

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  $Y_0 = jU_{22} / \omega L_0$ .

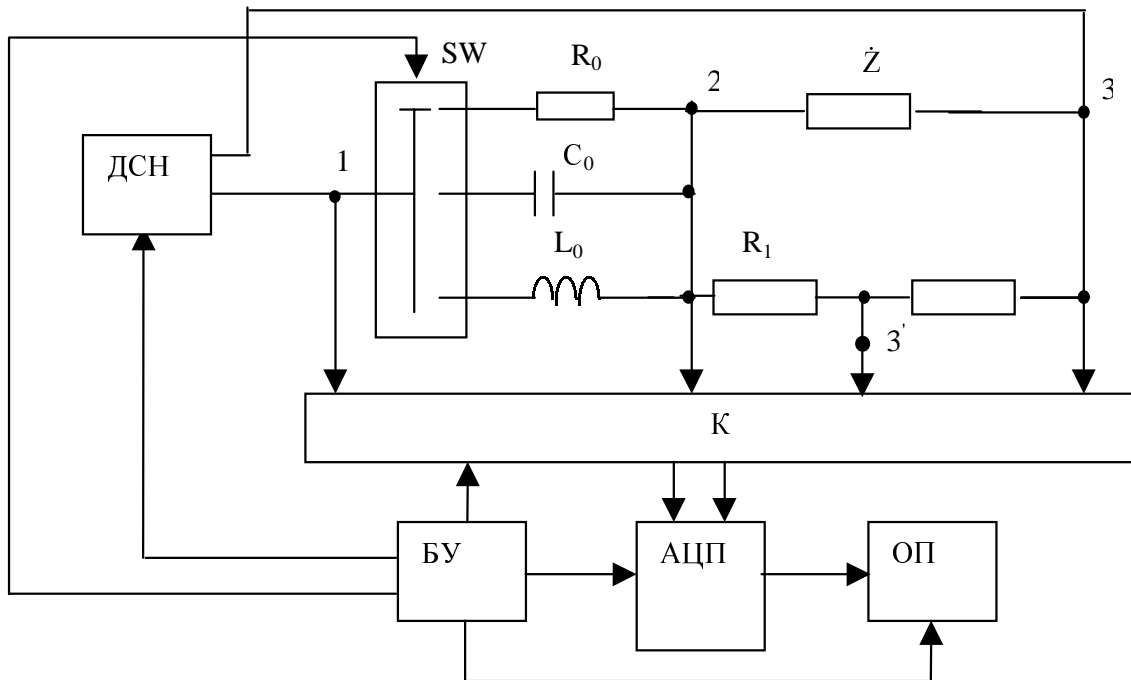


Рис. 1. Узагальнена структурна схема вимірювача RLC-параметрів двокомпонентних комплексних опорів методом зміщення координат за напругою

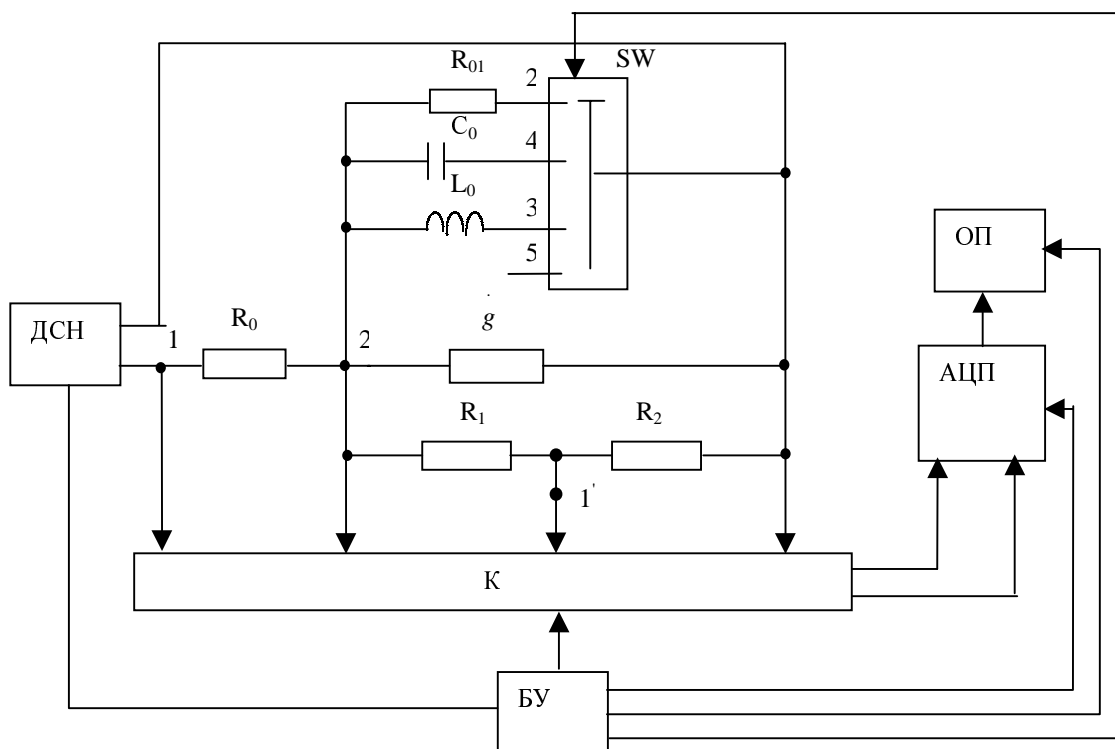


Рис. 2. Узагальнена структурна схема вимірювача RLC-параметрів двокомпонентних комплексних провідностей методом зміщення координат за струмом

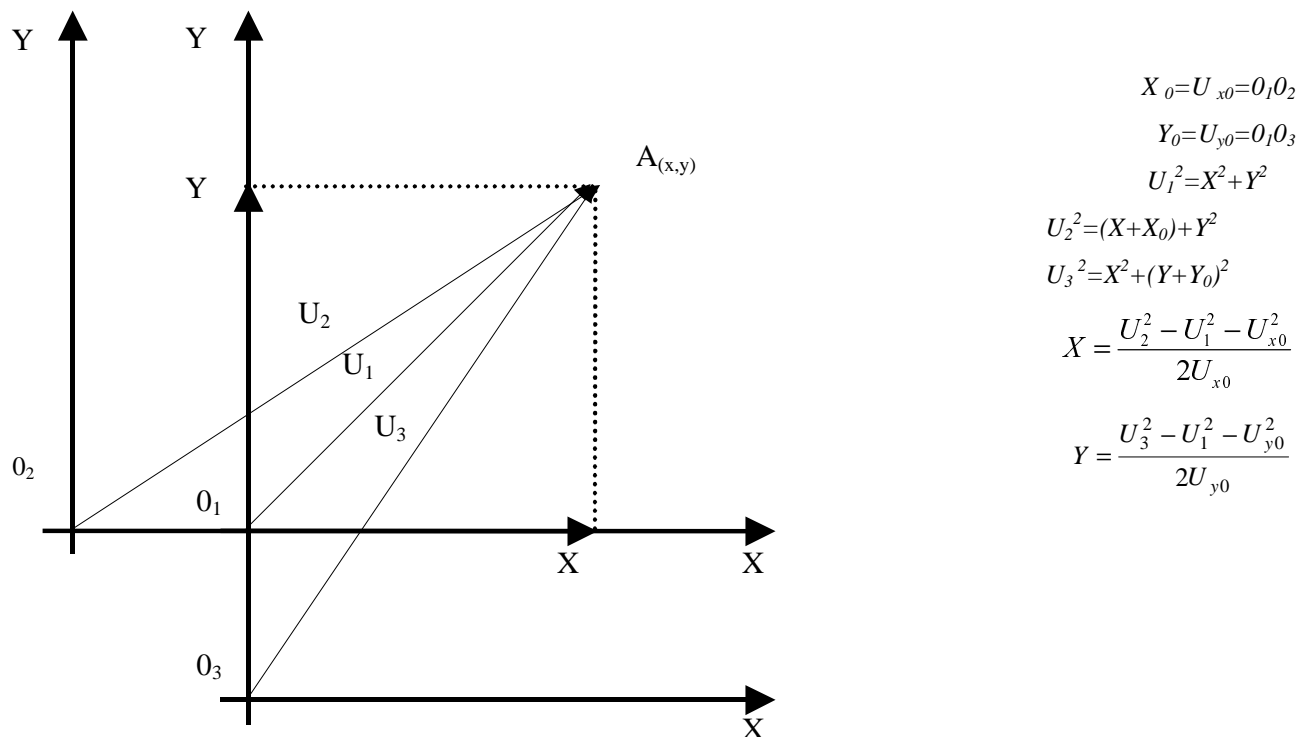
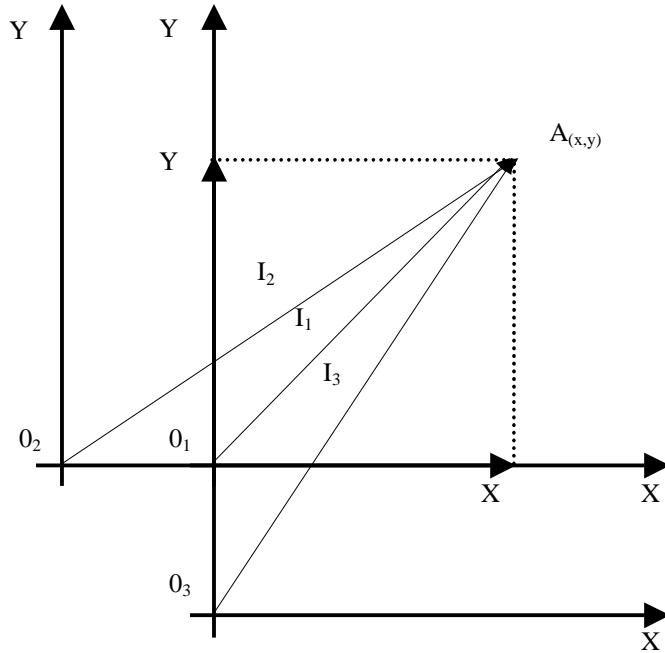


Рис. 3. Координатні системи та основні математичні співвідношення при вимірюванні синфазної та квадратурної складових напруги



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

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**

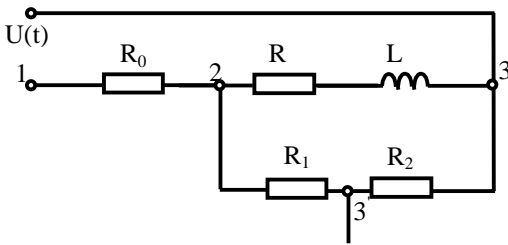


Рис. 5.

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

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

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

**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**

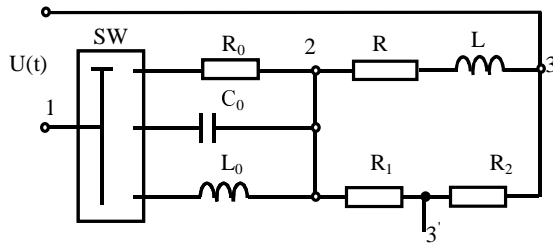


Рис. 6.

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**

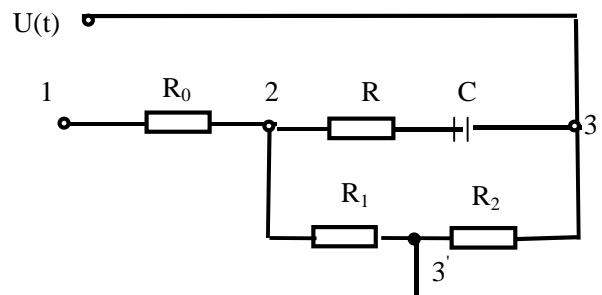


Рис. 7.

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

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

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

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

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

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

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

**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

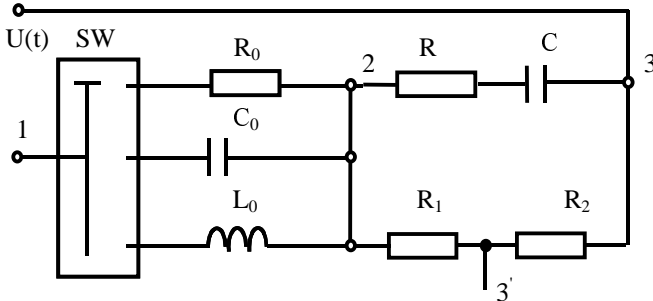


Рис. 8.

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

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

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.

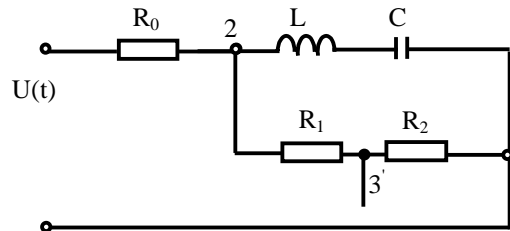


Рис. 9.

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

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

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

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

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**

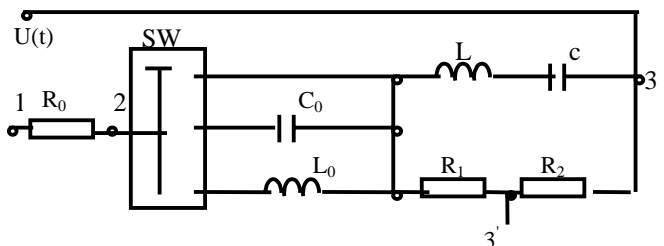


Рис. 10.

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

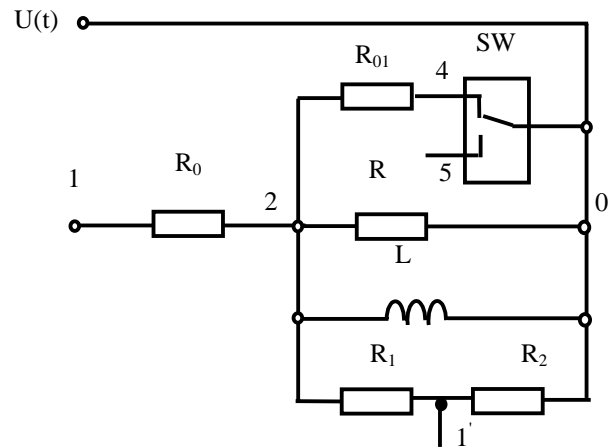


Рис. 11.

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

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

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

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

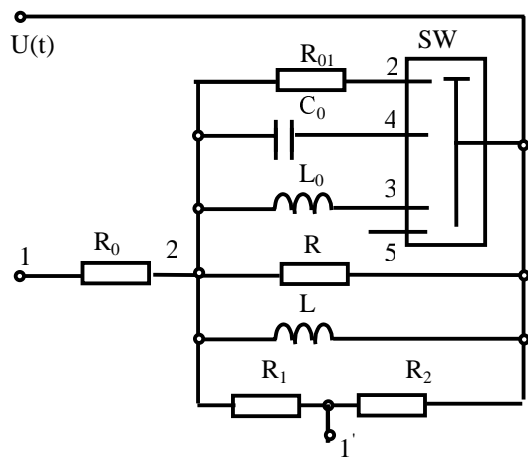


Рис. 12.

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

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

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

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

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

При увімкненні конденсатора  $C_0$  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  $L_0$ , 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**

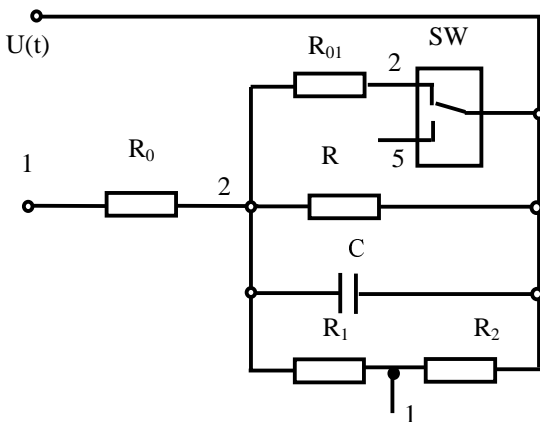


Рис. 13.

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

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

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

Якщо  $R_0 \ll Z$ , то використовуємо подільник напруги  $R_1, R_2$ . 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**

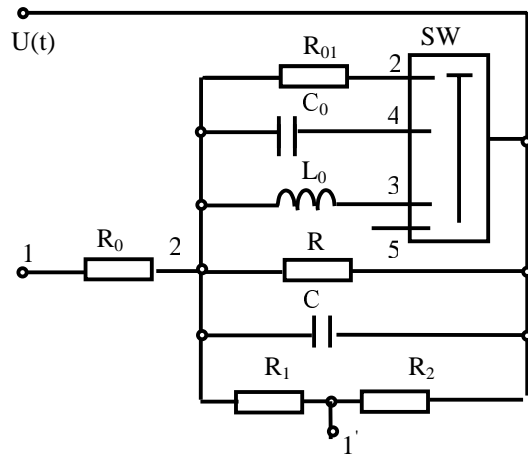


Рис. 14.

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

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

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

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



При увімкненні ємнісного опору  $\frac{1}{\omega C_0}$  маємо

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

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

Коли як зразковий опір вмикається  $\omega L_0$  для одержання приросту квадратурного струму, то отримуємо

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

$$C = \frac{g_4^2 - g_1^2 - \frac{1}{\omega^2 L_0^2}}{-2/L_0}.$$

Якщо  $R_0 \ll Z$ , то використовуємо подільник напруги  $R_1, R_2$  з коефіцієнтом поділу  $K=R_1/(R_1+R_2)$ .

**Двочастотний метод**

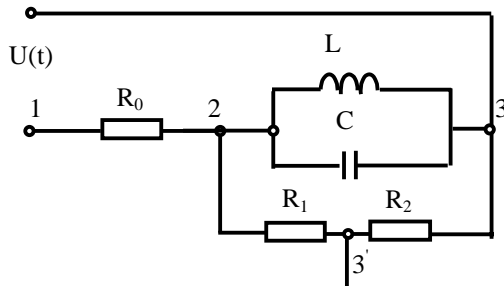


Рис. 15.

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

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

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

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

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

**Алгоритмічний адитивний двочастотний метод зі зміщенням координат по струму**

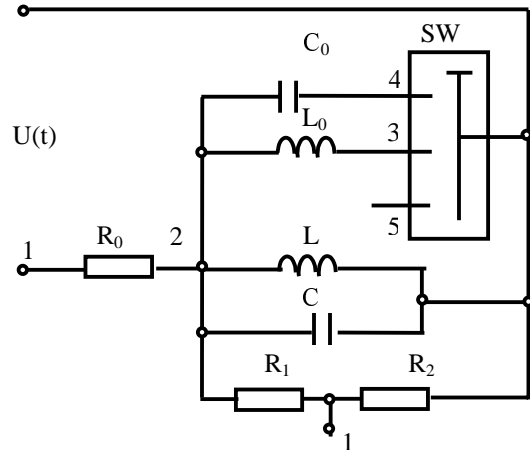


Рис. 16.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 аналого-цифрового 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  $\delta_{x0}, \delta_{y0}$  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  $\omega$  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. // Вимірювальна 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) Цифровой 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 вимірювальних 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) вимірювальних каналів (ВК) температури автоматизованих систем керування метрологічними процесами (АСК ТП), а також вимірювальних 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