

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКООМНИХ ТРИКОМПОНЕНТНИХ КОМПЛЕКСНИХ ОПОРІВ МЕТОДОМ ЗМІЩЕННЯ СИСТЕМИ КООРДИНАТ ЗА СТРУМОМ

© Грибок Микола, 2008

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна
тел (032)258-26-19, 238-02-60

Досліджено можливість вимірювання параметрів високоомних трикомпонентних комплексних опорів у діапазоні частот методом зміщення системи координат за складовими струму.

Исследована возможность измерения параметров высокоомных трикомпонентных комплексных сопротивлений в диапазоне частот методом смещения системы координат по току.

The high complexe three-elements resistance parameters in a range of frequencies by the coordinates system displacement method on the current components is investigated.

1. Вступ. У багатьох галузях науки і техніки [1, 2, 3] виникає необхідність визначення параметрів комплексних опорів у діапазоні частот. Часто компоненти комплексних опорів відповідають певним якісним характеристикам об'єкта досліджень, а тому точність їхнього вимірювання є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних джерел та попередніх розробок. Методи зрівноваження (компенсаційні або мостові [1, 2]) забезпечують високі метрологічні характеристики лише на фіксованих частотах, як правило, 1 кГц. Аналогічний недолік притаманний засобам [7], в яких реалізовано метод фазочутливого детектування. Впровадження засобів обчислювальної техніки у вимірювальні кола [4, 5, 6, 7, 8] відкрило нові можливості у вимірюванні параметрів комплексних опорів. У [5] досліджена можливість використання методу заміщення для вимірювання RLC-параметрів. Однак необхідність наявності апріорної інформації про комплексний вхідний опір вимірювача фази і вимірювача діючого значення напруги і застосування високоточного вимірювача фази у діапазоні частот звужують області використання і знижують потенційну точність вимірювань. Впровадження алгоритмічних методів [9, 10, 11] у вимірювання відкрило нові можливості для визначення параметрів векторних величин методом зміщення системи координат за опором і провідністю [12], а також за напругою [13]. У [14] вперше досліджена можливість використання методу зміщення системи координат за струмом для вимірювання складових паралельних двокомпонентних комплексних

опорів. Однак увімкнення послідовно з досліджуваним комплексним опором зразкового активного опору для вимірювання струму призвело до виникнення методичної похибки вимірювань [14].

3. Мета дослідження. Розроблення методу та схеми підвищення точності вимірювання складових високоомних трикомпонентних комплексних опорів у діапазоні частот методом зміщення системи координат за струмом.

4. Схема вимірювання та основні математичні співвідношення. Схеми вимірювання RLC-параметрів комплексних опорів синтезовано на основі означень комплексного опору і провідності та законів Ома на змінному струмі

$$\mathbf{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \mathbf{r} + \mathbf{j}x;$$

$$\mathbf{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \mathbf{g} - \mathbf{j}b.$$

Узагальнена структурна схема вимірювання (рис.1) містить джерело синусоїдної напруги ДСН, комутатор К, блок управління БУ, аналого-цифровий перетворювач АЦП діючого значення напруги, цифровий частотомір ЦЧ, обчислювальний пристрій ОП, зразкові активні опори R_{01}, R_{02}, R_1, R_2 .

Спад напруги на резисторі R_{01} пропорційний до значення струму \dot{i}_1 , що протікає через досліджуваний комплексний опір \mathbf{Z} . На резисторі R_{02} маємо спад

напруги, що пропорційний до значення струму i_2 , а на резисторі R_1 маємо спад напруги, що пропорційний до i_{R0} . Значення синфазної i_x та квадратурної i_y складових струмів у комплексному опорі \dot{Z} визначаються із співвідношення, якщо $R_{01} \ll |\dot{Z}|$, $|\dot{Z}_v| \gg |\dot{Z}|$

$$i_x = \frac{i_2^2 - i_1^2 - i_{R0}^2}{2i_{R0}}; \quad i_y = \sqrt{i_1^2 - i_x^2}.$$

Оскільки $i_{R0} = U_{23}/R_0$, то $y = i_x/U_{23}$, $b = i_y/U_{23}$, або $b = \sqrt{y^2 - g^2}$, де \dot{Z}_v – комплексний вхідний опір АЦП.

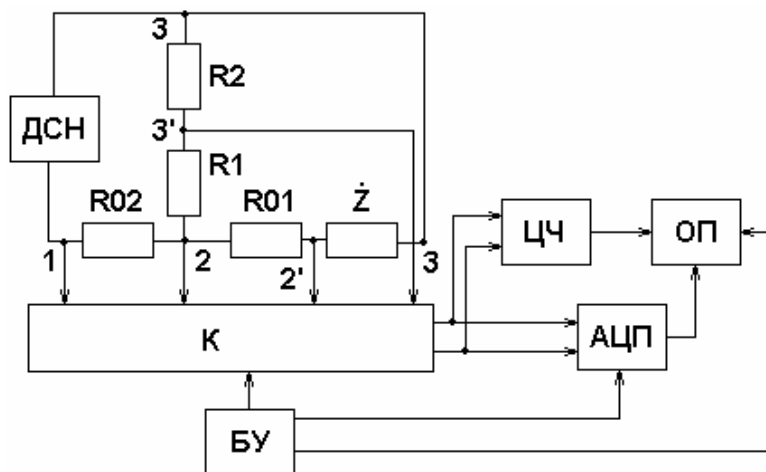


Рис. 1. Узагальнена структурна схема вимірювача RLC-параметрів високоомних комплексних опорів методом зміщення системи координат за струмом

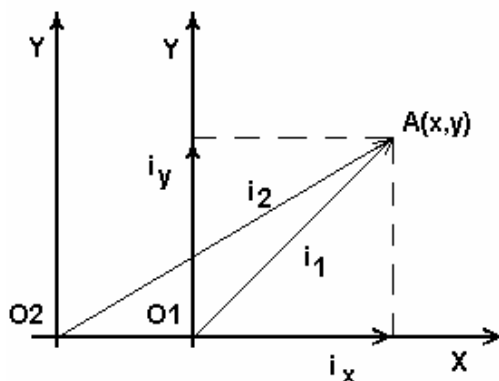


Рис. 2. Координатні системи при вимірюванні синфазної та квадратурної складових струмів

За $R_{01} \approx |\dot{Z}|$, $|\dot{Z}_v| \approx |\dot{Z}|$, виникає значна методична похибка знаходження g і b [16]. Забезпечення $R_{01} \ll |\dot{Z}|$ не завжди технічно можливе. Недоліком умови $R_{01} \ll |\dot{Z}|$ є і те, що напруга $U_{22} \ll U_{2'3}$, а це означає, що вольтметр буде працювати на різних піддіапазонах вимірювань при знаходженні U_{22} , U_{12} , U_{23} і $U_{2'3}$ [16]. Цей недолік можна усунути, замінивши

опір R_0 двома опороми R_1 і R_2 . Напругу U_{23} знаходимо з виразу $U_{23} = \frac{U_{2'3}}{k}$; де $k = R_1/(R_1 + R_2)$. Подамо комплексний опір $\dot{Z} = r + jx$ через провідність $Y = \frac{r}{Z^2} - j \frac{x}{Z^2} = g - jb$. Опір між точками 2 і 3 правої гілки $\dot{Z}_1 = \dot{Z} + R_{01} = (r + R_{01}) + jx = r_1 + jx_1$ виражаємо через провідність $\dot{Y}_1 = \frac{r_1}{Z_1^2} - j \frac{x_1}{Z_1^2} = g_1 - jb_1$.

Синфазна складова струму i_x , що протікає через провідність g_1 , дорівнює

$$i_x = \frac{i_2^2 - i_1^2 - i_{R0}^2}{2 i_{R0}}$$

де $i_2 = \frac{U_{12}}{R_{02}}$; $i_1 = \frac{U_{22'}}{R_{01}}$; $i_{R0} = \frac{U_{23}}{R_0}$. Визначаємо

провідність $g_1 = \frac{i_x}{U_{23}} = \frac{r_1}{Z_1^2}$.

Звідси $r_1 = g_1 * Z_1^2$; де $Z_1 = \frac{U_{23}}{i_1}$. Якщо

$R_1 \approx R_{02} \approx R_0$, напруги U_{23} , U_{12} і $U_{22'}$ будуть співмірними.

Оскільки значення опорів R_{01} і R_{02} відомі, то знаходимо синфазну $r = (r_1 - R_{01})$ і квадратурну складову опору $\dot{Z} x = \sqrt{Z_1^2 - r^2}$. За такої оцінки r і x опір R_{01} може бути співмірним з модулем комплексного опору \dot{Z} .

Для знаходження параметрів x_1, x_2, x_3 трикомпонентних комплексних опорів на двох частотах ω_1 і ω_2 визначаються $Re \dot{Z}(\omega_1, x_1, x_2, x_3)$, $Re \dot{Z}(\omega_2, x_1, x_2, x_3)$, $Im \dot{Z}(\omega_1, x_1, x_2, x_3)$ і $Im \dot{Z}(\omega_2, x_1, x_2, x_3)$. Розв'язанням системи рівнянь [15]

$$N_{11} = Re \dot{Z}(\omega_1, x_1, x_2, x_3);$$

$$N_{12} = Im \dot{Z}(\omega_1, x_1, x_2, x_3);$$

$$N_{21} = Re \dot{Z}(\omega_2, x_1, x_2, x_3);$$

$$N_{22} = Im \dot{Z}(\omega_2, x_1, x_2, x_3).$$

Знаходять значення x_1, x_2, x_3 .

5. Визначення RLC-параметрів трикомпонентних комплексних опорів. З урахуванням положень методу зміщення системи координат за струмом під час вимірювання параметрів комплексних опорів синтезуємо узагальнену структурну схему вимірювального кола (рис. 3). У ній як \dot{Z} подано об'єкт до-

сліджень як трикомпонентний комплексний опір ТКО. Залежно від конфігурації (архітектури) схеми математичну модель ТКО можна подати у вигляді комплексного опору \dot{Z} або комплексної провідності \dot{Y} . Якщо легше математично описати ТКО у вигляді провідності, то з виразу $\dot{Y} = g - j b$ легко перейти до подання опору $\dot{Z} = r + j x = \frac{g}{Y^2} + j \frac{b}{Y^2}$.

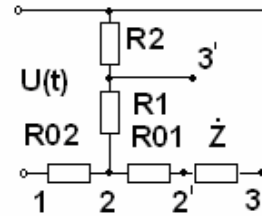


Рис. 3. Узагальнена схема вимірювального кола

Оскільки вимірювання здійснюється на двох частотах, то одержуємо системи рівнянь відповідно для послідовних і паралельних RLC-схем:

$$\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1; \dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 \quad \dot{Y}_1 = g_1 - j b_1; \dot{Y}_2 = g_2 - j b_2;$$

$$\dot{Z}_3 = (r_1 + R_0) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_0) + j x_2 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1^2};$$

$$\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2^2}; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_0) + j x_2;$$

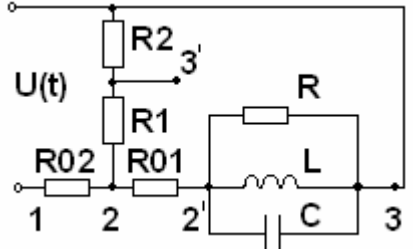
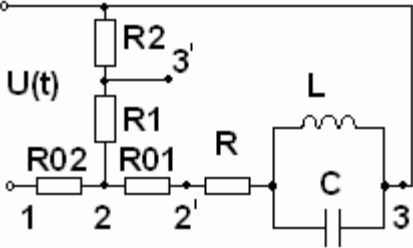
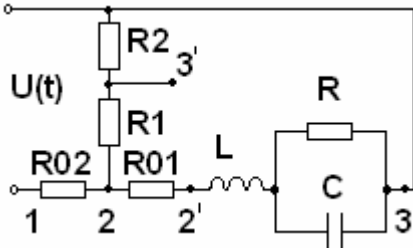
$$\dot{Z}_3 = (r_1 + R_0) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_0) + j x_2;$$

Отже, на підставі R_0, f_1, f_2 і виміряних напруг $U_{12}, U_{23}, U_{22'}$ можна визначити $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, r_1, r_2, x_1, x_2, Y_1, Y_2, g_1, g_2, b_1$ і b_2 . Ці значення повною мірою достатні для знаходження RLC-параметрів ТКО будь-якої конфігурації (таблиця). Результати вимірювань не залежать від значення коефіцієнта передачі аналого-цифрового перетворювача змінної напруги на код. Його стабільність вимагається лише на час визначення RLC-параметрів.

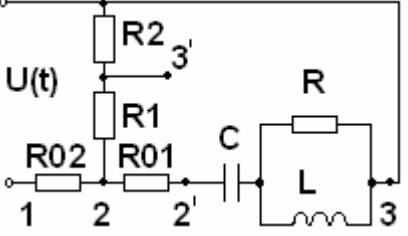
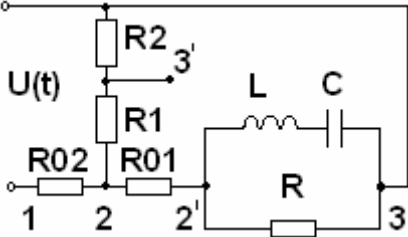
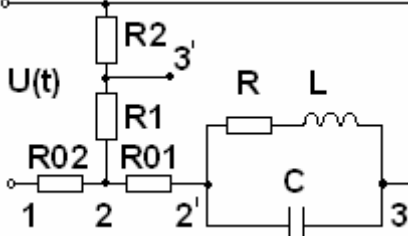
Схеми вимірювальних кіл та основні математичні співвідношення

№	Схема вимірювального кола	Основні математичні співвідношення
1	2	3
1		$\dot{Z}_1 = R + j(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}) = r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = R + j(\omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C}) = r_2 + j x_2;$

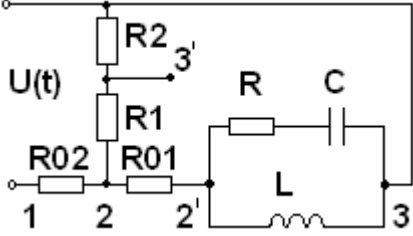
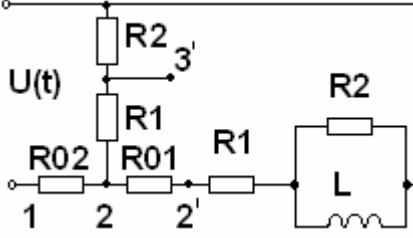
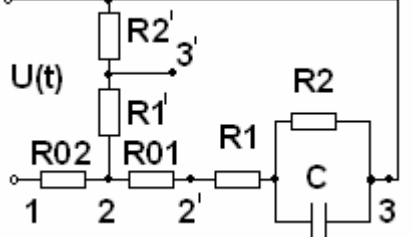
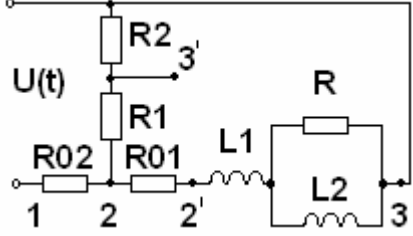
Продовження таблиці

1	2	3
	$R = r_1;$ $C = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \omega_2 (x_1 \omega_2 - x_2 \omega_1)}; L = \frac{x_2 \omega_2 - x_1 \omega_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$	$\dot{Z}_3 = (R + R_{01}) + j(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}) = (R_{01} + r_1) + j x_1;$ $\dot{Z}_4 = (R + R_{01}) + j(\omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C}) = (R_{01} + r_2) + j x_2;$
2	 $R = (r_1 Y_1^2)^{-1};$ $C = \frac{b_1 \omega_1 - b_2 \omega_2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}; L = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \omega_2 (b_1 \omega_2 - b_2 \omega_1)}$	$\dot{Y}_1 = \frac{1}{R} - j(\frac{1}{\omega_1 L} - \omega_1 C) = g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \frac{1}{R} - j(\frac{1}{\omega_2 L} - \omega_2 C) = g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1^2};$ $\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2^2};$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$
3	 $R = r_1;$ $C = \frac{x_2 \omega_1 - x_1 \omega_2}{x_1 x_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}; L = \frac{x_1 x_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\omega_1 \omega_2 (x_2 \omega_2 - x_1 \omega_1)}$	$\dot{Z}_1 = R + j(\frac{\omega_1 L}{1 - \omega_1^2 L C}) = r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = R + j(\frac{\omega_2 L}{1 - \omega_2^2 L C}) = r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$
4	 $R = \frac{r_1 r_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{(r_2 \omega_2^2 - r_1 \omega_1^2)}$ $C = \frac{1}{\omega_1 R} \sqrt{\frac{R - r_1}{r_1}}; L = \frac{x_1 + r_1 R \omega_1 C}{\omega_1};$	$\dot{Z}_1 = \frac{R}{1 + \omega_1^2 C^2 R^2} + j(\omega_1 L - \frac{R^2 \omega_1 C}{1 + \omega_1^2 C^2 R^2}) = r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = \frac{R}{1 + \omega_2^2 C^2 R^2} + j(\omega_2 L - \frac{R^2 \omega_2 C}{1 + \omega_2^2 C^2 R^2}) = r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$

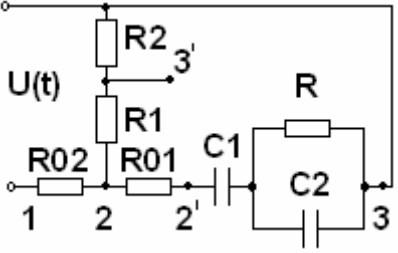
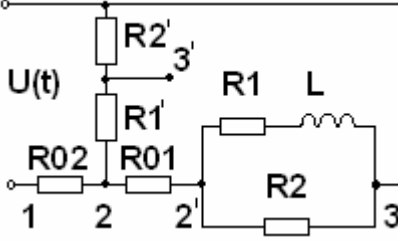
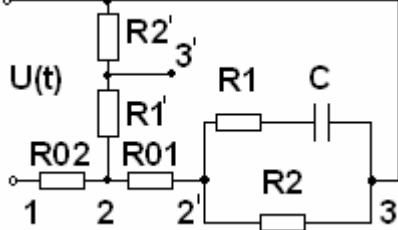
Продовження таблиці

1	2	3
<p>5</p>	 <p> $R = \frac{r_1 r_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{(r_1 \omega_2^2 - r_2 \omega_1^2)}$ $L = \frac{R}{\omega_1} \sqrt{\frac{r_1}{R - r_1}}; \quad C = \frac{1}{\frac{r_1 R}{L} - \omega_1 x_1}$ </p>	<p> $\dot{Z}_1 = \frac{R \omega_1^2 L^2}{R^2 + \omega_1^2 L^2} + j \left[\frac{R^2 \omega_1 L}{R^2 + \omega_1^2 L^2} - \frac{1}{\omega_1 C} \right] =$ $= r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = \frac{R \omega_2^2 L^2}{R^2 + \omega_2^2 L^2} + j \left[\frac{R^2 \omega_2 L}{R^2 + \omega_2^2 L^2} - \frac{1}{\omega_2 C} \right] =$ $= r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \quad \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$ </p>
<p>6</p>	 <p> $R = \frac{1}{r_1 Y_1^2};$ $C = \frac{b_1 b_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\omega_1 \omega_2 (b_1 \omega_1 - b_2 \omega_2)}; \quad L = \frac{b_1 \omega_2 - b_2 \omega_1}{b_1 b_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)};$ </p>	<p> $\dot{Y}_1 = \frac{1}{R} - j \left(\frac{1}{\omega_1 L} - \frac{1}{\omega_1 C} \right) = g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \frac{1}{R} - j \left(\frac{1}{\omega_2 L} - \frac{1}{\omega_2 C} \right) = g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1^2} = r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2^2} = r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \quad \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$ </p>
<p>7</p>	 <p> $R = \frac{g_2 \omega_2^2 - g_1 \omega_1^2}{g_1 g_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)};$ $L = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\frac{R - g_1 R^2}{g_1}}; \quad C = \frac{b_1 + \frac{g_1 \omega_1 L}{R}}{\omega_1};$ </p>	<p> $\dot{Y}_1 = \frac{R}{R^2 + \omega_1^2 L^2} + j \left[\frac{\omega_1 L}{R^2 + \omega_1^2 L^2} - \omega_1 C \right] =$ $= g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \frac{R}{R^2 + \omega_2^2 L^2} + j \left[\frac{\omega_2 L}{R^2 + \omega_2^2 L^2} - \omega_2 C \right] =$ $= g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1^2};$ $\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2^2};$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \quad \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$ </p>

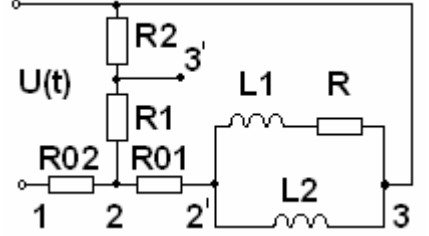
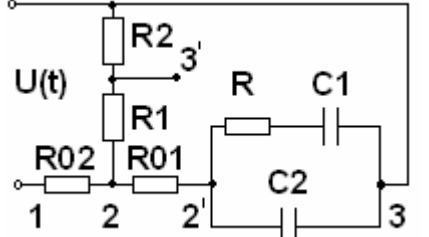
Продовження таблиці

1	2	3
8	 $R = \frac{g_1 \omega_2^2 - g_2 \omega_1^2}{g_1 g_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}; L = \frac{1}{\frac{g_1}{RC} + b_1 \omega_1}$ $C = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\frac{g_1}{R - g_1 R^2}}$	$\dot{Y}_1 = \frac{R \omega_1^2 C^2}{1 + \omega_1^2 C^2 R^2} - j \left[\frac{1}{\omega_1 L} - \frac{\omega_1 C}{1 + \omega_1^2 C^2 R^2} \right] =$ $= g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \frac{R \omega_2^2 C^2}{1 + \omega_2^2 C^2 R^2} - j \left[\frac{1}{\omega_2 L} - \frac{\omega_2 C}{1 + \omega_2^2 C^2 R^2} \right] =$ $= g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1^2};$ $\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2^2};$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$
9	 $L = \frac{x_1 x_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\omega_1 \omega_2 (x_2 \omega_2 - x_1 \omega_1)};$ $R_2 = \omega_1 L \sqrt{\frac{x_1}{\omega_1 L - x_1}}; R_1 = r_1 - \frac{x_1 \omega_1 L}{R_2}$	$\dot{Z}_1 = \left[R_1 + \frac{R_2 \omega_1^2 L^2}{R_2^2 + \omega_1^2 L^2} \right] + j \frac{R_2 \omega_1 L}{R_2^2 + \omega_1^2 L^2} =$ $= r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = \left[R_1 + \frac{R_2 \omega_2^2 L^2}{R_2^2 + \omega_2^2 L^2} \right] + j \frac{R_2 \omega_2 L}{R_2^2 + \omega_2^2 L^2} =$ $= r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$
10	 $C = \frac{x_1 \omega_2 - x_2 \omega_1}{x_1 x_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)};$ $R_2 = \sqrt{\frac{x_1}{\omega_1 C (1 - x_1 \omega_1 C)}}; R_1 = r_1 - \frac{x_1}{R_2 \omega_1 C}$	$\dot{Z}_1 = \left[R_1 + \frac{R_2}{1 + R_2^2 \omega_1^2 C^2} \right] - j \frac{R_2^2 \omega_1 C}{1 + R_2^2 \omega_1^2 C^2} = r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = \left[R_1 + \frac{R_2}{1 + R_2^2 \omega_2^2 C^2} \right] - j \frac{R_2^2 \omega_2 C}{1 + R_2^2 \omega_2^2 C^2} = r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$
11		$\dot{Z}_1 = \frac{R \omega_1^2 L_2^2}{R^2 + \omega_1^2 L_2^2} + j \left[\frac{R^2 \omega_1 L_2}{R^2 + \omega_1^2 L_2^2} + \omega_1 L_1 \right] =$ $= r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = \frac{R \omega_2^2 L_2^2}{R^2 + \omega_2^2 L_2^2} + j \left[\frac{R^2 \omega_2 L_2}{R^2 + \omega_2^2 L_2^2} + \omega_2 L_1 \right] =$ $= r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$

Продовження таблиці

1	2	3
	$R = \frac{r_1 r_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{r_1 \omega_2^2 - r_2 \omega_1^2};$ $L_2 = \frac{R}{\omega_1} \sqrt{\frac{r_1}{R - r_1}};$ $L_1 = \frac{x_1 - \frac{r_1 R}{\omega_1 L_2}}{\omega_1};$	
12	 $R = \frac{r_1 r_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{r_2 \omega_2^2 - r_1 \omega_1^2}; C_2 = \frac{1}{R \omega_1} \sqrt{\frac{R - r_1}{r_1}};$ $C_1 = \frac{1}{\omega_1 (x_1 - r_1 R \omega_1 C_2)}$	$\dot{Z}_1 = \frac{R}{1 + R^2 \omega_1^2 C_2^2} - j \left[\frac{R^2 \omega_1 C_2}{1 + R^2 \omega_1^2 C_2^2} + \frac{1}{\omega_1 C_1} \right] =$ $= r_1 + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = \frac{R}{1 + R^2 \omega_2^2 C_2^2} - j \left[\frac{R^2 \omega_2 C_2}{1 + R^2 \omega_2^2 C_2^2} + \frac{1}{\omega_2 C_1} \right] =$ $= r_2 + j x_2;$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$
13	 $L = \frac{b_1 \omega_2 - b_2 \omega_1}{b_1 b_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)};$ $R_1 = \sqrt{\frac{\omega_1 L (1 - b_1 \omega_1 L)}{b_1}}; R_2 = \frac{1}{g_1 - \frac{b_1 R_1}{L \omega_1}}$	$\dot{Y}_1 = \left[\frac{1}{R_2} + \frac{R_1}{R_1^2 + \omega_1^2 L^2} \right] - j \frac{\omega_1 L}{R_1^2 + \omega_1^2 L^2} = g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \left[\frac{1}{R_2} + \frac{R_1}{R_1^2 + \omega_2^2 L^2} \right] - j \frac{\omega_2 L}{R_1^2 + \omega_2^2 L^2} = g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1^2};$ $\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2^2};$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_0) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_0) + j x_2;$
14	 $C = \frac{b_1 b_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\omega_1 \omega_2 (b_2 \omega_2 - b_1 \omega_1)};$ $R_1 = ; R = \frac{1}{(g_1 - b_1 R_1 \omega_1 C)}$	$\dot{Y}_1 = \left[\frac{1}{R_2} + \frac{R_1 \omega_1^2 C^2}{1 + R_1^2 \omega_1^2 C^2} \right] - j \frac{\omega_1 C}{1 + R_1^2 \omega_1^2 C^2} = g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \left[\frac{1}{R_2} + \frac{R_1 \omega_2^2 C^2}{1 + R_1^2 \omega_2^2 C^2} \right] - j \frac{\omega_2 C}{1 + R_1^2 \omega_2^2 C^2} = g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1^2}; \dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2^2}; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$

Продовження таблиці

1	2	3
15	 $R = \frac{g_2 \omega_2^2 - g_1 \omega_1^2}{g_1 g_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}; L_2 = \frac{1}{\omega_1 (b_1 - \frac{g_1 \omega_1 L_1}{R})}$ $L_1 = \sqrt{\frac{R - g_1 R^2}{g_1 \omega_1^2}}$	$\dot{Y}_1 = \frac{R}{R^2 + \omega_1^2 L_1^2} - j \left[\frac{\omega_1 L_1}{R^2 + \omega_1^2 L_1^2} + \frac{1}{\omega_1 L_2} \right] = g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \frac{R}{R^2 + \omega_2^2 L_1^2} - j \left[\frac{\omega_2 L_1}{R^2 + \omega_2^2 L_1^2} + \frac{1}{\omega_2 L_2} \right] = g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1}; \dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1;$ $\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2}; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$
16	 $R = \frac{g_1 \omega_2^2 - g_2 \omega_1^2}{g_1 g_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)};$ $C_1 = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\frac{g_1}{R - g_1 R^2}}; C_2 = \frac{b_1 - \frac{g_1}{R \omega_1 C_1}}{\omega_1};$	$\dot{Y}_1 = \frac{R \omega_1^2 C_1^2}{1 + R^2 \omega_1^2 C_1^2} - j \left[\frac{\omega_1 C_1}{1 + R^2 \omega_1^2 C_1^2} + \omega_1 C_2 \right] = g_1 - j b_1;$ $\dot{Y}_2 = \frac{R \omega_2^2 C_1^2}{1 + R^2 \omega_2^2 C_1^2} - j \left[\frac{\omega_2 C_1}{1 + R^2 \omega_2^2 C_1^2} + \omega_2 C_2 \right] = g_2 - j b_2;$ $\dot{Z}_1 = r_1 + j x_1 = \frac{g_1}{Y_1^2} + j \frac{b_1}{Y_1};$ $\dot{Z}_2 = r_2 + j x_2 = \frac{g_2}{Y_2^2} + j \frac{b_2}{Y_2};$ $\dot{Z}_3 = (r_1 + R_{01}) + j x_1; \dot{Z}_4 = (r_2 + R_{01}) + j x_2;$

6. Висновки. Результати вимірювання RLC-параметрів високоомних трикомпонентних комплексних опорів методом зміщення системи координат за струмом не залежать від значення вхідного опору і коефіцієнта передачі АЦП, що особливо важливо під час вимірювань у діапазоні частот. Похибка вимірювання RLC-параметрів значною мірою визначається співвідношенням g і b і співмірністю $1/R_0$ і g , а також ωC_0 і b і розрядністю АЦП. За відсутності апріорної інформації про значення g і b необхідні пробні вимірювання з метою уточнення значень $1/R_0$. У разі значної відмінності g і b треба змінити частоту ω , при якій $g \approx b$.

1. Гриневич Ф.Б. Автоматические мосты переменного тока. – Новосибирск, 1964. 2. Кнеллер В.Ю. Автоматические измерения составляющих комплексных сопротивлений. – М.; Л.; Энергия, 1967. 3 Кнеллер В.Ю., Боровских П.П. Определение пара-

метров многоэлементных двухполюсников. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 4. Добровинский И.Р., Ломтев Е.А. Проектирование ИИС для измерения параметров электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1997. 5. Добровинский И.Р., Бондаренко Л.Н., Блинов А.В. Повышение точности измерений параметров двухполюсников // Измерительная техника. – 2003. – №7. – С.49–53. 6. Modern impedance measurement techniques. Bate Alan. Electron.World. – 2003, 10. –, № 1803. – С.52–59. 7. PC-based devices for immittance control of multidimensional objects. Pohodylo E., Stolyarchuk P., Chyrka M. IEEE Trans. Instrum. and Meas. – 2002. – 51. – №5. – С.1132–1135. 8. Агамалов Ю.Р. Теоретические основы построения и техническая реализация многофункциональных преобразователей комплексного сопротивления на базе адаптивного подхода. Автореф. дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. Ин-т проблем упр. РАН. – М., 2003. – 46 с. 9. Свистунов Б.Л. Структурно-алгоритмические

методы синтеза средств инвариантного измерения параметров электрических цепей. Автореф. дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. Пенз. гос. ун-т. – Пенза, 2004. – 47 с. 10. Грибок М. Алгоритмічні методи вимірювання параметрів скалярних величин // Вимірювальна техніка та метрологія, 2001. – № 58. 11. Грибок М. Інтелектуальні методи вимірювання параметрів векторних величин // Вісник ДУ “Львівська політехніка”, “Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика”. – 2001. – № 415. 12. Грибок М. Вимірювання параметрів двокомпонентних комплексних опорів методом зміщення системи координат по складових опорів і провідності // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. – 2002. – № 445. 13. Грибок М. Вимірювання параметрів двокомпонентних комплексних

опорів методом зміщення системи координат по складових напруги і струму // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – № 59. 14. Грибок М.І. Вимірювання параметрів паралельних RLC схем методом зміщення системи координат по струму // Вісник ДУ “Львівська політехніка”, “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2006. – № 551. 15. Грибок М. Вимірювання параметрів трикомпонентних комплексних опорів методом зміщення системи координат // Додаток до науково-технічного журналу ВАК України “Стандартизація, сертифікація, якість”. – арків, 2006. 16. Grybok M. Measurement of complex resistance parameters by the method of coordinate system displacement on current // Pomiar. Automatyka. Kontrola. – Warszawa. – № 12/2006. – P.53–57.