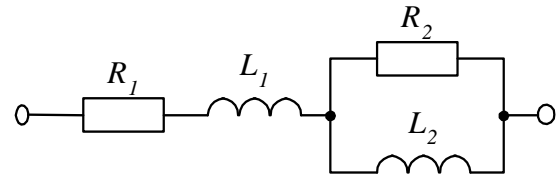


Рис. 1. Вимірюваний RL -двополюсник

Отже, вимірювання характеризується комплексними функціями кола

$$\underline{W}_1(j\omega) = m_1 + m_2 \frac{1}{1 + j\omega\tau_2} + \frac{n_1}{j\omega};$$

$$\underline{W}_2(j\omega) = \tau(n_1 + n_2 \frac{j\omega\tau_2}{1 + j\omega\tau_2} + j\omega m_1),$$

в яких значення коефіцієнтів будуть такими:

$$m_1 = \frac{L_1 - k_2\tau R_0}{\tau R_0}; \quad m_2 = \frac{L_2}{\tau R_0};$$

$$n_1 = \frac{R_1 - k_1 R_0}{\tau R_0}; \quad n_2 = \frac{R_2}{\tau R_0}.$$

На рис. 2, а зображені залежності $ImW_1/\omega, \omega ImW_1$, що побудовані в функції ReW_1 , а на рис. 2, б зображені залежності $ImW_2/\omega, \omega ImW_2$, що побудовані в функції ReW_2 , які ілюструють особливості застосування фазового режиму вимірювання у частотно-варіаційних вимірювальних системах.

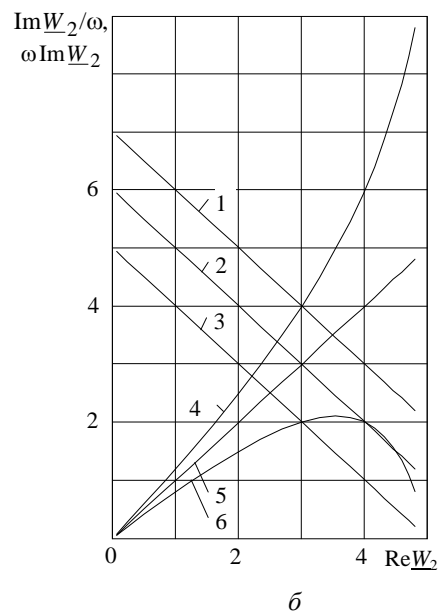
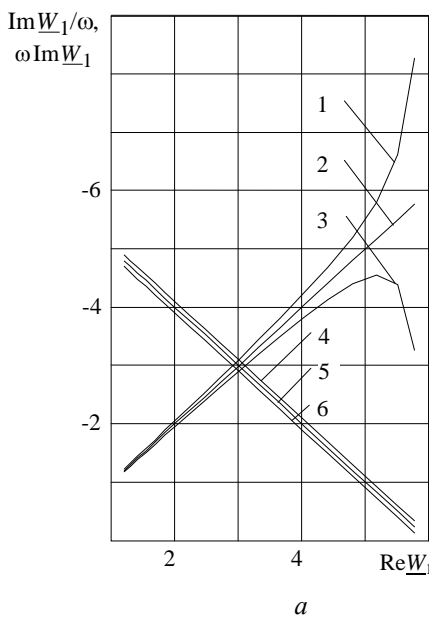


Рис. 2. Графіки $ImW_1/\omega, \omega ImW_1$ (а) та $ImW_2/\omega, \omega ImW_2$ (б), що зумовлені варіацією частоти

Залежності $\text{Im} \underline{W}_1 / \omega$ та $\omega \text{Im} \underline{W}_1$ побудовані для трьох значень k_1 ($R_0 k_1 < R_1$; $R_0 k_1 = R_1$; $R_0 k_1 > R_1$). Залежності $\text{Im} \underline{W}_2 / \omega$ та $\omega \text{Im} \underline{W}_2$ побудовані для трьох значень k_2 ($R_0 \tau k_2 < L_1$; $R_0 \tau k_2 = L_1$; $R_0 \tau k_2 > L_1$). Вони відображають відносну зміну складових комплексної частотної функції під час варіації частоти ($\tau = 0, 2 \dots 2$) струму живлення.

В області порівняно низьких частот графіки $\text{Im} \underline{W}_1 / \omega$ і в області порівняно високих частот графіки $\omega \text{Im} \underline{W}_2$ різко нелінійні. Це пояснюється виразами для вказаних складових комплексних функцій

$$\underline{W}_1 = (m_1 + m_2 \cos^2 \alpha_2(\omega)) + \frac{1}{j\omega} (n_1 + n_2 \sin^2 \alpha_2(\omega))$$

$$\underline{W}_2 = (n_1 + n_2 \sin^2 \alpha_2(\omega)) + j\omega(m_1 + m_2 \cos^2 \alpha_2(\omega))$$

які мають відповідно вигляд

$$Q = \begin{vmatrix} \text{Im} \underline{W}(j\omega_1) / \omega_1 - \text{Im} \underline{W}(j\omega_2) / \omega_2 & \text{Re} \underline{W}(j\omega_1) - \text{Re} \underline{W}(j\omega_2) \\ \text{Re} \underline{W}(j\omega_1) - \text{Re} \underline{W}(j\omega_2) & \omega_2 \text{Im} \underline{W}(j\omega_2) - \omega_1 \text{Im} \underline{W}(j\omega_1) \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Для забезпечення роздільного вимірювання параметрів чотириелементного RL -двополюсника (рис. 1) в умовах несинусоїдності з використанням інтегральних величин формуються дві спектральні функції у вигляді

$$\underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}) = \frac{\underline{Z}_C(j\tilde{\omega}) - (k_1 + k_2 j\tilde{\omega}\tau)R}{j\tilde{\omega}\tau R};$$

$$\underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}) = \frac{\underline{Z}_C(j\tilde{\omega}) - (k_1 + k_2 j\tilde{\omega}\tau)R}{R},$$

де $\underline{Z}_C(j\tilde{\omega})$ – спектральний опір вимірюваного двополюсника; $\tilde{\omega}$ – ефективне значення частоти напруги живлення несинусоїдної форми.

На рис. 3, а зображені залежності $\text{Im} \underline{W}_{C1} / \tilde{\omega}$, $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C1}$, що побудовані в функції $\text{Re} \underline{W}_{C1}$, а на рис. 3, б зображені залежності $\text{Im} \underline{W}_{C2} / \tilde{\omega}$, $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C2}$, що побудовані в функції $\text{Re} \underline{W}_{C2}$, які ілюструють особливості застосування фазового режиму вимірювання в спектрально-варіаційних вимірювальних системах.

Залежності $\text{Im} \underline{W}_{C1} / \tilde{\omega}$, $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C1}$ побудовані для трьох значень k_1 ($R_0 k_1 < R_1$; $R_0 k_1 = R_1$; $R_0 k_1 > R_1$). Залежності $\text{Im} \underline{W}_{C2} / \tilde{\omega}$, $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C2}$ побудовані для трьох значень k_2 ($R_0 \tau k_2 < L_1$; $R_0 \tau k_2 = L_1$; $R_0 \tau k_2 > L_1$) при

$$\text{Im} \underline{W}_1 / \omega = - \left(\frac{n_1}{\omega^2} + n_2 \tau^2 \cos^2 \alpha_2(\omega) \right);$$

$$\omega \text{Im} \underline{W}_2 = \omega^2 m_1 + \frac{m_2}{\tau^2} \sin^2 \alpha_2(\omega),$$

де α_2 – кут втрат частини вимірюваного двополюсника, що складається з елементів R_2 , L_2 , причому $\cos^2 \alpha_2(\omega) = 1 / [1 + (\omega L_2 / R_2)^2]$.

В момент досягнення стану квазірівноваги $R_0 k_1 = R_1$ ($n_1 = 0$), як видно з рис. 2, а, Графіки $\text{Im} \underline{W}_1 / \omega$ та $\omega \text{Im} \underline{W}_1$ взаємно перпендикулярні, а у момент досягнення стану квазірівноваги $R_0 \tau k_2 = L_1$ ($m_1 = 0$), як видно з рис. 2, б, взаємно перпендикулярними будуть графіки $\text{Im} \underline{W}_2 / \omega$ та $\omega \text{Im} \underline{W}_2$, що можна використати для фіксування цих станів квазірівноваги, якщо сформулювати критерій квазірівноваги у вигляді

відносному значенні частоти першої гармоніки $\tau_1 = 0,5$ ($\omega_1 \tau_2 = 0,5$, де τ_2 – стала часу вимірюваного двополюсника L_2 / R_2). Вони відображають зміну складових спектральної функції під час варіації третьої гармоніки струму ($\mu_3 = 0, 1 \dots 2$) через вимірюваний двополюсник.

Графіки спектральних характеристик, на відміну від графіків частотних характеристик (див. рис. 2), лінійні. Це пояснюється лінійністю залежностей складових спектральних функцій, викликаних варіацією амплітуди будь-якої з гармонік,

$$\text{Re} \underline{W}_C = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2 \text{Re} \underline{W}(j\omega_n)}{\sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2};$$

$$\text{Im} \underline{W}_C / \tilde{\omega} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2 \text{Im} \underline{W}(j\omega_n) / \omega_n}{\sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2};$$

$$\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_C = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2 \omega_n \text{Im} \underline{W}(j\omega_n)}{\sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2}.$$

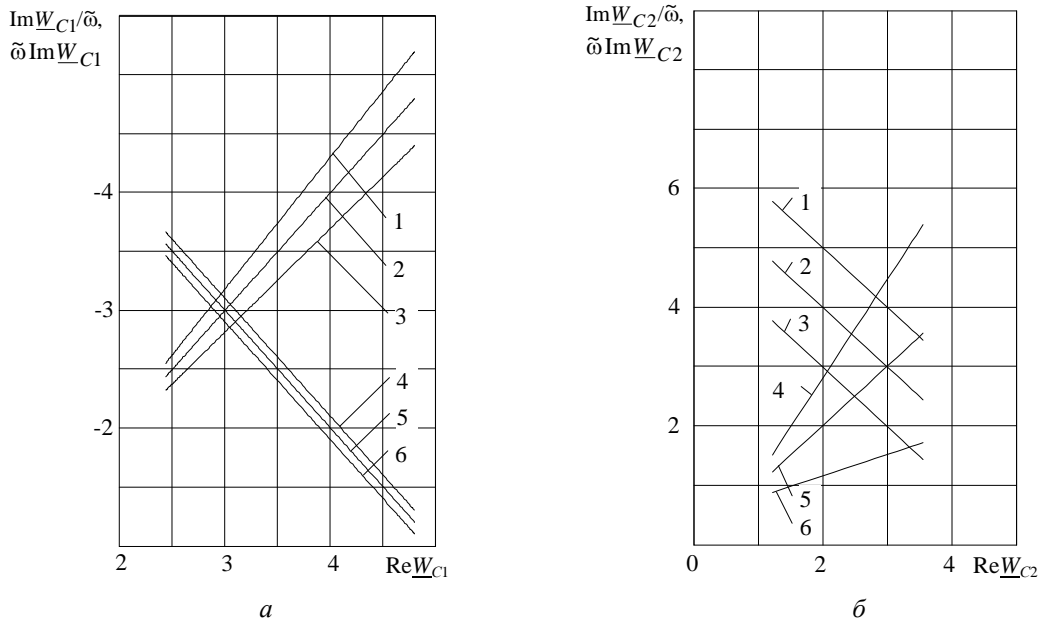


Рис. 3. Графіки $\text{Im} \underline{W}_{C1} / \tilde{\omega}$, $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C1}$ (а) та $\text{Im} \underline{W}_{C2} / \tilde{\omega}$, $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C2}$ (б),
що зумовлені варіацією спектра струму

У момент досягнення стану квазірівноваги $R_0 k_1 = R_1$, як видно з рис. 3, а, графіки $\text{Im} \underline{W}_{C1} / \tilde{\omega}$ та $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C1}$ взаємно перпендикулярні, а в момент досягнення стану квазірівноваги $R_0 \tau k_2 = L_1$, як видно

з рис. 3, б, взаємно перпендикулярними будуть графіки $\text{Im} \underline{W}_{C2} / \tilde{\omega}$ та $\tilde{\omega} \text{Im} \underline{W}_{C2}$, що можна використати для фіксування цих станів квазірівноваги, якщо сформулювати критерій квазірівноваги у такому вигляді:

$$Q = \begin{vmatrix} \text{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) / \tilde{\omega}_1 - \text{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) / \tilde{\omega}_2 & \text{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) - \text{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) \\ \text{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) - \text{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) & \tilde{\omega}_2 \text{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) - \tilde{\omega}_1 \text{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

Поряд з (2) у разі застосування функції \underline{W}_{C1} можна також використати критерій

$$Q_1 = \frac{\text{Im} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_1) / \tilde{\omega}_1 - \text{Im} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_2) / \tilde{\omega}_2}{\text{Re} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_1) - \text{Re} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_2)} + \frac{\text{Re} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_1) - \text{Re} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_2)}{\tilde{\omega}_1 \text{Im} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_1) - \tilde{\omega}_2 \text{Im} \underline{W}_{C1}(j\tilde{\omega}_2)} = 0, \quad (3)$$

а у разі застосування функції \underline{W}_{C2} – критерій

$$Q_2 = \frac{\tilde{\omega}_1 \text{Im} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_1) - \tilde{\omega}_2 \text{Im} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_2)}{\text{Re} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_1) - \text{Re} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_2)} + \frac{\text{Re} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_1) - \text{Re} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_2)}{\text{Im} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_1) / \tilde{\omega}_1 - \text{Im} \underline{W}_{C2}(j\tilde{\omega}_2) / \tilde{\omega}_2} = 0. \quad (4)$$

Застосування критеріїв квазірівноваги (2) для обох функцій або (3) та (4) розв'язує контури регулювання і забезпечує можливість вимірювання параметрів чотири-елементних двополосників в умовах несинусоїдної форми напруги живлення в скалярному режимі.

На рис. 4 зображені залежності функцій $Q_1(k_1)$ та $Q_2(k_2)$, що визначені для спектральних функцій \underline{W}_{C1} та \underline{W}_{C2} відповідно за формулами (3) та (4). При $R_0 k_1 = R_1$ ($R_1 = 1 \text{ Ом}$) значення $Q_1 = 0$, а при $R_0 \tau k_2 = L_1$ ($\omega_1 L_1 = 4 \text{ Ом}$) значення $Q_2 = 0$. Графіки побудовані для випадку, якщо варіація спектра здійснюється зменшенням амплітуди першої гармоніки струму на 25 відсотків, а відносний вміст струму третьої гармоніки становить 30%. Вимірювання виконують за відносного значення частоти першої гармоніки $\omega_1 = 0,2; 0,5; 1$ (відповідні графіки позначені цифрами 1, 2, 3).

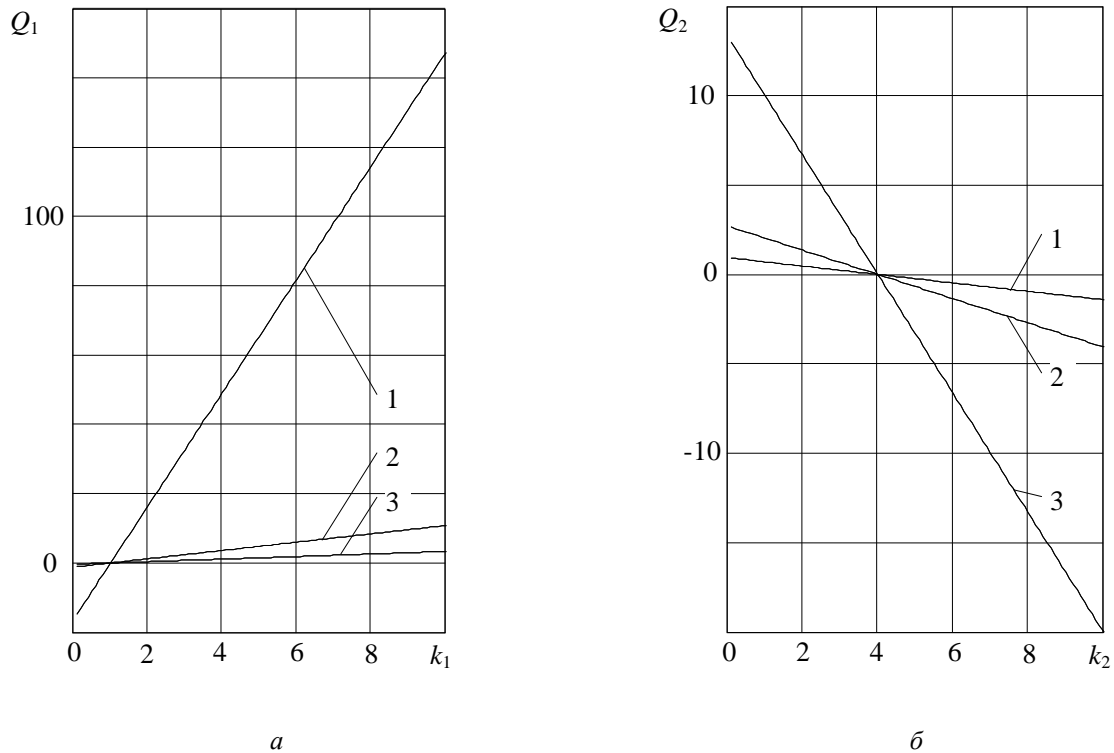


Рис. 4. Залежності $Q_1(k_1)$ та $Q_2(k_2)$ для критеріїв відповідно (3) та (4)

Графіки $Q_1(k_1)$ не залежать від k_2 , а $Q_2(k_2)$ – від k_1 . Отже, вимірювання характеризуються достатньою збіжністю в області середніх частот $\omega_1 = 0,5$. В області низьких частот $\omega_1 = 0,2$ збіжність погіршується через низьку чутливість показчика Q_2 , а в області порівняно високих частот $\omega_1 = 1$ – через низьку чутливість показчика Q_1 .

У момент досягнення станів квазірівноваги, що характеризуються виконанням одночасно двох умов $R_0 k_1 = R_1$ та $R_0 \tau k_2 = L_1$, графіки $2 \operatorname{Im} \underline{W}_{C1} / \tilde{\omega}$ (рис. 3, а), а також графіки $5 \tilde{\omega} \operatorname{Im} \underline{W}_{C2}$ (рис. 3, б) проходять через початок координат. В момент досягнення станів квазірівноваги, що характеризуються виконанням умов $R_0 k_1 = R_1 + R_2$ та $R_0 \tau k_2 = L_1 + L_2$, графіки $5 \tilde{\omega} \operatorname{Im} \underline{W}_{C1}$ (рис. 3, а), а також графіки $2 \operatorname{Im} \underline{W}_{C2} / \tilde{\omega}$ (рис. 3, б) теж проходять через початок координат.

Критерії квазірівноваги, які можна використати для фіксування фазових станів квазірівноваги в умовах несинусоїдності, мають такий вигляд:

$$Q = \begin{vmatrix} \operatorname{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) & \operatorname{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) / \tilde{\omega}_1 \\ \operatorname{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) & \operatorname{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) / \tilde{\omega}_2 \end{vmatrix} = 0;$$

$$Q = \begin{vmatrix} \operatorname{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) & \tilde{\omega}_1 \operatorname{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_1) \\ \operatorname{Re} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) & \tilde{\omega}_2 \operatorname{Im} \underline{W}_C(j\tilde{\omega}_2) \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

На рис. 5, а наведені залежності $Q_1(k_1)$, що побудовані за формулами (5) при різних значеннях $k_2 = \{3; 4; 5\}$. На рис. 5, б наведені залежності $Q_2(k_2)$, що побудовані за формулами (6) при різних значеннях $k_1 = \{0; 1; 2\}$. Варіація здійснюється зменшенням амплітуди першої гармоніки струму на 25 відсотків. Вимірювання виконують в області порівняно середніх частот: відносно значення частоти першої гармоніки $\omega_1 = 0,5$.

Залежності $Q_1(k_1)$ підтверджують, що якщо досягнутий стан квазірівноваги $R_0 \tau k_2 = L_1$, то за критерієм (5) можна зафіксувати стан квазірівноваги $R_0 k_1 = R_1$ ($R_1 = 1 \text{ Ом}$). Залежності $Q_2(k_2)$ підтверджують, що якщо досягнутий стан квазірівноваги $R_0 k_1 = R_1$, то за критерієм (6) можна зафіксувати стан квазірівноваги $R_0 \tau k_2 = L_1$ ($\omega_1 L_1 = 4 \text{ Ом}$).

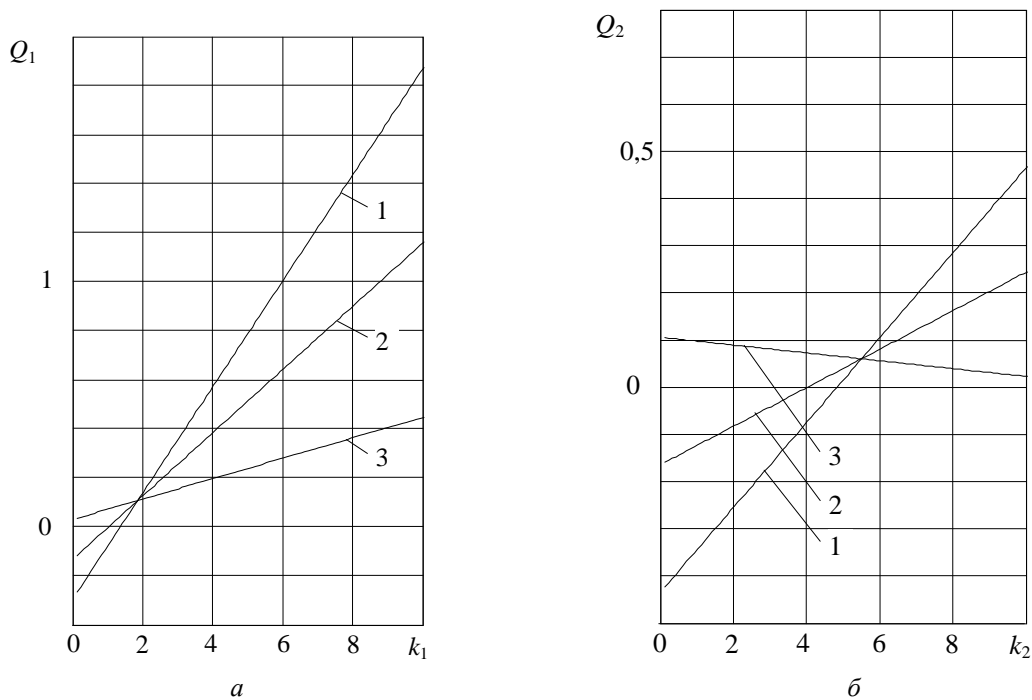


Рис. 5. Графіки $Q_1(k_1)$, $Q_2(k_2)$, що побудовані за формулами відповідно (5) та (6) при різних значеннях суміжного параметра

Отже, фазовий режим вимірювання можна рекомендувати для ширшого застосування в умовах несинусоїдності, оскільки для його реалізації можна використувати просту варіацію амплітуди основної гармоніки.

Висновки. Запропоновано спосіб вимірювання параметрів чотириелементних двополосників в умовах несинусоїдності з використанням фазового режиму зрівноважування, який характеризується високою стійкістю і може бути використаний за змін вимірюваних параметрів в широкому діапазоні їх значень.

1. Бурбело М.Й. Диференціація параметрів спектральних опорів та компенсаційно-мостові кола для їх вимірювання // *Технічна електродинаміка*, 2001, №6. – С.69-71. 2. Бурбело М.И. Квазиуравновешенные цепи для измерения

параметров многоэлементных двухполосников при несинусоидальном внешнем воздействии // *Измерительная техника*, 2003, №7. – С.31– 33. 3. Бурбело М.Й. Квазізрівноважений міст для вимірювання параметрів двополосників з магнітноз'язаними елементами в умовах несинусоїдності напруги живлення // *Технічна електродинаміка*, 2003, №3. – С. 57-59. 4. Бурбело М.Й., Бабенко О.В. Вимірювання параметрів триелементних електричних двополосників при дії періодичних несинусоїдних струмів // *Вісник ВПІ*, 2003, № 1. – С. 28-31. 5. Бурбело М.Й., Кравець О.М., Бабенко О.В. Вимірювання параметрів багатоеlementних двополосників при дії періодичних несинусоїдних струмів // *Вісник ВПІ*, 2003, №3. – С. 39 – 44. 6. Штамбергер Г.А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравновешивания) / Под ред. К.Б. Карандеева. – Новосибирск. 1972.