

УДК 621.317.3

# РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ КОРИГУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ПОХИБОК ОПЕРАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СХЕМ

**Р. Івах**, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій,

**Ю. Хома**, кандидат технічних наук, асистент кафедри,

Інститут комп'ютерних технологій, автоматики і метрології Національного університету «Львівська політехніка»

*Основним джерелом похибок вимірювального перетворювача за методом автобалансування є операційний підсилювач, тому для підвищення точності засобів частотного аналізу імпедансу доцільно застосувати алгоритмічну корекцію. Розв'язавши рівняння, якими описуються формалізовані моделі, відносно активної та реактивної складових вимірюваного імпедансу та зробивши певні спрощення, отримано вирази для алгоритмічної корекції частотних похибок вимірювального перетворювача.*

*The nature and application fields of impedance spectroscopy are presented in the article. The structure and operation principle of active measurement converter based on autobalancing circuit are described. Two modifications are considered in the article:*

*one for measurements in impedance mode and the other one for measurements in admittance mode. The main errors source of the measurement converter based on autobalancing circuit is operational amplifier. At high operating frequencies it parameters strongly deviates from nominal ones, which leads to so called frequency (dynamic) measurement errors. The analysis of mathematical model allowed to synthesize the algorithm for errors correction. As mathematical model of autobalancing circuit is a non-linear equation in complex numbers, some simplification was performed, which at the same time haven't impacted the model accuracy. Developed correction algorithms include three quasi-constant values K, C and D. Each of these values represents one of error sources, namely degradation of amplifier gain over frequency, input capacitance of the operational circuit and non-zero output impedance of the amplifier.*

**Ключові слова:** вимірювальний перетворювач, імпеданс, адмітанс, вимірювання, алгоритмічна корекція, частотна похибка, метод автобалансування

**Keywords:** measurement converter, impedance, admittance, measurement, algorithmic correction, frequency error, autobalancing method.

**В**имірювання імпедансу — актуальне завдання для багатьох галузей наукової та практичної діяльності, наприклад, для дослідження біологічних і фізико-хімічних об'єктів [1—3], для вивчення властивостей матеріалів [4, 5], зокрема, на мікро- та нанорівнях [6, 7], для корозійного моніторингу і діагностики [8, 9], для контролю параметрів батарей і паливних елементів електрохімічних джерел живлення [5, 10] тощо. Для реалізації цих завдань використовують частотні аналізатори імпедансу (ЧАІ), за побудови яких важливим є вибір вимірювального перетворювача, який би забезпечував високу чутливість, лінійність та стабільність функції перетворення.

У [11] обґрунтовано переваги побудови вимірювального перетворювача за методом автобалансування (рис. 1).

Основним джерелом похибок вимірювального перетворювача за методом автобалансування є операційний підсилювач (ОП), тому для підвищення точності засобів частотного аналізу імпедансу доцільно застосувати алгоритмічну корекцію. У [12] представлено формалізовані моделі адмітансу та імпедансу в напругу з урахуванням властивостей операційного підсилювача:

$$\dot{H} = \frac{(G + jB) \left(1 - j \frac{D}{K}\right)}{1 + j \frac{1}{K} [1 + (G + jB)(1 + D) + jC(1 + D)]}; \quad (1a)$$



Р. Івах



Ю. Хома

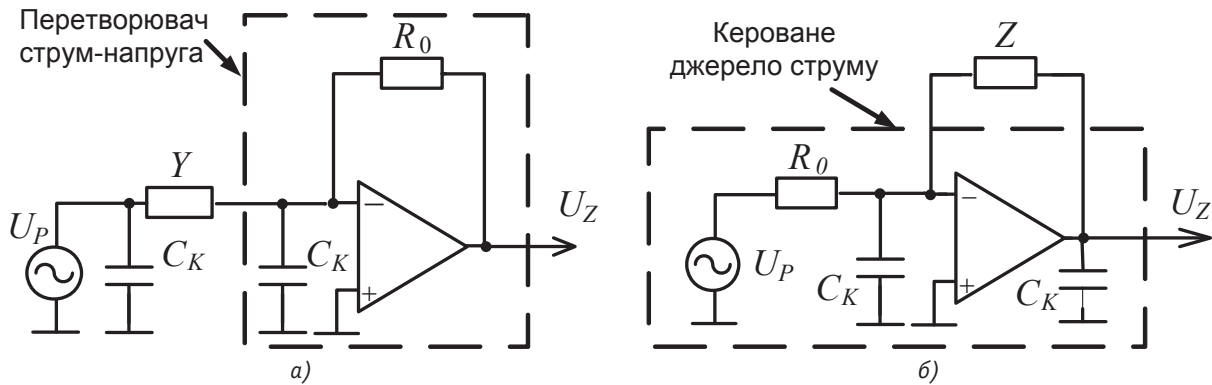


Рис. 1. Вимірювальний перетворювач за методом автобалансування:  
 а — режим вимірювання адмітансу; б — режим вимірювання імпедансу  
 Fig. 1. Measurement converter based on autobalancing circuit:  
 a — admittance mode of; b — impedance mode

$$\dot{H} = \frac{(R + jX) - j\frac{D}{K}}{1 + j\frac{1}{K}[1 + (R + jX)(1 + jC) + D(1 + jC)]}, \quad (1,6)$$

де  $K = f_T/f$  — відношення частот одиничного підсилення і зондувального сигналу;  $D = R_{OUT}/R_0$  — відношення вихідного опору до опору еталонного резистора  $R_0$ ;  $C = \omega C_{IN}R_0$  — стала часу ОП за вхідної ємності  $C_{IN}$  на границі вимірювання  $R_0$ .

Кожний із параметрів відображає одне із трьох основних джерел частотної похибки АВП:  $K$  — спад коефіцієнта підсилення ОП;  $D$  — пряме проходження сигналу, зумовлене ненульовим вихідним опором ОП;  $C$  — шунтування диференційного та синфазного опорів ОП вхідною ємністю.

На основі представлених моделей (1, а) — (1, б) синтезуватимемо алгоритми коригування частотних похибок активного вимірювального перетворювача (АВП). По суті зазначене завдання розроблення алгоритмів коригування зводиться до розв'язання виразів (1, а) та (1, б) відносно вимірюваних величин  $Y_X$  та  $Z_X$ . Обидва вирази — це дробово-раціональні функції, чисельники і знаменники яких є поліномами першого порядку. Їх розв'язок є лінійним рівнянням. Відмінна особливість цього завдання — комплексна природа величин, що входять до складу цих виразів.

Мета роботи — синтез виразів для алгоритмічної корекції частотних похибок АВП.

### СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ КОРИГУВАННЯ

За визначенням функція передавання це відношення зображень вихідного і вхідного сигналів, тобто

$$\dot{H} = \frac{\dot{U}_X}{\dot{U}_P} = P + j \cdot Q, \quad (2)$$

де  $U_X$  — комплексна вимірювана напруга;  $U_P$  — зондувальна напруга;  $P$  та  $Q$  — унормовані синфазна та квадратурна складові вимірювальної напруги.

У випадку ідеальної функції передавання АВП величини  $P$  та  $Q$  збігаються з унормованими результатами вимірювання активної та реактивної складових імпедансу відповідно:

- в режимі адмітансу  $\dot{H}_{ID} = -Y_X R_0 = G + j \cdot B$ , (3, а)
- в режимі імпедансу  $\dot{H}_{ID} = -\frac{Z_X}{R_0} = R + j \cdot X$ . (3, б)

Тобто величини  $P$  і  $Q$  можна трактувати як «грубі» результати вимірювання імпедансу.

Підставивши вираз (2) в (1), отримаємо вирази, що враховують реальні характеристики АВП і пов'язують «грубі» результати вимірювання складових адмітансу та імпедансу з їх істинними значеннями:

$$H = P + j \cdot Q = \frac{(G + jB) \left(1 - j\frac{D}{K}\right)}{1 + j\frac{1}{K}[1 + (G + jB)(1 + D) + jC(1 + D)]}, \quad (4, а)$$

$$H = P + j \cdot Q = \frac{(R + jX) - j\frac{D}{K}}{1 + j\frac{1}{K}[1 + (R + jX)(1 + jC) + D(1 + jC)]}. \quad (4, б)$$

На основі цих виразів синтезуємо алгоритми корекції спершу для адмітансу, а потім для імпедансу.

Спочатку позбудемося знаменника у виразі (4, а), домноживши на нього праву та ліву частини:

$$P + jQ + j \frac{(P + jQ)}{K} [1 + (G + jB)(1 + D) + jC(1 + D)] = (G + jB) \left( 1 - j \frac{D}{K} \right). \quad (5)$$

Виділивши і записавши окремо активну та реактивну складові у наведеному виразі, отримаємо систему двох рівнянь в дійсних числах:

$$\begin{cases} P - \frac{P}{K}(B + C)(1 + D) - \frac{Q}{K}[1 + G(1 + D)] = G + B \frac{D}{K} \\ Q - \frac{Q}{K}(B + C)(1 + D) + \frac{P}{K}[1 + G(1 + D)] = B - G \frac{D}{K} \end{cases} \quad (6)$$

Перегрупуємо вирази відносно  $G$  і  $B$  та перенесемо вільні члени у ліву частину. Тоді отримаємо:

$$\begin{cases} G \left[ 1 + Q \frac{(1 + D)}{K} \right] + B \frac{[D + P(1 + D)]}{K} = P \left[ 1 - C \frac{(1 + D)}{K} \right] - \frac{Q}{K} \\ -G \frac{[D + P(1 + D)]}{K} + B \left[ 1 + Q \frac{(1 + D)}{K} \right] = Q \left[ 1 - C \frac{(1 + D)}{K} \right] + \frac{P}{K} \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язок цієї системи рівнянь має вид вкрай громіздкий і незручний для аналізу. Тому доцільно знехтувати членами, вплив яких є несуттєвим. Справедливі такі припущення:

$$\frac{D}{K^2} \approx 0, \quad (8, \text{ а})$$

$$\frac{(1 + D)^2}{K^2} \approx \frac{1}{K^2}, \quad (8, \text{ б})$$

$$CD \approx 0. \quad (8, \text{ в})$$

Вирази розв'язку із урахуванням (8) набудуть виду:

$$G = \frac{P - \frac{PC + QD}{K} - \frac{P^2 + Q^2}{K}}{1 + 2Q \frac{1 + D}{K} + \frac{P^2 + Q^2}{K^2}}, \quad (9, \text{ а})$$

$$B = \frac{Q + \frac{P(1 + D) - QC}{K} + (P^2 + Q^2) \frac{1 + D}{K} - \frac{C(P^2 + Q^2)}{K^2}}{1 + 2Q \frac{1 + D}{K} + \frac{P^2 + Q^2}{K^2}}. \quad (9, \text{ б})$$

Отримані вирази є алгоритмами коригування результатів  $P$  і  $Q$  вимірювання складових адмітансу.

Аналогічно виведемо алгоритми коригування для імпедансу. Домножимо праву і ліву частину виразу (4, б) на його знаменник і сформуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} P - P \frac{X + CR + CD}{K} - Q \frac{1 + R - CX + D}{K} = R \\ Q - Q \frac{X + CR + CD}{K} + P \frac{1 + R - CX + D}{K} = X - \frac{D}{K} \end{cases} \quad (10)$$

Здійснивши відповідні перетворення, запишемо систему в канонічному виді відносно шуканих ве-

личин  $R$  та  $X$ :

$$\begin{cases} R \left( 1 + \frac{PC + Q}{K} \right) + X \frac{(P - QC)}{K} = P \left( 1 - \frac{CD}{K} \right) - Q \frac{(1 + D)}{K} \\ -R \frac{(P - QC)}{K} + X \left( 1 + \frac{PC + Q}{K} \right) = Q \left( 1 - \frac{CD}{K} \right) + P \frac{(1 + D)}{K} + \frac{D}{K} \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язавши цю систему отримаємо з урахуванням виразів (8) спрощені алгоритми коригування у режимі імпедансу:

$$R = \frac{P + C \frac{P^2 + Q^2}{K} - Q \frac{1 + D}{K} - \frac{P^2 + Q^2}{K^2}}{1 + 2 \frac{PC + Q}{K} + \frac{P^2 + Q^2}{K^2} (1 + C^2)}, \quad (12, \text{ а})$$

$$X = \frac{Q + \frac{P^2 + Q^2}{K} + P \frac{1 + D}{K} + \frac{D}{K} + C \frac{P^2 + Q^2}{K^2}}{1 + 2 \frac{PC + Q}{K} + \frac{P^2 + Q^2}{K^2} (1 + C^2)}. \quad (12, \text{ б})$$

Порівнюючи вирази алгоритмів коригування результатів вимірювання адмітансу (9) та імпедансу (12), відзначимо їх схожість та симетричність щодо активної та реактивної складових. Розроблені алгоритми необхідно верифікувати в діапазоні частот і у фазовій площині, щоби оцінити їх ефективність, а також визначити найбільш несприятливі з точки зору точності умови.

## ВИСНОВКИ

Формалізовані адмітансну та імпедансну моделі по суті можна розглядати як функцію перетворення АВП, яка пов'язує вихідну напругу операційного підсилювача з істинними значеннями імпедансу чи адмітансу досліджуваного об'єкта. Розв'язавши рівняння, якими описуються формалізовані моделі, відносно активної та реактивної складових вимірюваного імпедансу та зробивши певні спрощення, отримано вирази для алгоритмічної корекції частотних похибок вимірювального перетворювача.

У розроблених алгоритмах корекції фігурують деякі величини  $K$ ,  $C$  та  $D$ , які залежать від таких параметрів ОП, як частота одиничного підсилення, вхідна ємність та вихідний опір. За заданої частоти зондувального сигналу і на вибраній границі вимірювання ці величини є сталими, проте конкретні їхні значення залишаються невідомими. Для визначення цих умовно сталих параметрів моделі розроблено спеціальні алгоритми. Щоби уникнути проведення додаткових вимірювань, зазначені величини ідентифікуються на етапі калібрування вимірювального каналу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Grimnes S., Martinsen O.G. Bioimpedance & Bioelectricity Basics. Second Edition: Academic Press, Elsevier, — 2008. — 471 p.
2. Martinez F.S. Electrical Bioimpedance Cerebral Monitoring: Fundamental Steps towards Clinical Application: Thesis for the degree of doctor of philosophy / Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden, — 2007. — 137 p.
3. Jaffrin M.Y., Morel H. Body fluid volumes measurements by impedance: A review of bioimpedance spectroscopy (BIS) and bioimpedance analysis (BIA) methods // Medical Engineering & Physics 30 (2008). — p. 1257—1269.
4. Імпедансна спектроскопія: Навч. посібник / І.І. Григорчак, Г.В. Понеділок. — Львів: Вид-во Львівської політехніки (Impedance spectroscopy: Training. manual / I.I. Grigorchak, G.V. Ponedilok. — Lviv: «Lviv Polytechnic» National University), — 2011. — 352 с/р.
5. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance spectroscopy: theory, experiment and application. — N.Y.: Wiley, — 2005. — 595 p.
6. O'Hayre R., Lee M., Prinz F.B, Kalinin S.V. Frequency-Dependent Transport Imaging by Scanning Probe Microscopy // Scanning Probe Microscopy. Springer, — 2007. — p. 132—172.
7. Хома Ю.В. Перспективи використання імпедансної спектроскопії в нанотехнологіях // IX Міжнародна науково технічна конференція «Методи і засоби вимірювання фізичних величин» — «Температура 2012»: Тези доповідей. — Львів, 25-28 вересня 2012 р. (Khoma Yu. Prospects for the use of impedance spectroscopy in nanotechnology // IX International Scientific Conference «Methods and tools for measuring physical values» — «Temperature 2012»: Abstracts. — Lviv, 25-28 September 2012) — С/Р. 191—192.
8. Сафонов В.А. Импедансная спектроскопия для изучения и мониторинга коррозионных явлений // Электрохимия (Safonov V.A. Impedance spectroscopy for the Study and Monitoring corrosion phenomena // Elektrochemistry). — 1993. — Т/V. 29. — № 1. — С/Р. 152—160.
9. Carullo A., Parvis M., Vallan A. Fast impedance analyser for corrosion monitoring // XVI IMEKO World Congress 2000, Vienna, Austria 2000, Vol. VI, TC-10, p. 161—165.
10. Karden E., Buller S., De Doncker R.W. A method for measurement and interpretation of impedance spectra for industrial batteries // J. Power Sources. 2000. Vol. 85. P. 72—78.
11. Ю.В. Хома, Р.М. Івах, І.Д. Питель. Розроблення метрологічної моделі частотного аналізатора імпедансу прямої дії // Науковий вісник НЛТУ України. Збірник науково-технічних праць (Khoma Yu., Ivakh R., Pytel I. Development of metrological model of direct measure impedance analyser // Scientific Journal NLTU Ukraine. The collection of scientific works). — 2016. — Т/V. 26.1. — С/Р. 305—310.
12. Р.М. Івах, Ю.В. Хома. Удосконалення математичних моделей вимірювальних перетворювачів на базі операційних підсилювачів // Науковий вісник НЛТУ України. Збірник науково-технічних праць (Ivakh R., Khoma Yu. Improvement of mathematical models of the transmitter on the basis of operational amplifiers // Scientific Journal NLTU Ukraine. The collection of scientific works). — 2016. — Т/V. 26.7. 

Отримано / received: 15.11.2016.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І.П. Микитиним (Україна).  
Prof. I.P. Mykytin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.