

наук:05.11.05 /Ин.-т проблем управления.- М., 1979.
 3. Берлинер М.А. Измерение влажности. М., 1973.
 4. Боровских Л.П. Обобщенный подход к измерению параметров многоэлементных двухполюсников методом квазиуравновешивания // Измерительная техника – 1999. – №6. – С.47-50. 5. Гаврилюк М.А., Соголовский Е.П. Электронные измерители CLR. 1979. 6. Кнеллер В. Ю., Березовский Л.П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. - М.: 1986. 7. Засоби вимірювальної техніки занесені до Державного реєстру України. Показчик. 2001. 8. Гаврилюк М.О., Походило Є.В., Хома В.В. Портативний вимірювач CLR АК-121 // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 1994. – №283. – С.57-58. 9. Гаврилюк М.О., Походило Є.В., Хома В.В. Перетворювач CLR-параметрів мультиметра ЦК 4801 // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 1995. – №292. – С. 70-72. 10. С. Походило.

Оцінювання похибок вимірювання параметрів ємнісних перетворювачів. Вимірювальна техніка та метрологія, 2000, №56. 11. Измерения в электронике: // В.А.Кузнецов, В.А.Долгов, В.М. Коневских М., 1987. 12. С.Походило. Вимірювання параметрів пасивних величин з використанням принципу двоканальності. Вимірювальна техніка та метрологія, 2000, №57. 13. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. – Применение прецизионных аналоговых ИС. М: 1981. 14. Активні перетворювачі CLR-параметрів . Гаврилюк М.О., Походило Є.В., Хома В.В.-Збірник матер.3-ї н-т конф. “Вимір. та обчисл. Техніка в техпроцесах і конверсії виробництва”, Хмельницький,1995. 15. Достал И. Операционные усилители: М., 1982. 16. Кузнецов Е.Н. Исследование и разработка активных преобразователей параметров пассивных двухполюсников. Автореф. дис.уч. степ. канд. техн. наук. Пенза, 1982.

УДК 681.2.08

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВОКОМПОНЕНТНИХ КОМПЛЕКСНИХ ОПОРІВ МЕТОДОМ ЗМІЩЕННЯ СИСТЕМИ КООРДИНАТ ПО СКЛАДОВИХ НАПРУГИ І СТРУМУ

© Микола Грибок, 2002

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Інформаційно-вимірювальна техніка”,
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Досліджено можливість вимірювання RLC- параметрів двокомпонентних комплексних опорів у діапазоні частот методом зміщення системи координат по складових напруги та струму.

Исследована возможность измерения RLC- параметров двухкомпонентных комплексных сопротивлений в диапазоне частот методом смещения системы координат по составляющим напряжения и тока.

The two elements complex resistance RLC-parametes in a range of fequencics the coordinatessysfem displacement method on current and voltage componente.

1. Вступ

Методи та засоби вимірювання комплексних складових опорів є одним з найважливіших розділів електровимірювальної техніки. Найбільш досконалими і перевіреними в практиці вимірювань RLC-параметрів є методи зрівноваження (компенсаційні або мостові) [1, 2, 3, 4], які забезпечують високі метрологічні характеристики лише на фіксованих частотах. Такий самий недолік притаманний і методам, які використовують фазочутливе детектування [5, 6]. Широке впровадження засобів обчислювальної техніки у вимірювальні кола і використання алгоритмічних методів вимірювань [7, 8, 9, 10] відкрили нові можливості при

вимірюванні RLC-параметрів у діапазоні частот. У [8, 9] для вимірювання параметрів векторних величин запропоновано застосовувати метод зміщення системи координат. Оскільки електричний опір \dot{Z} або провідність \dot{g} є величинами, які визначаються відношенням напруги \dot{U} на затискачах двополюсника і струму \dot{I} , що протікає через двополюсник.

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \quad \dot{g} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}}$$

то при здійсненні вимірювань на змінному синусоїдному струмі всі чотири величини \dot{Z} , \dot{g} , \dot{U} , \dot{I} , векторні. Тому зміщення координат можна виконувати по

складових опор \dot{Z} , провідності \dot{g} , напруги \dot{U} і струму \dot{I} . Синтезу методів вимірювання RLC-параметрів на основі зміщення координат за напругою та струмом і стосується ця робота.

2. Схеми вимірювання та основні математичні співвідношення

Схеми вимірювання RLC-параметрів послідовних та паралельних схем заміщення синтезовані на основі методів вимірювання параметрів векторних величин, що описані в [8, 9]. Схеми містять джерело синусоїдної напруги ДСН, комутатор К, блок управління БУ, аналого-цифровий перетворювач АЦП діючого значення напруги, перемикач SW та обчислювальний пристрій ОП. При вимірюванні параметрів послідовних RLC-схем відбувається алгебраїчне додавання напруги U_{23} на досліджуваному опорі \dot{Z} із зразковими синфаз-

ною $U_{12} = \dot{I} * R_0$ та квадратурними $\dot{U}_{12} = -j \frac{i}{\omega C_0} = jX$,

$U_{12} = j\omega L_0 = jY$ напругами. Координатні системи YO_1X, YO_2X, YO_3X та основні математичні співвідношення для визначення значень синфазної $X = U_{23} \cos\phi$ та квадратурної $Y = U_{23} \sin\phi$ складових напруги наведено на рис. 3. Для визначення RLC-параметрів паралельних RLC-двокомпонентних комплексних опорів використовується схема рис. 2 і координатні системи YO_1X, YO_2X, YO_3X та основні математичні співвідношення для знаходження синфазного $X = i_1 \cos\phi$ та квадратурного $Y = i_1 \sin\phi$ значень струмів (рис. 4). Як зразковий синфазний струм використовується струм $X_0 = i_{x0} = U_{22}/R_{01}$, через резистор R_{01} , а як квадратурні струми – струми $Y_0 = -jU_{22}\omega C_0$ і $Y_0 = jU_{22} / \omega L_0$.

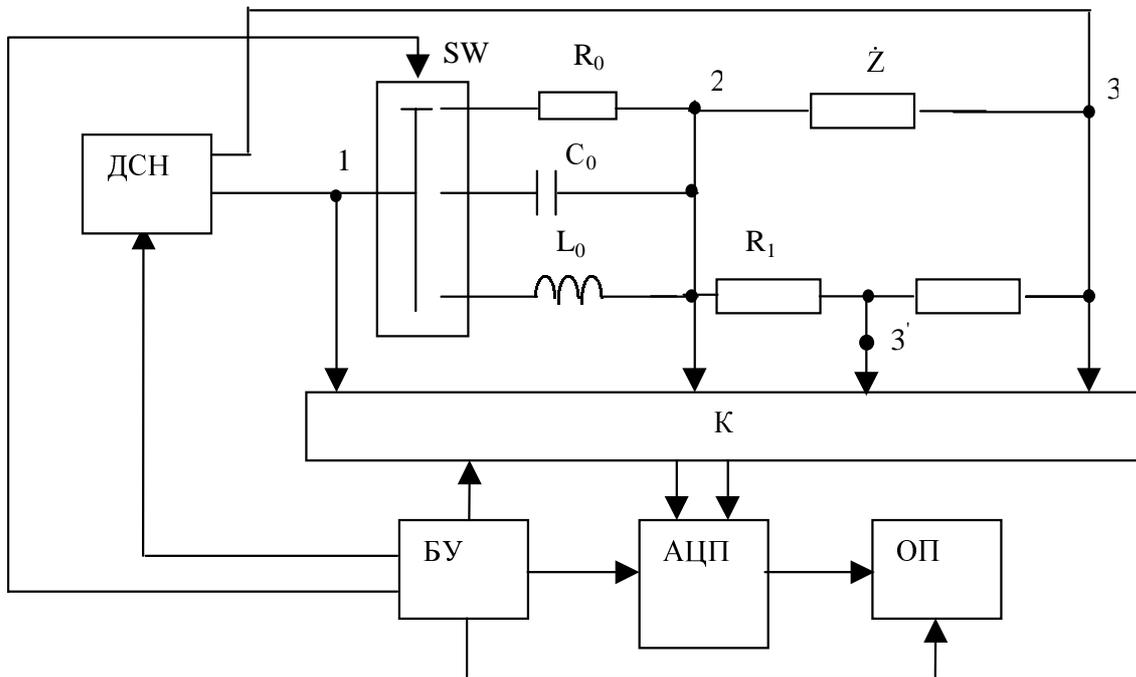


Рис. 1. Узагальнена структурна схема вимірювача RLC-параметрів двокомпонентних комплексних опорів методом зміщення координат за напругою

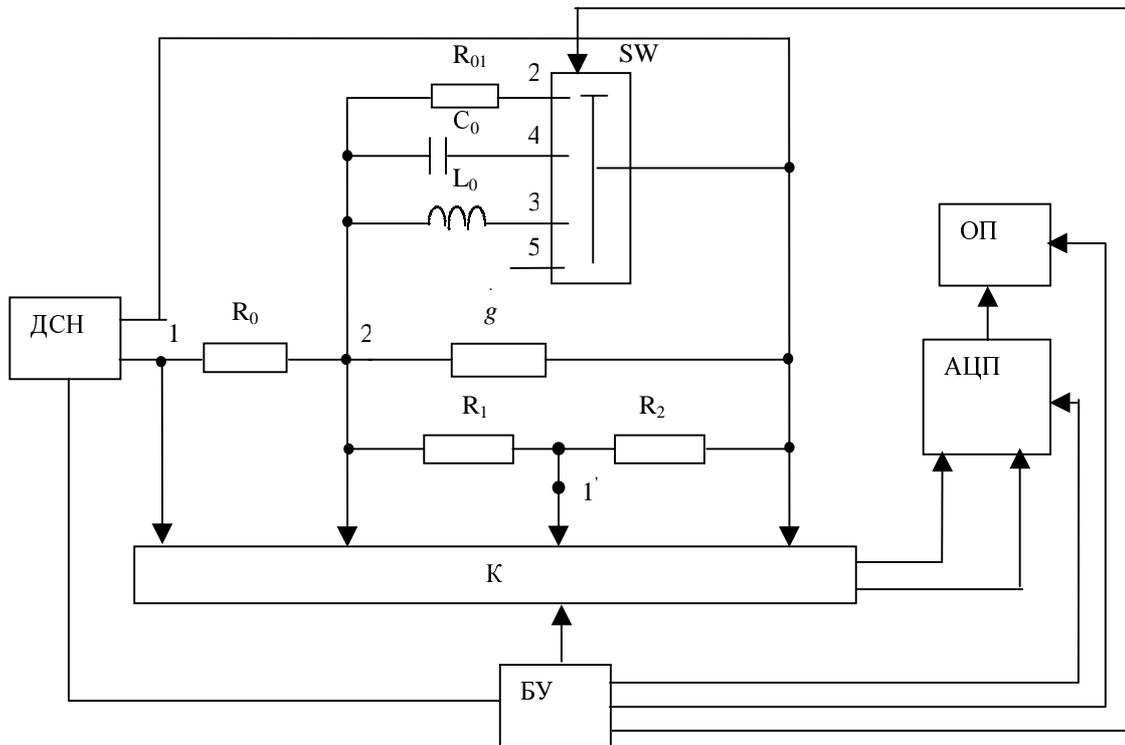


Рис. 2. Узагальнена структурна схема вимірювача RLC-параметрів двокомпонентних комплексних провідностей методом зміщення координат за струмом

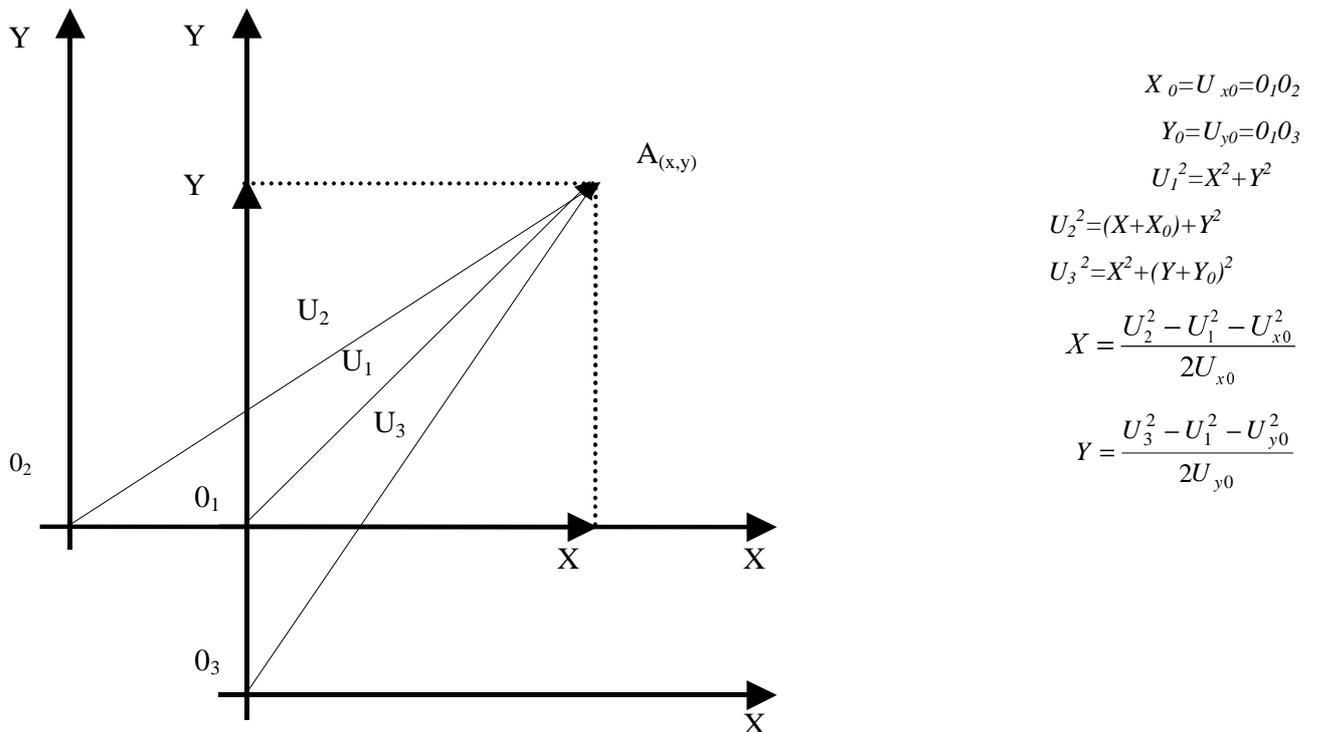
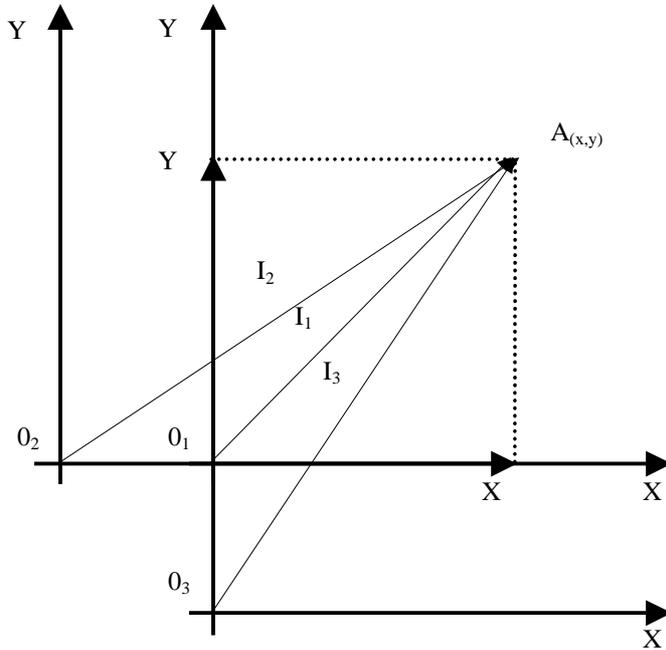


Рис. 3. Координатні системи та основні математичні співвідношення при вимірюванні синфазної та квадратурної складових напруги



$$\begin{aligned}
 Y &= i_1 \sin \varphi \\
 X_0 &= i_{x0} = O_1 O_2 \\
 X &= i_1 \cos \varphi \quad Y_0 = i_{y0} = O_1 O_3 \\
 i_1^2 &= X^2 + Y^2 \\
 i_2^2 &= (X + X_0)^2 + Y^2 \\
 i_3^2 &= X^2 + (Y + Y_0)^2 \\
 X &= \frac{i_2^2 - i_1^2 - i_{x0}^2}{2i_{x0}} \\
 Y &= \frac{i_3^2 - i_1^2 - i_{y0}^2}{2i_{y0}}
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Координатні системи та основні математичні співвідношення при вимірюванні синфазної та квадратурної складових струмів

Схеми заміщення вимірювального кола та номінальні рівняння вимірювання

Алгоритмічні методи із зміщенням однієї координати без множення вектора на скаляр

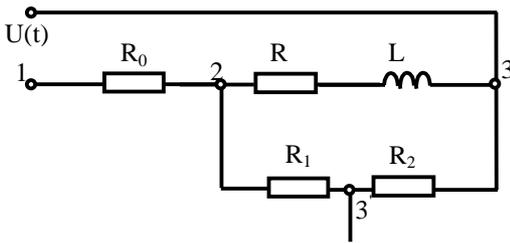


Рис. 5.

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_0 &= \dot{U}_{12} = iR_0; \\
 \dot{U} &= \dot{U}_{23} = i[Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi] \\
 \dot{U}_{13} &= [iR_0 + iZ \cos \varphi] + j i Z \sin \varphi \\
 \dot{U}_{13}^1 &= [iR_0 + K i Z \cos \varphi] + j K i Z \sin \varphi \\
 \dot{U}_{23}^1 &= K i Z \cos \varphi + j K i Z \sin \varphi \\
 Z &= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2};
 \end{aligned}$$

$$Z \cos \varphi = R = \frac{U_{23} \cos \varphi}{i} = R_0 \frac{U_{23} \cos \varphi}{U_{12}} = R_0 \left[\frac{U_{13}^2 + U_{23}^2 - U_{12}^2}{2U_{12}^2} \right]$$

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}$$

Алгоритмічні методи із зміщенням однієї координати і множенням вектора на скаляр

$$K = \frac{R_1}{R_2 + R_1}; \quad R = \frac{U_{23} \cos \varphi}{i} = \frac{R_0}{K} \frac{U_{23}^1}{U_{12}} = \frac{R_0}{2K} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]; \quad L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}$$

Алгоритмічні методи із зміщенням двох координат

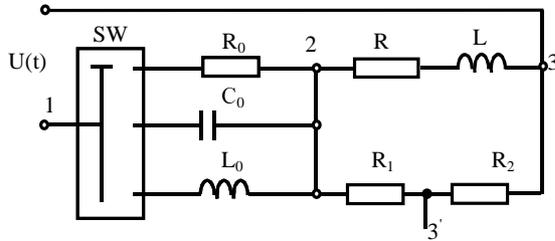


Рис. 6.

Для знаходження $R=Z\cos\varphi$ вмикаємо зразковий

резистор
$$R = Z \cos \varphi = \frac{R_0}{2} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right];$$

Для знаходження $\omega L=Z\sin\varphi$ замість R_0 вмикаємо C_0 або L_0 . При вмиканні C_0 одержуємо такі співвідношення.

$$\begin{aligned} Z\sin\varphi=\omega L &= \frac{U_{23} \sin \varphi}{i} = \frac{U_{23} \sin \varphi}{U_{12} / \frac{1}{\omega C_0}} = \frac{U_{23} \sin \varphi}{U_{12} \omega C_0} = \\ &= \frac{1}{2\omega C_0} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]; \\ L &= \frac{1}{2\omega^2 C_0} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]. \end{aligned}$$

Якщо $R_0 \ll Z$; $\frac{1}{\omega C_0} \ll Z$ вводимо подільник на-

пруги R_1, R_2 , для множення вектора на скаляр. Тоді

$$\begin{aligned} R &= \frac{R_0}{2K} \left[\frac{U_{13'}^2 - U_{23'}^2 - U_{12'}^2}{2U_{12}^2} \right]; \\ L &= \frac{1}{2\omega^2 K C_0} \left[\frac{U_{13'}^2 - U_{23'}^2 - U_{12'}^2}{U_{12}^2} \right]. \end{aligned}$$

При увімкненні у вимірювальне коло зразкової індуктивності L_0 одержимо

$$\begin{aligned} Z\sin\varphi=\omega L &= \frac{U_{23} \sin \varphi}{i} = \frac{\omega L_0}{2} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]; \\ L &= \frac{L_0}{2} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]. \end{aligned}$$

Якщо $\omega L_0 \ll Z$, вводимо множення вектора на скаляр. Для цього використовуємо подільник напруги R_1, R_2 . Тоді

$$\begin{aligned} R &= \frac{R_0}{2K} \left[\frac{U_{13'}^2 - U_{23'}^2 - U_{12'}^2}{U_{12}^2} \right]; \\ L &= \frac{L_0}{2K} \left[\frac{U_{13'}^2 - U_{23'}^2 - U_{12'}^2}{U_{12}^2} \right]. \end{aligned}$$

Алгоритмічні методи із зміщенням однієї координати

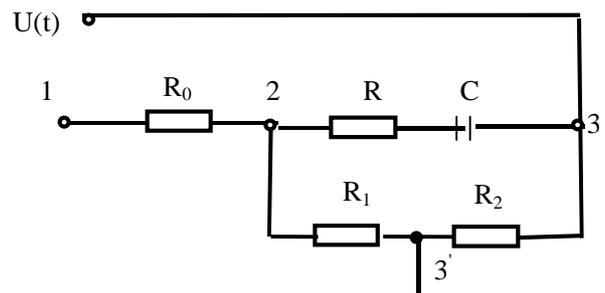


Рис. 7.

$$R_0 \approx Z \quad \dot{U}_0 = iR_0 = \dot{U}_{12};$$

$$\dot{U} = \dot{U}_{23} = i[Z\cos\varphi + jZ\sin\varphi];$$

$$\dot{U}_{13} = [iR_0 + iZ\cos\varphi] + jZ\sin\varphi$$

$$\dot{U}_{13'} = [iR_0 + iKZ\cos\varphi] + jKZ\sin\varphi$$

$$\dot{U}_{23'} = iKZ\cos\varphi + jKZ\sin\varphi$$

$$R = Z\cos\varphi = \frac{U_{23} \cos \varphi}{i} = R_0 \frac{U_{23} \cos \varphi}{U_{12}}$$

$$= \frac{R_0}{2} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]. \quad C = \left[\omega \sqrt{Z^2 - R^2} \right]^{-1}$$

Алгоритмічні методи із зміщенням однієї координати і множенням вектора на скаляр

$$K = \frac{R_1}{R_2 + R_1}; \quad R = \frac{R_0}{2K} \left[\frac{U_{13'}^2 - U_{23'}^2 - U_{12'}^2}{U_{12}^2} \right]$$

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{Z^2 - R^2}}.$$

**Алгоритмічні методи із зміщенням
двох координат**

Для знаходження $R=Z\cos\phi$ вмикаємо зразковий резистор

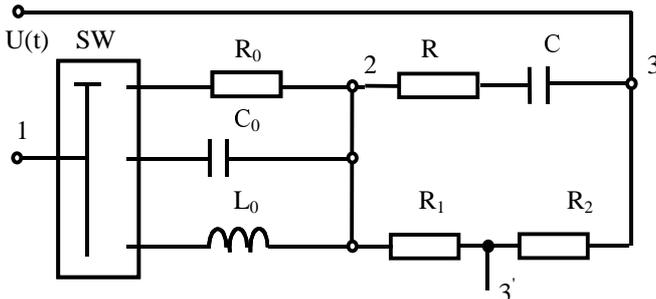


Рис. 8.

$$Z=R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}}$$

$$R=\frac{R_0}{2} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]$$

Для знаходження $1/\omega C=Z\sin\phi$ замість R_0 вмикаємо C_0 або L_0 .

При ввімкненні C_0 одержимо такі співвідношення

$$Z\sin\phi=\frac{1}{\omega C}=\frac{U_{23}}{U_{12}\omega C_0}=\frac{1}{2\omega C_0} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]$$

$$C=2C_0 \left[\frac{U_{12}^2}{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2} \right]$$

Якщо $R_0 \ll Z$, $\frac{1}{\omega C_0} \ll Z$ вводимо подільник напруги R_1, R_2 для множення вектора на скаляр.

Тоді

$$R=\frac{R_0}{2K} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right];$$

$$C=2KC_0 \left[\frac{U_{12}^2}{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2} \right]$$

При включенні у вимірювальне коло зразкової індуктивності L_0 одержимо такі співвідношення

$$\frac{1}{\omega C}=Z\sin\phi=\frac{\omega L_0}{2} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right]$$

$$C=\frac{2}{\omega^2 L_0} \left[\frac{U_{12}^2}{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2} \right]$$

Якщо $\omega L_0 \ll Z$, множимо вектор на скаляр. Для цього використовуємо подільник R_1, R_2 напруги. Тоді

$$R=\frac{R_0}{2K} \left[\frac{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2}{U_{12}^2} \right], \quad C=\frac{2K}{\omega^2 L_0} \left[\frac{U_{12}^2}{U_{13}^2 - U_{23}^2 - U_{12}^2} \right]$$

Двочастотний метод

Якщо $R_0 \approx \omega L - \frac{1}{\omega C}$, беремо схему без множення вектора на скаляр.

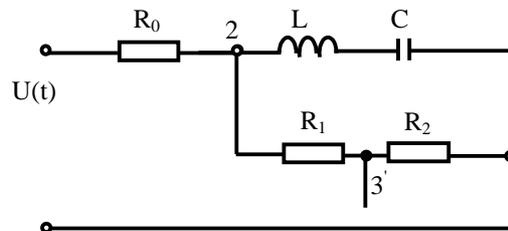


Рис. 9.

$$Z_1=\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}=R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}}$$

$$Z_2=\omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C}=R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}}$$

$$C=\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_1 \omega_2 (\omega_1 Z_2 - \omega_2 Z_1)}$$

$$L=\frac{Z_2 + \frac{1}{\omega_2 C}}{\omega_2}$$

Якщо $R_0 \ll (\omega L - \frac{1}{\omega C})$ вибираємо схему з множенням вектора на скаляр

$$C=\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{K\omega_1 \omega_2 (\omega_1 Z_2 - \omega_2 Z_1)}; \quad L=\frac{Z_2 + \frac{1}{\omega_2 C}}{\omega_2};$$

$$K=\frac{R_1}{R_2 + R_1}$$

Алгоритмічний адитивний двочастотний метод

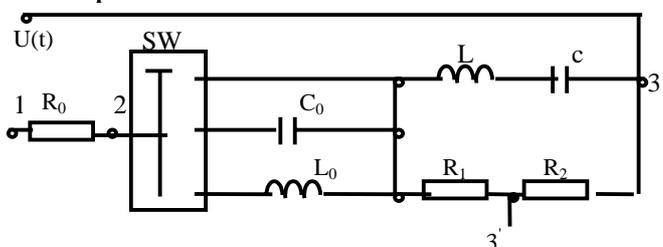


Рис. 10.

Через перемикач SW вмикаємо в коло LC резистор R_0

$$Z_1^2 = (\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C})^2 = [R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}}]^2 = \omega_1^2 L^2 - \frac{2L}{C} + \frac{1}{\omega_1^2 C^2}$$

$$Z_2^2 = (\omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C})^2 = [R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}}]^2 = \omega_2^2 L^2 - \frac{2L}{C} + \frac{1}{\omega_2^2 C^2}$$

$$A^2 = Z_2^2 - Z_1^2 = (\omega_2^2 - \omega_1^2) L^2 + (\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}) \frac{1}{C^2}$$

Через перемикач SW вмикаємо в коло LC конденсатор C_0

$$Z_3^2 = [R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}}]^2 = \omega_1^2 L^2 - 2L(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0}) + \frac{1}{\omega_1^2} (\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0})^2$$

$$B^2 = Z_4^2 - Z_3^2 = (\omega_2^2 - \omega_1^2) L^2 + (\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}) (\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0})^2$$

$$C = \frac{2(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}) \frac{1}{C_0}}{B^2 - A^2 - (\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}) \frac{1}{C_0^2}};$$

$$L = \sqrt{\frac{A^2 - (\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}) \frac{1}{C_0^2}}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)}}$$

Через перемикач SW в коло LC вмикаємо індуктивність L_0 . Тоді

$$Z_5^2 = \left(R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}} \right)^2 = \omega_1^2 (L + L_0)^2 - \frac{2(L + L_0)}{C} + \frac{1}{\omega_1^2 C^2}$$

$$Z_6^2 = \left(R_0 \frac{U_{23}}{U_{12}} \right)^2 = \omega_2^2 (L + L_0)^2 - \frac{2(L + L_0)}{C} + \frac{1}{\omega_2^2 C^2}$$

$$D^2 = Z_6^2 - Z_5^2 = (\omega_2^2 - \omega_1^2) (L + L_0)^2 +$$

$$+ \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{C^2}$$

$$L = \frac{D^2 - A^2 - (\omega_2^2 - \omega_1^2) L_0^2}{2(\omega_2^2 - \omega_1^2) L_0}$$

$$C = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right)}{A^2 - (\omega_2^2 - \omega_1^2) L^2}}$$

Алгоритмічні методи із зміщенням однієї координати по струму

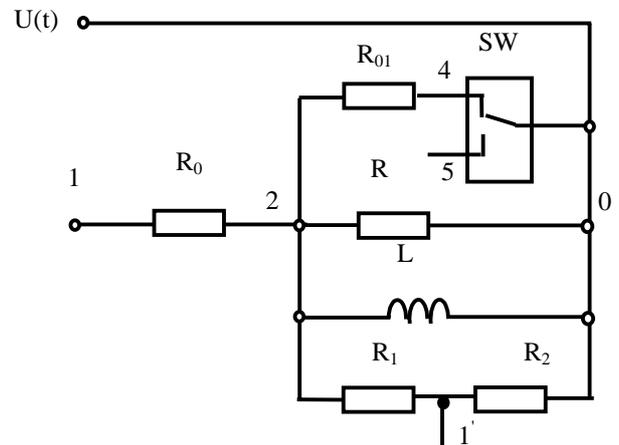


Рис. 11.

$$g_1^2 = \left(\frac{i_1}{U_{25}} \right)^2 = \left(\frac{U_{12}/R_0}{U_{25}} \right)^2 = \left(\frac{1}{R_0} \left(\frac{U_{12}}{U_{25}} \right) \right)^2 = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}$$

$$g_2^2 = \left(\frac{i_2}{U_{24}} \right)^2 = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{24}} \right]^2 = \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)^2 + \frac{1}{\omega^2 L^2}$$

$$R = \frac{2/R_0}{g_2^2 - g_1^2 - \frac{1}{R_0^2}}; L = \frac{1}{\omega \sqrt{g_1^2 - \frac{1}{R^2}}}$$

Якщо $R_0 \ll Z$, вводимо подільник напруги з

коефіцієнтом поділу $K = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Алгоритмічні методи із зміщенням двох координат по струму

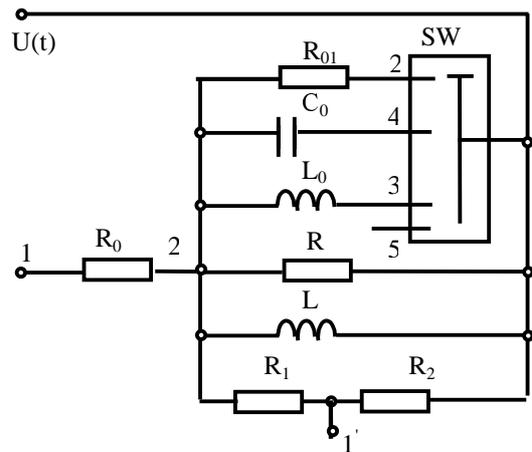


Рис. 12.

$$g_1^2 = \left(\frac{i_1}{U_{25}} \right) = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{25}} \right]^2 = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}$$

$$g_2^2 = \left(\frac{i_2}{U_{22}} \right) = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{22}} \right]^2 = \left(\frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R} \right)^2 + \frac{1}{\omega^2 L^2}$$

$$g_2^2 - g_1^2 = \frac{2}{R \cdot R_{01}} + \frac{1}{R_{01}^2};$$

$$R = \frac{2/R_{01}}{g_2^2 - g_1^2 - \frac{1}{R_{01}^2}}.$$

Для знаходження значення індуктивності L потрібно знайти зразкові прирости квадратурних струмів. Для цього за допомогою перемикача SW паралельно до Z вмикаються ємнісний або індуктивний опори.

При увімкненні конденсатора C₀ маємо

$$g_3^2 = \frac{i_3^2}{U_{24}^2} = \left(\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{24}} \right)^2 = \frac{1}{R^2} + \left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)^2;$$

$$L = \frac{-2C_0}{g_3^2 - g_1^2 - \omega^2 C_0^2}$$

Коли як зразкову величину ввімкнемо індуктивність L₀, то одержимо

$$g_4^2 = \left(\frac{i_4}{U_{25}} \right)^2 = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{25}} \right]^2 = \frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} + \frac{1}{\omega L_0} \right)^2;$$

$$L = \frac{2/\omega^2 L_0}{g_2^2 - g_1^2 - \frac{1}{\omega^2 L^2}}.$$

Алгоритмічні методи із зміщенням однієї координати по струму

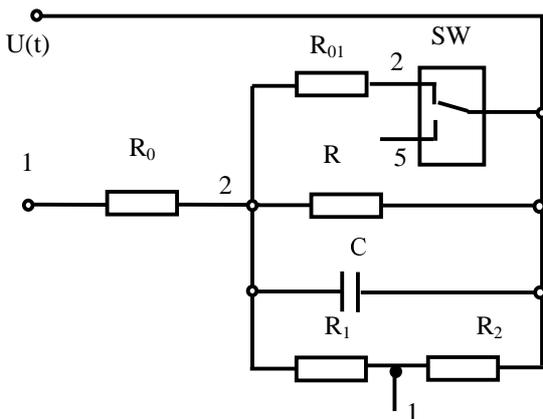


Рис. 13.

$$g_1^2 = \left(\frac{i}{U_{25}} \right) = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{25}} \right]^2 = \frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2$$

$$g_2^2 = \left(\frac{i}{U_{22}} \right) = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{22}} \right]^2 = \left(\frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R} \right)^2 + \omega^2 C^2$$

$$R = \frac{2/R_{01}}{g_2^2 - g_1^2 - \frac{1}{R_{01}^2}}; \quad C = \frac{\sqrt{g_1^2 - \frac{1}{R^2}}}{\omega} \cdot \alpha.$$

Якщо R₀ << Z, то використовуємо подільник напруги R₁, R₂. Тоді

$$g_1^2 = \frac{K^2}{R_0^2} \cdot \frac{U_{12}^2}{U_{25}^2}; \quad g_2^2 = \frac{K^2}{R_0^2} \cdot \frac{U_{12}^2}{U_{22}^2}.$$

Алгоритмічні методи із зміщенням двох координат по струму

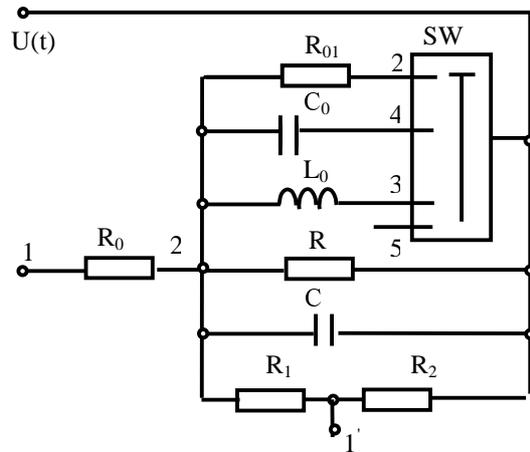


Рис. 14.

$$g_1^2 = \left(\frac{i}{U_{25}} \right) = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{25}} \right]^2 = \frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2$$

$$g_2^2 = \left(\frac{i_2}{U_{22}} \right) = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{22}} \right]^2 = \left(\frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R} \right)^2 + \omega^2 C^2$$

$$R = \frac{2/R_{01}}{g_2^2 - g_1^2 - \frac{1}{R_{01}^2}}.$$

Для знаходження значення ємності C потрібно знайти зразкові прирости квадратурних струмів. Для цього за допомогою перемикача SW паралельно до Z вмикаються зразковий ємнісний або індуктивний опори.

При увiмкненнi ємнiсного опору $\frac{1}{\omega C_0}$ маємо

$$g_3^2 = \left(\frac{i_3}{U_{24}} \right)^2 = \left[\frac{I}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{24}} \right]^2 = \frac{I^2}{R^2} + |\omega C + \omega C_0|^2;$$

$$C = \frac{g_3^2 - g_1^2 - \omega^2 C_0^2}{2\omega^2 C_0}.$$

Коли як зразковий опiр вмикається ωL_0 для одержання приросту квадратурного струму, то отримуємо

$$g_4^2 = \left(\frac{i_4^2}{U_{23}^2} \right) = \left(\frac{I}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{23}} \right)^2 = \frac{I^2}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L_0} \right)^2;$$

$$C = \frac{g_4^2 - g_1^2 - \frac{I^2}{\omega^2 L_0^2}}{-2/L_0}.$$

Якщо $R_0 \ll Z$, то використовуємо подiльний напруги R_1, R_2 з коефiциєнтом подiлу $K=R_1/(R_1+R_2)$.

Двочастотний метод

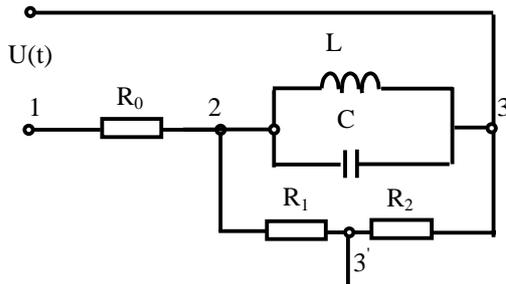


Рис. 15.

Якщо $\frac{I}{R_0} \approx \omega C - \frac{1}{\omega L}$, беремо схему без множення вектора на скаляр.

$$g_1 = \frac{i_1}{U_{23}} = \frac{U_{12}}{R_0 U_{23}} = \omega_1 C - \frac{1}{\omega_1 L}$$

$$g_2 = \frac{i_2}{U_{23}} = \frac{U_{12}}{R_0 U_{23}} = \omega_2 C - \frac{1}{\omega_2 L}$$

$$L = \frac{(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_1 g_2 - \omega_2 g_1)};$$

$$C = \frac{g_2 + \frac{1}{\omega_2 L}}{\omega_2}.$$

Алгоритмiчний адитивний двочастотний метод зi змiщенням координат по струму

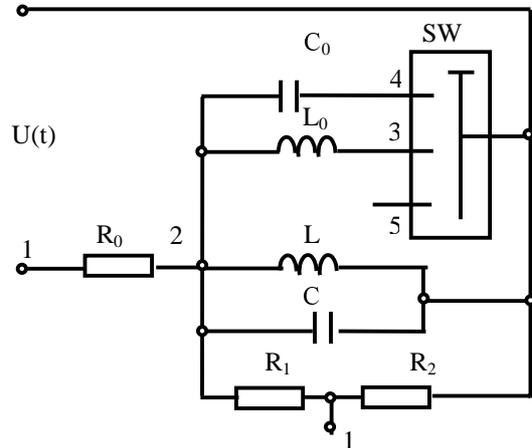


Рис. 16.

$$g_1^2 = \left(\frac{i_1}{U_{25}} \right)^2 = \left[\frac{I}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{25}} \right]^2 = (\omega_1 C - \frac{1}{\omega_1 L})^2 =$$

$$= \omega_1^2 C^2 - \frac{2C}{L} + \frac{1}{\omega_1^2 L^2},$$

$$g_2^2 = \left(\frac{i_2}{U_{25}} \right)^2 = \left[\frac{1}{R_0} \frac{U_{12}}{U_{25}} \right]^2 = (\omega_2 C - \frac{1}{\omega_2 L})^2 =$$

$$= \omega_2^2 C^2 - \frac{2C}{L} + \frac{1}{\omega_2^2 L^2},$$

$$A^2 = g_2^2 - g_1^2 = (\omega_2^2 - \omega_1^2) C^2 + \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{L^2}$$

$$g_3^2 = \left(\frac{i_3}{U_{24}} \right)^2 = \left[\frac{U_{12}}{R_0 U_{24}} \right]^2 =$$

$$= \omega_1^2 (C + C_0)^2 - \frac{2(C + C_0)}{L} + \frac{1}{\omega_1^2 L^2},$$

$$g_4^2 = \left(\frac{i_4}{U_{24}} \right)^2 = \left[\frac{U_{12}}{R_0 U_{24}} \right]^2 =$$

$$= \omega_2^2 (C + C_0)^2 - \frac{2(C + C_0)}{L} + \frac{1}{\omega_2^2 L^2},$$

$$B^2 = g_4^2 - g_3^2 = (\omega_2^2 - \omega_1^2) (C + C_0)^2 +$$

$$+ \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{L^2},$$

$$C = \frac{B^2 - A^2 - (\omega_2^2 - \omega_1^2)C_0^2}{2(\omega_2^2 - \omega_1^2)C_0},$$

$$L = \sqrt{\frac{\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}}{A^2 - (\omega_2^2 - \omega_1^2)C^2}}.$$

При переведенні перемикача SW в положення 3 одержуємо

$$g_5^2 = \left(\frac{i_5}{U_{23}}\right)^2 = \left[\frac{U_{12}}{R_0 U_{23}}\right]^2 = \omega_1^2 C^2 -$$

$$- 2C \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_0}\right) + \frac{1}{\omega_1^2} \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_0}\right)^2,$$

$$g_6^2 = \left(\frac{i_6}{U_{23}}\right)^2 = \left[\frac{U_{12}}{R_0 U_{23}}\right]^2 = \omega_2^2 C^2 -$$

$$- 2C \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_0}\right) + \frac{1}{\omega_2^2} \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_0}\right)^2,$$

$$D^2 = g_6^2 - g_5^2 = (\omega_2^2 - \omega_1^2)C^2 +$$

$$+ \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_0}\right)^2.$$

Звідси

$$L = \frac{\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) \frac{2}{L_0}}{D^2 - A^2 - \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) \frac{1}{L_0^2}};$$

$$C = \sqrt{\frac{A^2 - \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) \frac{1}{L_0^2}}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)}}.$$

3. Висновки

Результати вимірювання RLC-параметрів не залежать від значення коефіцієнта передачі аналогоцифрового перетворювача АЦП, що особливо важливо при виконанні вимірювань в діапазоні частот.

Ємність C_0 та індуктивність L_0 не повинні змінюватись в діапазоні частот. У разі такої зміни потрібно знати значення C_0 і L_0 на частотах, при яких вимірюються RLC-параметри.

Похибка вимірювання синфазної та квадратурної складових напруги і струму [8]

$$\delta_x = \left(\frac{X}{X_0} + \frac{X_0}{X} + 2 + \frac{Y^2}{X \cdot X_0}\right) \delta_{z2} +$$

$$+ \left(\frac{X}{X_0} + \frac{Y^2}{X \cdot X_0}\right) \delta_{z1} + \left(1 + \frac{X_0}{2X}\right) \delta_{x0}$$

$$\delta_y = \left(\frac{Y}{Y_0} + \frac{Y_0}{Y} + 2 + \frac{X^2}{Y \cdot Y_0}\right) \delta_{z3} +$$

$$+ \left(\frac{Y}{Y_0} + \frac{X^2}{Y \cdot Y_0}\right) \delta_{z1} + \left(1 + \frac{Y_0}{2Y}\right) \delta_{y0}$$

значною мірою визначається відношеннями $\frac{X}{X_0}, \frac{X_0}{X}, \frac{Y^2}{X \cdot X_0}$ і $\frac{Y}{Y_0}, \frac{Y_0}{Y}, \frac{X^2}{Y \cdot Y_0}$

Тому при заданих похибках вимірювання $\delta_{z1}, \delta_{z2}, \delta_{z3}$, модулів векторних величин і похибках δ_{x0}, δ_{y0} зразкових приростів X_0, Y_0 координат значення X_0 і Y_0 повинні бути близькими до X і Y . У разі відсутності апріорної інформації про числові значення X і Y необхідне пробне навчальне вимірювання. За отриманими значеннями X і Y потрібно уточнити значення X_0 і Y_0 . При значній відмінності X і Y слід або змінити частоту ω вимірювань, або створити певний еквівалентний комплексний опір, або комплексні напругу і струм додаванням до вимірюваної векторної величини додаткової векторної величини зміщення. Буде забезпечено $Y \ll X$ при вимірюванні X і $X \ll Y$ при вимірюванні Y . [8,9]

1. Алиев Т.М. Степанов В.П. Развертывающие компенсаторы комплексных величин. М., 1988. 2. Добров Е.Е. и др. Раздельное преобразование комплексных сопротивлений. – Львов, 1985. 3. Новик А.И. Системы автоматического уравновешивания цифровых экстремальных мостов переменного тона. – К., 1983. 4. Кнеллер Б.Ю. Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления. – М., 1967. 5. Гаврилюк М.А., Соголовский Е.П. Электронные измерители С, L, R. – Львов, 1978. 6. Гаврилюк М. О. Соголовский Е. П., Походило С.В. Вимірювачі імітансу з прямим перетворенням // Вимірювальна техніка та метрологія, 1998, №52. 7. Дослідження алгоритмічних та програмно-апаратних методів підвищення завадозахищеності та метрологічних характеристик універсальних цифрових приладів системного застосування. / Звіт про НДР, В.Ф.Ткаченко, Б.І. Стадник, М.І. Грибок та інші. №держ. реєстрація 0198400247, Львів, 1997.8. Теоретичні основи і принципи проектування високоточних інтелектуальних мультиметрів системного застосування. / Звіт про НДР, В.Ф.Ткаченко, Б.І. Стадник, М.І. Грибок та інші.

№ держ. Ресстр. 0198И002407, Львів, 1998. 9. Грибок М. Алгоритмічні методи вимірювання параметрів скалярних величин. // Вимірвальна техніка та метрологія, 2001, №58. 10. Грибок М. Інтелектуальні методи вимірювання параметрів векторних величин // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”, 2001, №415. 11. А.с. №1246023 (СССР) Цифрової измеритель параметров пассивных двухполюсников. // – Н.И.Грибок, С.А.Совенко, В.Н. Лаврив. Бюл. изобрет. 1986, №27. 12. А.с. №1337820 (СССР) Цифровой

измеритель RLC-параметров. // Н.И.Грибок, и др., Бюл. изобрет. 1987, №34. 13. А.с. №1357874 (СССР) Цифровой измеритель RLC-параметров. // Н.И.Грибок и др., Бюл. изобрет. 1987, №45. 14. А.с. №1437799 (СССР) Цифровой измеритель параметров комплексного сопротивления. – Н.И.Грибок, и др. – Бюл. изобрет. 1988, №42. 15. №1456907 (СССР) Цифровой измеритель составляющих комплексных сопротивлений. // Н.И.Грибок, С.Г.Романюк, С.А. Савенко. – Бюл. изобрет. 1989, №5.

УДК 621.317.732:536.5

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ РІЗНИХ ТИПІВ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПОРУ

© Богдан Лусий, Богдан Колпак, 2002

Державний науково-дослідний інститут “Система”, Львів, Україна

Описано способи підвищення точності вимірювання електричного опору різних типів вимірвальних термометрів опору, що необхідно для градування, повірки та метрологічної атестації цих термометрів опору.

Предложены и рассмотрены способы повышения точности измерения электрического сопротивления разных типов измерительных термометров сопротивления, что необходимо для градуирования, поверки и метрологической аттестации этих термопреобразователей.

The ways of increase of accuracy of measurements of electrical resistance of various types measuring of thermoresistance, necessary for calibration, verification and metrological assurance of means of measurements are described.

Метрологічні характеристики (МХ) вимірвальних каналів (ВК) температури автоматизованих систем керування метрологічними процесами (АСК ТП), а також вимірвальних термометрів опору з уніфікованим вихідним сигналом, які є складовими частинами ВК температури, визначають поелементно. Першим етапом цього процесу є градування чутливих елементів цих перетворювачів, а також повірка робочих термометрів опору для метрологічної атестації (МА) ВК температури АСК ТП. Другим етапом є визначення границі допустимої похибки вторинного перетворювача (електронної частини) і сумарної основної абсолютної похибки цих перетворювачів. В обох випадках першого етапу вимірюється електричний опір чутливих елементів термометрів опору. Для висвітлення питання підвищення точності вимірювання електричного опору зупинимося на повірці термометрів опору з уніфікованим вихідним сигналом.

Сьогодні в Україні, а також в Росії випускається багато різних типів перетворювачів температури

(ПМВ-Т-К, ПМВ-Т-С, ПМВ-Т-В, ТСПР-0196-виробники НПВП “Техприлад” і НВО “Термоприлад”, м. Львів; ТСМ 011, ТСМУ 011-виробник СКБ “Термоприбор”, м. Москва), в яких термочутливі елементи мають значення опору, що не відповідають вимогам ДСТУ 2858-94 [1], а є більшими від значень опору наявних еталонних термометрів у декілька разів (500 – 1000 Ом) з границями основної абсолютної похибки від $\pm 0,1$ °С до $\pm 0,5$ °С. Традиційна повірка перетворювачів опору передбачає почергове вимірювання опору досліджуваного та еталонного термометрів за допомогою омметра. Це не дає змоги з достатньою точністю визначити опір робочого термометра, тому що вимірювання розділені в часі, що призводить до змін МХ внаслідок зміни впливових величин між проміжками вимірювання. Крім цього, використовують наприклад, методи вимірювання [3], де значення опору еталонної міри кратні 10 Ом, що вносить в результат вимірювання подвійну похибку класу потенціометра від нерівності опорів. Запропонований нижче спосіб