

УДК 621.317.73

## ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМІТАНСУ В ЗАДАЧАХ КВАЛІМЕТРІЇ

© Євген Походило, 2002

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Метрологія, стандартизація та сертифікація”,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Розглянуто застосування методу вимірювання з прямим перетворенням імпедансу в напругу для оцінювання якості продукції. Проаналізовано векторні похибки активних перетворювачів для режимів вимірювання активної та реактивної складових імпедансу ємнісного та індуктивного характеру.*

*Рассмотрено применение метода измерения с прямым преобразованием в напряжение для оценивания качества продукции. Проанализированы векторные погрешности активных преобразователей для режимов измерения активной и реактивной составляющих импеданса емкостного и индуктивного характера.*

*The application of a method of measurement with direct transformation to a voltage for control of quality of production is considered. The vector errors of active converters for modes of measurement of an active and jet component immitance of capacitor and inductive character are analysed.*

**Вступ.** Деякі види промислової та сільськогосподарської продукції, поміщені в коло змінного струму, розглядають як багатоелементний двополюсник [1, 2]. Електричні параметри такого двополюсника відображають певні фізико-хімічні властивості речовин чи матеріалів. Тобто за електричними параметрами можна вирішувати ряд задач кваліметрії, а саме вимірювальним засобом оцінювати рівень якості. Для здійснення таких вимірювальних задач доцільно використовувати як теоретичні, так і практичні напрацювання в області вимірювання імпедансу. Одним із методів визначення окремих параметрів імпедансу,

поданого багатоелементною схемою заміщення двополюсника, є багатопараметричний метод [3]. Частковим випадком реалізації багатопараметричного методу є вимірювання на фіксованих частотах певного частотного діапазону.

**Загальна структура засобу.** Для реалізації такої вимірювальної операції можна використати різні методи вимірювання параметрів багатоелементного імпедансу [4]. Розглянемо один із них, а саме метод з прямим перетворенням імпедансу в напругу [5]. Структурна схема, що реалізує такий метод, наведена на рис.1.

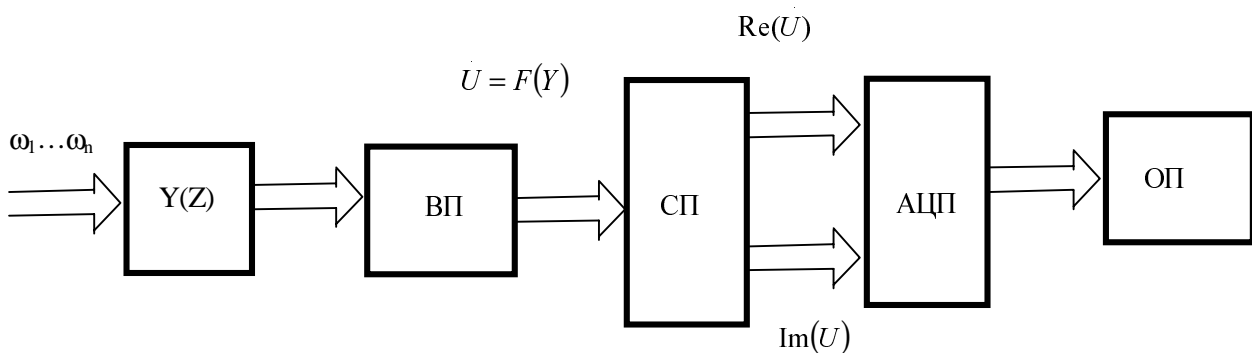


Рис. 1. Структурна схема вимірювача параметрів багатоелементного двополюсника

Під дією гармонічного тестового сигналу фіксованих частот  $\omega_1, \dots, \omega_n$  імітанс, поданий комплексною провідністю  $Y$  або опором  $Z$  багатоелементного двополюсника, перетворюється векторним перетворювачем ВП у комплексну напругу  $U$ . На кожній частоті вона має свої активну  $\operatorname{Re}(U)$  та реактивну  $\operatorname{Im}(U)$  складові, які виділяються скалярним перетворювачем СП, перетворюються аналого-цифровим перетворювачем АЦП в цифровий код і заносяться в обчислювальний пристрій ОП. За відомим алгоритмом знаходять значення параметрів  $v_1, \dots, v_n$  з системи рівнянь (1)

$$\operatorname{Re}_1(Y) = F_1(v_1, \dots, v_n), \dots, \operatorname{Re}_{n/2}(Y) = F_{n/2}(v_1, \dots, v_n), \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}_1(Y) = F_1^I(v_1, \dots, v_n), \dots, \operatorname{Im}_{n/2}(Y) = F_{n/2}^I(v_1, \dots, v_n).$$

Багатоелементний двополюсник подають переважно у вигляді опору чи провідності ємнісного чи індуктивного характеру

$$\begin{aligned} Z_C &= -jX + R; & Z_L &= jX + R; \\ Y_C &= jB + G; & Y_L &= -jB + G. \end{aligned} \quad (2)$$

**Оцінювання похибок вимірювання.** Загалом, як відомо [6], визначення параметрів багатоелементного двополюсника має три основні складові похибки. Перша складова похибки має методичний характер і зумовлена неадекватністю прийнятої моделі (схеми заміщення) реального об'єкта дослідження. Оцінювання такої складової вимагає особливого аналізу. Рівень її впливу залежить від конкретної речовини чи матеріалу, частотного діапазону чи рівня тестового сигналу, методики оцінювання одиничних показників. При реалізації методу порівняння, який передбачає порівняння з базовим зразком аналогічної продукції, її впливом можна нехтувати. В інших випадках вимірювання параметрів багатоелементного двополюсника необхідно мати априорну інформацію про природу досліджуваного об'єкта, умови виконання вимірювальної операції, конструктивні особливості первинних перетворювачів тощо.

Другою за послідовністю здійснення вимірювальних операцій складовою сумарної похибки є похибка інструментальна, зумовлена вимірювальним засобом, що використовується для вимірювання складових. Вона залежить від досконалості засобу та використаного методу вимірювання, частотного діапазону тестового сигналу. Більшість наявних засобів

такого призначення вимірюють параметри на частотах, які рознесені широко в діапазоні, а саме від напруги постійного струму до напруги високочастотного та надвисокочастотного діапазону. У такому разі визначають лише по одному параметру із багатоелементної схеми заміщення. Однак виконання таких умов у задачах кваліметрії не завжди допустиме. Пов'язано це з тим, що як низькі, так і високі частоти можуть зумовити руйнівну дію речовини чи матеріалу, тобто змінити їх властивості. Разом з тим, побудова самого вимірювального засобу для високочастотних вимірювань вимагає особливого підходу щодо схемних та конструктивних рішень.

Третьою складовою є похибка обчислювального компонента, тобто опрацювання отриманих результатів вимірювання складових. Зумовлена вона технічними можливостями обчислювальних пристроїв. На практиці така складова за необхідності може бути дуже малою завдяки використанню відповідних режимів роботи засобу. Отже, найістотніший вплив на результат вимірювання одиничних показників якості продукції імітансним методом має рівень досконалості вимірювальних засобів. Пряме використання засобів такого призначення, що занесені в Держреєстр України [7], є неможливим. Це, в основному, засоби вимірювання на одній фіксованій частоті тестового сигналу. Їх успішно використовують для контролю параметрів двоелементних двополюсників як індуктивного, так і ємнісного характеру. Реалізований метод з прямим перетворенням в таких засобах довів свою придатність для побудови як портативних [8], так і системного призначення [9] приладів такого застосування. Тому доцільним є подальший розвиток як теорії, так і практики побудови засобів вимірювальної техніки з прямим перетворенням параметрів імітансу в напругу щодо їх застосування в кваліметрії. Аналіз джерел похибок вимірювання для часткових випадків застосування показав, що основним їх джерелом є неідеальність перетворення імітансу як пасивної величини в комплексну активну величину [10]. Тобто доцільно виконати загальний аналіз похибок векторного перетворювача на фіксованій частоті тестового сигналу. Проаналізуємо похибки вимірювання складових імітансу засобами, що пройшли апробацію вимірювань CLR-параметрів одно- та двоелементних об'єктів на фіксованій частоті тестового сигналу.

Загалом задачі кваліметрії потребують вимірювань у широкому діапазоні абсолютних змін імпедансу, яким подається вид продукції. Активна складова такого імпедансу може мати значення від десятків Ом (матеріали з великими втратами, розчини) до  $10^6 - 10^9$  (суха деревина, бензин) і більше. Співвідношення між активною та реактивною складовими також може бути в досить широких межах (від “суто” активного до “суто” реактивного характеру).

З вимірювань опору [11] відомо, що для вимірювання низькоомних об’єктів доцільно оперувати комплексним опором, а для високоомних – комплексною провідністю. Похибки векторних перетворювачів, що використовують у наведених вимірювальних засобах, в основному зумовлені порушенням рівності струмів через вимірювальний об’єкт та прийняту для порівняння міру [12]. Призводить до цього наявність послідовного та паралельного неінформативного імпедансу та неідеальність активного елемента (операційного підсилення).

Передатна функція активного перетворювача із звичайною функцією перетворення (інвертуюче ввічнення операційного підсилювача ОП1 [13]) (рис. 2, а)

$$W = \frac{U_X}{U_T} = \frac{1 - \frac{Z_{вих}}{Z_2} \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right)}{Z_1 \left[ 1 + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_2}{Z_{ex}} + \frac{Z_{вих}}{Z_1} + \frac{Z_{вих}}{Z_{ex}} \right) \right]} \quad (3)$$

Для активного перетворювача з оберненою функцією перетворення [11] (рис. 2, б)

$$W = \frac{U_X}{U_0} = \frac{Z_1 \left[ 1 + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_2}{Z_{ex}} + \frac{Z_{вих}}{Z_1} + \frac{Z_{вих}}{Z_{ex}} \right) \right]}{Z_2 \left[ 1 - \frac{Z_{вих}}{Z_2} \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \right]} \quad (4)$$

$Z_1, Z_2$  – повні опори, що утворюють коло зворотного зв’язку ОП1;  $Z_{вих}$  – вихідний опір операційного підсилювача ОП1 (переважно до 100 Ом [15]);  $Z_{вх}$  – вхідний опір, що шунтує вхід ОП1 (паралельна схема заміщення ємнісного характеру);  $k_0, \omega_T$  – відповідно коефіцієнт ОП1 без зворотного зв’язку на постійному струмі та частота одиничного підсилення;  $\omega$  – робоча частота тестового сигналу  $U_T$ , яка може мати фіксовані значення  $\omega_1, \dots, \omega_n$ .

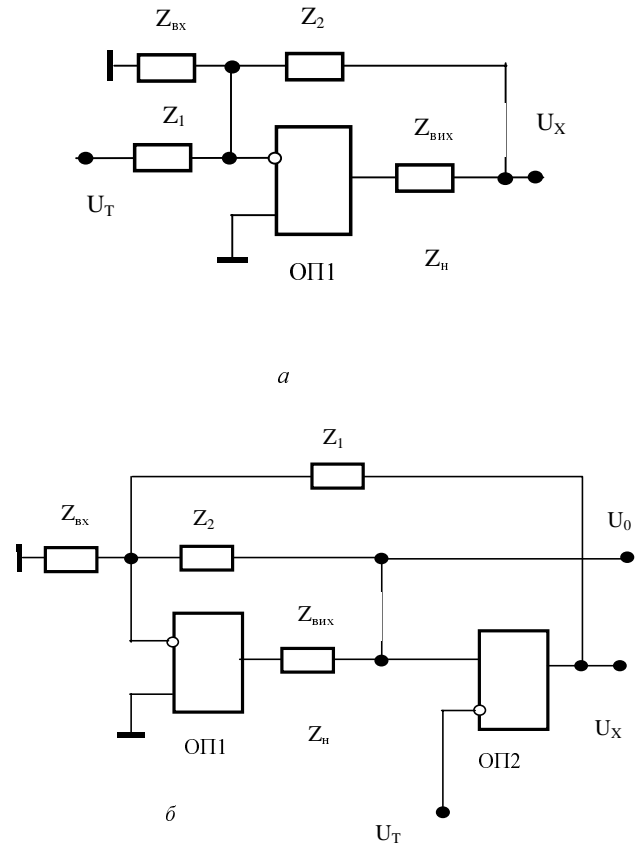


Рис. 2. Схеми активних перетворювачів параметрів двополюсників

Враховуючи, що вимірювання низькоомних об’єктів здійснюється за схемою вимірювання опору, то із наведених неінформативних параметрів потрібно враховувати лише вихідний опір ОП. Аналогічно, для високоомних об’єктів істотний вплив має лише паралельний імпеданс, а саме опір шунтування входу ОП1.

Вплив співвідношення  $\frac{Z_{вих}}{Z_{ex}}$  на результат вимірювання низькоомних об’єктів є неістотним, а вплив його при вимірюванні високоомних об’єктів проявляється при дистанційних вимірюваннях. Зумовлено це ємністю лінії зв’язку з трізатискачевим під’єднанням об’єкта вимірювання, причому на підвищених частотах. В нашому випадку його впливом також можна знехтувати.

З урахуванням цього вирази (3) і (4) спрощуються і набирають для вимірювання опору та провідності з використанням ОП із звичайною функцією перетворення вигляд

$$W_R = -\frac{Z_X}{Z_0} \frac{1 - \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_X} \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right)}{1 + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( 1 + \frac{Z_X}{Z_0} + \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} \right)}, \quad (5)$$

$$W_Y = -\frac{Y_X}{Y_0} \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( 1 + \frac{Y_X}{Y_0} + \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_0} \right)}, \quad (6)$$

де  $Z_2 = Z_X$ ;  $Z_1 = Z_0$  ( $Z_X$  – вимірюваний опір дво-  
полосника;  $Z_0$  – опір зразкової міри)  $Y_0 = \frac{1}{Z_0}$ ;

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0}; Y_{\text{вх}} = \frac{1}{Z_{\text{вх}}}.$$

Аналогічно для АП з оберненою функцією перетворення отримаємо

$$W_{R^o} = -\frac{Z_X}{Z_0} \frac{1 + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( 1 + \frac{Z_0}{Z_X} + \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_X} \right)}{1 - \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right)}, \quad (7)$$

$$W_{Y^o} = -\frac{Y_X}{Y_0} \left[ 1 + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( 1 + \frac{Y_0}{Y_X} + \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_X} \right) \right], \quad (8)$$

де  $Z_1 = Z_X$ ;  $Z_2 = Z_0$ ;  $Y_0 = \frac{1}{Z_0}$ ;  $Y_X = \frac{1}{Z_X}$ ;  $Y_{\text{вх}} = \frac{1}{Z_{\text{вх}}}$   
( $Y_X$ ;  $Y_0$  – вимірювана та зразкова провідності)

Абсолютна векторна похибка, як відомо, визначається різницею між реальними передатними функціями (5 – 8) та ідеальними (визначаються тільки відношеннями імітансів). З врахуванням цього загальні вирази абсолютної векторної похибки в режимі вимірювання опору  $\Delta_Z$  та провідності  $\Delta_Y$  для перетворювача із звичайною функцією перетворення (рис. 2, а) мають такі залежності

$$\Delta_Z = \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \frac{Z_X}{Z_0} + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} \left( 1 + \frac{Z_X}{Z_0} \right) + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( \frac{Z_X}{Z_0} \right)^2, \quad (9)$$

$$\Delta_Y = \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \frac{Y_X}{Y_0} \left( 1 + \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_0} \right) + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \left( \frac{Y_X}{Y_0} \right)^2. \quad (10)$$

Аналогічно для перетворювача з оберненою функцією абсолютні похибки вимірювання опору  $\Delta_Z^o$  та провідності  $\Delta_Y^o$  описуються виразами

$$\Delta_Z^o = -\left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \frac{Z_X}{Z_0} - \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} \left( 1 + \frac{Z_X}{Z_0} \right), \quad (11)$$

$$\Delta_Y^o = \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \frac{Y_X}{Y_0} + \left( \frac{1}{k_0} + j \frac{\omega}{\omega_T} \right) \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_0}. \quad (12)$$

Для вирішення завдань кваліметрії, а саме вимірювань в діапазоні частот 100 Гц – 100кГц впливом коефіцієнта  $k_0$  можна знехтувати, оскільки сучасні моделі операційних підсилювачів забезпечують  $\frac{1}{k_0} \ll \frac{\omega}{\omega_T}$ .

За загальними виразами абсолютної комплексної похибки вимірювання (9 – 12) можна отримати вирази для оцінювання похибок часткових випадків. Для цього у вирази (9 – 12) необхідно підставити замість  $Z_X$  чи  $Y_X$  їх складові (2), а замість  $Z_0$  чи  $Y_0$  – тип зразкової міри. Переважно використовують міру опору  $R_0$  або міру ємності  $C_0$  [16]. З отриманих виразів абсолютної похибки для кожного конкретного випадку (вимірювання опору чи провідності ємнісного чи індуктивного характеру) виділяють реактивну  $\Delta_1$  та активну  $\Delta_2$  складові комплексної похибки. Результати такого аналізу з використанням зразкової міри опору для різних режимів роботи наведених активних перетворювачів (рис. 2) зведені в таблицю.

## Векторна похибка активних перетворювачів імітансу

Імітанс	Складові векторної абсолютної похибки	
	Активний перетворювач із звичайною функцією перетворення	Активний перетворювач із оберненою функцією перетворення
$Z_C = -jX + R$	$\Delta_1 = \frac{\omega}{\omega_T} a + \frac{\omega}{\omega_T} (1+a)n_Z - \frac{\omega}{\omega_T} (m_Z^2 - n_Z^2)$ $\Delta_2 = \frac{\omega}{\omega_T} (1+a)m_Z + 2 \frac{\omega}{\omega_T} n_Z m_Z$	$\Delta_1 = -\frac{\omega}{\omega_T} (1+a)n_Z - \frac{\omega}{\omega_T} (1+a)$ $\Delta_2 = -\frac{\omega}{\omega_T} (1+a)m_Z$
$Z_L = jX + R$	$\Delta_1 = \frac{\omega}{\omega_T} a + \frac{\omega}{\omega_T} (1+a)n_Z - \frac{\omega}{\omega_T} (m_Z^2 - n_Z^2)$ $\Delta_2 = -\frac{\omega}{\omega_T} (1+a)m_Z - 2 \frac{\omega}{\omega_T} n_Z m_Z$	$\Delta_1 = -\frac{\omega}{\omega_T} (1+a)n_Z - \frac{\omega}{\omega_T} (1+a)$ $\Delta_2 = \frac{\omega}{\omega_T} (1+a)m_Z$
$Y_C = jB + G$	$\Delta_1 = \frac{\omega}{\omega_T} (1+b)n_Y - \frac{\omega}{\omega_T} cm_Y - \frac{\omega}{\omega_T} (m_Y^2 - n_Y^2)$ $\Delta_2 = -\frac{\omega}{\omega_T} (1+b)m_Y - \frac{\omega}{\omega_T} cn_Y - 2 \frac{\omega}{\omega_T} m_Y n_Y$	$\Delta_1 = \frac{\omega}{\omega_T} + \frac{\omega}{\omega_T} n_Y + \frac{\omega}{\omega_T} b$ $\Delta_2 = -\frac{\omega}{\omega_T} m_Z - \frac{\omega}{\omega_T} c$
$Y_L = -jB + G$	$\Delta_1 = \frac{\omega}{\omega_T} (1+b)n_Y + \frac{\omega}{\omega_T} cm_Y - \frac{\omega}{\omega_T} (m_Y^2 - n_Y^2)$ $\Delta_2 = \frac{\omega}{\omega_T} (1+b)m_Y - \frac{\omega}{\omega_T} cn_Y + 2 \frac{\omega}{\omega_T} m_Y n_Y$	$\Delta_1 = \frac{\omega}{\omega_T} + \frac{\omega}{\omega_T} n_Y + \frac{\omega}{\omega_T} b$ $\Delta_2 = \frac{\omega}{\omega_T} m_Z - \frac{\omega}{\omega_T} c$
Введені позначення	$a = \frac{R_{\text{вх}}}{R_0}; \quad b = \frac{G_{\text{вх}}}{R_0}; \quad c = \frac{B_{\text{вх}}}{R_0}; \quad n_Z = \frac{R}{R_0}; \quad m_Z = \frac{X}{R_0}; \quad n_Y = R_0 B; \quad m_Y = R_0 B$	

## Висновки

1. Похибки вимірювання як опору, так і провідності двополюсника з використанням активного перетворювача з оберненою функцією перетворення описуються простішими залежностями. На фіксованій частоті тестового сигналу та при сталих значеннях неінформативних параметрів (впливних величин) вони містять адитивні та мультиплікативні складові, що дає можливість використати для їх коригування простіші алгоритми. Для перетворювача із звичайною функцією перетворення похибки додатково містять похибку нелінійності, яка визначається співвідношенням активної та реактивної складових об'єкта вимірювання.

2. Вплив неінформативних параметрів можна істотно зменшити, зменшивши співвідношення між значеннями впливних параметрів та зразковою мірою.

3. Забезпечити інваріантність складових векторної похибки до частоти тестового сигналу (фіксованого рівня) можна (при коригуванні похибок на одній частоті) зміною частоти одиничного підсилення та співвідношень між реактивними складовими та зразковою мірою опору.

1. Головка Д.Б., Скрипник Ю.О. Методи та засоби частотно-дисперсійного аналізу речовин та матеріалів: Фізичні основи. – К., 2000. 2. Боровских Л.П. Исследование методов и средств преобразования многоэлементных двухполюсников. Автореф. на соиск. учен. степ. канд. техн.

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