

МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В ІМПЕДАНСНІЙ СПЕКТРОСКОПІЇ З ВРАХУВАННЯМ НЕГАРМОНІЧНОСТІ СИГНАЛІВ

Представлено методику підвищення точності вимірювального перетворення в імпедансній спектроскопії з врахуванням негармонічності сигналів, яка ґрунтується на результатах модельних досліджень структурних елементів вимірювальних сигнальних перетворювачів.

На даний час значна увага приділяється розвитку сенсорної техніки якій базується на методах імпедансної спектроскопії. Інформативними сигналами імпедансної спектроскопії є активна та реактивна складова імпедансу досліджуваного об'єкта які отримують з допомогою спеціалізованих сигнальних перетворювачів, наприклад, квадратурних детекторів. Визначальними вимогами до вимірювальних перетворювачів сенсорних пристроїв є універсальність, мінімальне енергоспоживання, можливість функціонувати при низьких напругах живлення, стабільність роботи при зміні зовнішніх факторів.

Використання методу імпедансної спектроскопії дає можливість створювати вимірювальні пристрої для аналізу матеріалів, для дослідження біології клітин, медичній діагностиці, екології. Імпедансна спектроскопія забезпечує простоту реалізації, енергоефективність, високу роздільну здатність та селективність вимірювань параметрів.

Розроблено методику, яка базується на використанні імпульсних подразнюючих сигналів. Вона дозволяє відмовитися від необхідності використання перестроюваних по частоті задаючих генераторів функції синуса, які типово реалізуються на основі високорецизійних цифро-аналогових перетворювачів та згладжуючих фільтрів. Тому зменшується похибка вимірювання імпедансних характеристик обумовлених гармонічними спотвореннями сигналів.

Поставлена задача набуває особливої актуальності на високих частотах, де реальні параметри елементної бази сигнальних перетворювачів, здебільшого операційних підсилювачів, обмежують швидкість наростання задаючого сигналу.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, діаграма Найквіста, квадратурний детектор, параметричний аналіз, сигнальний перетворювач, SPICE модель.

G.I. BARYLO, V.V. VIRT, F.F. VEZYR, R.L. HOLYAKA, Z.U. HOTRA, G.L. KUCHMIY
Lviv Polytechnic National University

METHOD OF IMPROVE THE ACCURACY OF MEASURING CONVERSION IN IMPEDANCE SPECTROSCOPY WITH TAKING ACCOUNT OF NONHARMONIC SIGNALS

We presented method of improving the accuracy of measuring conversion in impedance spectroscopy with taking account of nonharmonic signals which based on results of modeling research of structural elements measuring signal transducers.

At the moment considerable attention is given the development of sensor technology based on impedance spectroscopy methods. An informative signal of impedance spectroscopy is active and reactive component of the impedance of the investigated object obtained from using specialized signal transducer, for example, quadrature detector. Versatility, low energy consumption, the ability to operate at low voltage, job stability at the change of external factors is defining the requirements for measuring transducers of sensor devices.

Using impedance spectroscopy allows creating measuring devices for analyzing materials, for investigation of cell biology, medical diagnostics, and ecology. Impedance spectroscopy provides ease of implementation, energy efficiency, and high-resolution measurements of selectivity.

The method based on using of influence pulse signals. It is allowed to refuse the need for tunable master oscillator frequency sine functions which typically implemented based on high-precision digital-to-analog converters and smoothing filters. Therefore, caused by impedance characteristics of harmonic distortion signals is decreasing the measurement error.

The task becomes particularly relevant at high frequencies where the real parameters of components of signal converters, operational amplifiers mostly limit slew rate setting signal.

Keywords: impedance spectroscopy, Nyquist plot, quadrature detector, parametric analysis, signal transducer, SPICE model.

Реалізація імпедансної спектроскопії передбачає перехід від частотних діаграм до діаграм на комплексній площині – діаграм Найквіста. В ряді сучасних версій пакетів програм схемного моделювання вже передбачено метод імпедансного аналізу з використанням математичних функцій дійсних Re та уявних Im складових сигналу. З допомогою цих функцій представляється можливим розрахувати відповідні значення активного $Re \hat{Z}$ та реактивного $Im \hat{Z}$ імпедансу, а відтак, побудувати діаграму Найквіста. Однак, такий підхід не є універсальним, і зокрема, накладає значні обмеження щодо проведення модельних досліджень реальних схем вимірювальних перетворювачів з врахуванням параметрів реальних сигналів – їх форми, амплітуди, негармонічності тощо [1].

Отримані в даній роботі результати базуються на методі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) модельних досліджень в якому проводиться співставлення малосигнального АС аналізу за змінним струмом та перехідного Transient аналізу [2, 3]. В ході АС аналізу отримують імпедансні діаграми Найквіста в ідеалізованому випадку, а в ході Transient аналізу розраховують значення активної $Re \hat{Z}$ та реактивної $Im \hat{Z}$ складових імпедансу для фактичних параметрів вимірювальних перетворювачів та форми активуючих сигналів. Реалізація вищезгаданого методу передбачає використання синхронного квадратурного детектування вихідних сигналів [4, 5]. Активна складова вихідного сигналу - інформативний сигнал активного імпедансу $Re \hat{Z}$, детектується та інтегрується синфазно з задаючим вхідним сигналом, а реактивна складова - інформативний сигнал активного імпедансу $Im \hat{Z}$ – зі зміщенням на $\pi/2$. Використовуючи результати таких досліджень нами була запропонована методика підвищення точності вимірювального перетворення, яка і враховує вищезгаданий вплив фактичних параметрів вимірювальних перетворювачів та форми активуючих сигналів [6].

Методика дослідження передбачає формування та порівняння трьох масивів інформативних сигналів активного $\text{Re } \hat{Z}$ та реактивного $\text{Im } \hat{Z}$ імпедансу. Перший масив $M(\text{AC})$ отримуємо використовуючи АС малосигнальний аналіз, який відповідає ідеалізованому варіанту вимірювального перетворення та надалі буде використовуватися в якості опорного. Наступні два масиви - $M(\text{H1})$, $M(\text{HN})$ - отримуємо методом Transient аналізу використовуючи інтеграли вихідних напруг квадратурного детектора вимірювального перетворювача імпедансу. Причому, масив $M(\text{H1})$ формується при активації вхідним джерелом гармонічного коливання (перша Н1 гармоніка), а масив $M(\text{HN})$ - при активації функціонально керованим джерелом, що синтезує негармонічний сигнал у виді гармонік НН. Зокрема, для випадку імпульсного джерела інформативні сигнали аналізують вводячи у вхідний сигнал набір непарних гармонік, тобто частот $3f$, $5f$, $7f$ тощо.

Методику дослідження розглянемо на прикладі сигнального перетворювача імпедансу двополюсника у виді двох RC ланках [7]. Спершу проведемо АС аналіз (рис. 1) імпедансу такого двополюсника та отримуємо масив $M(\text{AC})$ у пакеті прикладних програм MicroCap [8]. Схема містить задаючий генератор сигналу V_i , перетворювач напруга-струм на керованому джерелі $G1$ типу IofV та досліджуваній двополюсник з двох RC ланок - $R1, C1, R2, C2$. Значення цього масиву, а саме, активний $\text{Re } \hat{Z} = \text{Re}(V(3))$ та реактивний $\text{Im } \hat{Z} = \text{Im}(V(3))$ імпеданси, а також діаграма Найквіста - $\text{Im}(V(3)) = f(\text{Re}(V(3)))$, служитимуть опорними для оцінки точності вимірювального перетворення з врахуванням та подальшою корекцією впливу вищих гармонік.

Для розрахунку наступних двох масивів інформативних сигналів активного $\text{Re } \hat{Z}$ та реактивного $\text{Im } \hat{Z}$ імпедансу - $M(\text{H1})$ та $M(\text{HN})$ - використовуємо схему заміщення квадратурного детектора (рис. 2) та метод Transient аналізу. Схема детектора (рис. 2) містить задаючий генератор сигналу

$E1$ типу NFV, перетворювач напруга-струм на керованому джерелі $G1$ типу IofV, неінвертуючий $X1$ та інвертуючий $X2$ повторювачі напруги, ключі $S1, S2, S3, S4$ та джерела E_{re}, E_{im} напруг керування цими ключами. Напруга на досліджуваному двополюснику детектується з виділенням активної $V(5)$ та реактивної $V(7)$ складових, відповідно, на резисторах навантаження R_{load1}, R_{load2} . Активна складова детектується ключами $S1, S2$ синфазно з задаючим вхідним сигналом, а реактивна - ключами $S3, S4$ зі зміщенням на $\pi/2$. Далі ці напруги інтегруються з використанням функції типу SD (Running integral with respect to time) і використовуються і використовуються інформативними сигналами активної $SD(V(5))$ та реактивної $SD(V(7))$ складових імпедансу.

В схемі заміщення використано спосіб формального синтезу задаючого сигналу, який реалізується функціональним генератором сигналу $E1$ формульного типу NFV (Formula type voltage Function Source).

Аргументами математичних функцій такого генератора можуть служити параметри інших компонентів схеми. Така можливість дозволяє замінити значення частот f на їх формальні аналоги, зокрема опори резисторів. В даному разі, очевидно, що мова йде лише про числові значення цих величин, а не про їх фізичний зміст.

Значення частоти задається опором резистора R_F , а числових значень коефіцієнтів гармонічного ряду - опорами резисторів R_{H3}, R_{H5}, R_{H7} тощо. Значення цих опорів використовуються у математичному виразі джерела сигналу $E1$ (формула записана у відповідності до SPICE синтаксису):

$$\text{Value} = \sin(2 * \pi * R(RF) * t) + \sin(3 * \pi * R(RF) * t) * R(RH3) + \sin(5 * \pi * R(RF) * t) * R(RH5) + \sin(7 * \pi * R(RF) * t) * R(RH7) + \dots$$

Зокрема, використовуючи перетворення Фур'є, сигнали прямокутної форми можуть бути представлені у виді функції $P_H(t)$, яка розкладається в гармонічний ряд:

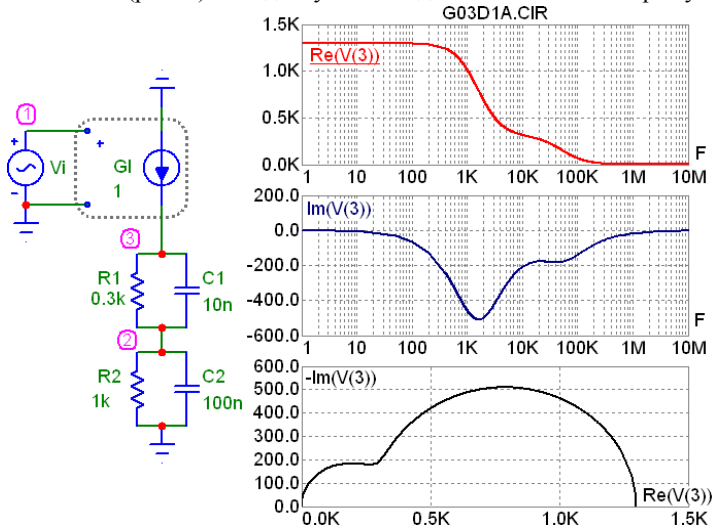


Рис. 1. SPICE схема заміщення та приклад результату АС аналізу імпедансу двополюсника на двох RC ланках

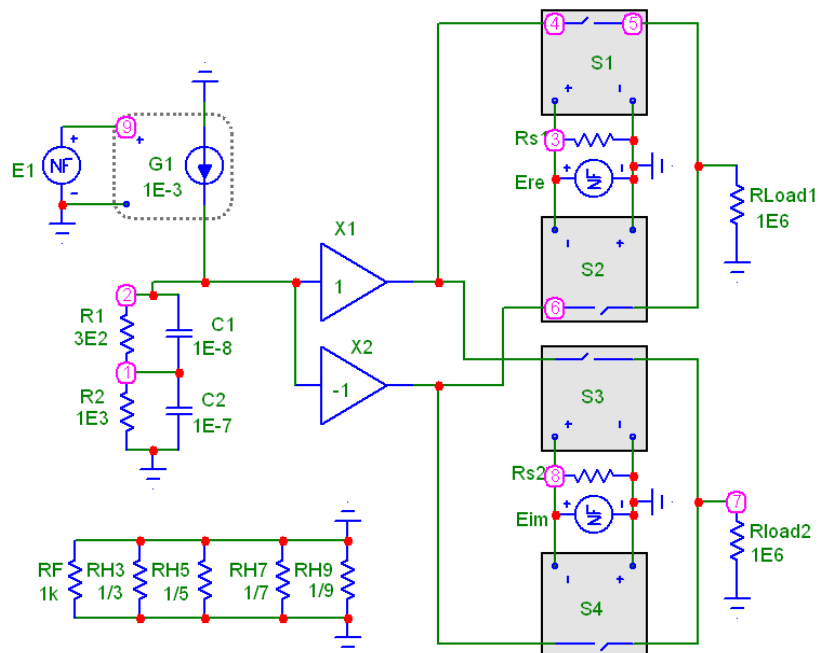


Рис. 2. SPICE схема заміщення перетворювача імпедансу на основі квадратурного детектора

$$P_H(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\omega t)}{k}, \quad (1)$$

де $k = 1, 3, 5 \dots$ - непарні гармоніки.

Суттєвою перевагою вказаного способу формального синтезу задаючого сигналу є можливість оперативної зміни коефіцієнтів гармонічного ряду в ході Transient аналізу, що реалізується динамічною покроковою зміною значень R3, R5, R7... Така зміна може реалізовуватися, як одночасно методом Stepping: Step all variables simultaneously, так і послідовно - методом Stepping: Step variables in nested loops. Відзначимо, що спосіб приєднання резисторів RF, R3, R5 ... в SPICE схемі заміщення значення немає, адже важливими є номінальні значення цих резисторів, а не напруги чи струми в їх колі.

Для прикладу на рис. 3 представлені епюри струму через досліджуваний двополюсник I(G1) та вихідних напруг V(5), V(7). Основна частота задаючого сигналу становить $f = 10$ Гц, а значення гармонік H1, H3, H5, H7, H9 відповідають коефіцієнтам ряду (1).

Аналіз форм сигналів та таких епюрax дозволяє виявити якісні особливості сигнального перетворення, що є важливим з точки зору подальшої оптимізації вимірювання, зокрема, вибору тривалості інтегрування та аналізу впливу часової роздільної здатності на точність вимірювання. В результаті такої оптимізації визначають вимоги до параметрів елементної бази (операційних підсилювачів, ключів тощо).

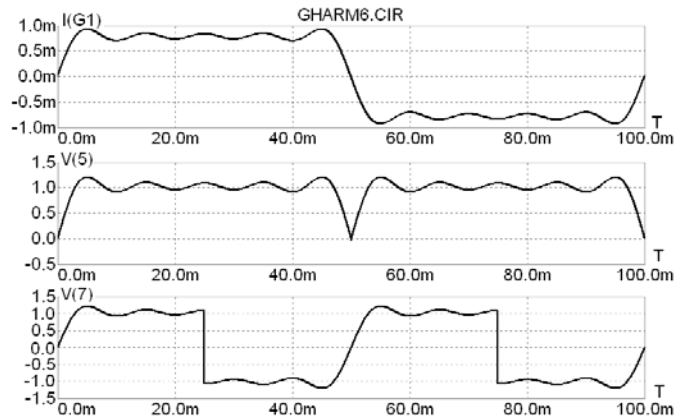


Рис. 3. Епюри сигналів: частота $f = 10$ Гц, гармоніки H1, H3, H5, H7, H9

Література

1. Григорчак І.І., Понеділок Г.В. Імпедансна спектроскопія: навч. посібник. – Львів. Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 352 с.
2. Мікросхемотехніка. Підручник за редакцією З.Ю.Готри / Гельжинський І.І, Голяка Р.Л., Готра З.Ю, Марусенкова Т.А. – Львів: Ліга-Прес. - 2015. – 492 с.
3. Parametric Analysis of Input Circles of Measuring Transducers Impedance of Potentiometric Type / Г. І.Баріло, В. В. Вірт, Ф. Ф. Везир, Р. Л. Голяка. // "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – 2017. – С. 311–314.
4. SPICE модель квадратурного синхронного детектора вимірювальних перетворювачів імпедансу / Г. І.Баріло, Р. Л. Голяка, В. В. Вірт, З. Ю. Готра. // Вісник національного університету "Львівська політехніка". – 2016. – №849. – с. 126–134.
5. Spartak Mankovsky; Emilia Mankovska. Symbolic model of the quadrature detector // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET) 2016 Pages: 87 – 89.
6. Методика модельних досліджень параметрів вимірювальних перетворювачів імпедансу / Г. І. Баріло, В. В. Вірт, Р. Л. Голяка, З. Ю. Готра. // 2016 IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМі- Ко'2016/УкрМіСо'2016) / Збірник матеріалів науково-технічної конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2016. – ст. 278–280.
7. Z.Hotra, R.Holyaka, T.Marusenкова, J.Potencki. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors // Elektronika. Rzeszow. Poland. – 2010. – № 8. P.129 – 132.
8. MICRO-CAP. Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software. – 2014. – 8 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.spectrum-soft.com>.

Reference

1. I. Hryhorchak, G.V. Ponedilok. Impedance spectroscopy, teach. manual. - Lviv. Lviv Polytechnic National University Publishing House, 2011. - 352 p. [in Ukrainian].
2. Microcircuitry. Handbook edited Z.U. Hotra / Helzhynskiy I.I., Holyaka R.L., Hotra Z.U., Marusenкова T.A., - Lviv; Liga-Press. – 2015. – 492 p. [in Ukrainian].
3. Parametric Analysis of Input Circles of Measuring Transducers Impedance of Potentiometric Type / G.I. Barylo, V.V. Virt, F.F. Vezyr, R.L. Holyaka // "Information technology and computer modeling" International scientific and practical conference. – 2017. – P. 311–314.
4. SPICE model of quadrature synchronous detector measuring impedance transducers / G. I.Barylo, V.V. Virt, R.L. Holyaka, Z. Hotra // Journal of National University "Lviv Polytechnic". - 2016. - №849. - p. 126-134.
5. Spartak Mankovsky; Emilia Mankovska. Symbolic model of the quadrature detector // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET) 2016 Pages: 87 – 89.
6. The method of modeling research impedance parameters measuring transducers / G. I.Barylo, V.V. Virt, R.L. Holyaka, Z. Hotra // 2016 IEEE International Conference on information and telecommunication technologies and Radioelectronics (UkrMiCo'2016) / Proceedings of the scientific conference. - 2016 - p. 278-280.
7. Z.Hotra, R.Holyaka, T.Marusenкова, J.Potencki. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors // Elektronika. Rzeszow. Poland. – 2010. – № 8. P.129 – 132.
8. MICRO-CAP. Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software. – 2014. – 8 p. [Online]. Available: <http://www.spectrum-soft.com>.