

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

УДК 537.312

DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.12.10>

АНАЛІЗАТОР ЕЛЕКТРИЧНОГО ІМПЕДАНСУ СЕНСОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ

П. Парандій, Р. Яремик

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, 79005, Львів, Україна
petro.parandiy@lnu.edu.ua*

На базі мікросхеми спеціалізованого інтегрального перетворювача спектрального складу імпедансу AD5933A (Analog Devices) реалізовано портативну вимірювально-обчислювальну систему для опрацювання інформаційних сигналів багатоеlementної матриці сенсорних давачів на основі поруватого кремнію. Розроблена система спектроскопії електрохімічного імпедансу апробована для задач досліджень характеру зміни індивідуальних профілів імпедансних характеристик сенсорних елементів в процесі адсорбції молекул різних типів водневмісних газів. На основі отриманих експериментальних даних запропоновано метод побудови математичної моделі перетворювальних характеристик кожного сенсорного елемента. Метод базується на реєстрації в реальному масштабі часу імпедансних відкликів сенсорів на зовнішній вплив та ітераційному алгоритмі поліноміальної апроксимації масиву отриманих даних. Розроблено програмне забезпечення для 3D-візуалізації результатів вимірювання. Пропоновані підходи та отримані результати демонструють принципову можливість ідентифікації типів газів та обчислення їх концентрацій, і можуть бути основою побудови систем експресного детектування молекул CO, CO₂, H₂S, диму, спиртів, пропану та інших вуглеводнів в досліджуваних газових середовищах, а також для екологічного та медико-біологічного моніторингу.

Ключові слова: поруватий кремній, сенсор газу, спектроскопія електрохімічного імпедансу, Фур'є аналіз, апроксимація .

Вступ.

Прикладні аспекти застосування поруватого кремнію (ПР) в сенсоріці актуалізують ряд задач з розробки оптимальних методів реєстрації інформаційних сигналів, проектування електричних схем включення сенсорних елементів, розробки алгоритмів аналізу та опрацювання сигналів, калібрування, повірки [1-3]. Одним з перспективних напрямків реєстрації сенсорної інформативності елементів та матриць на основі поруватого кремнію розглядається метод електроімпедансної спектроскопії [4,5,14].

Поруватий кремній характеризується високою адсорбційною активністю поверхні та впливом адсорбованих полярних молекул досліджуваного газового середовища на механізм переносу носіїв зарядів. В структурі поверхні ПР існують локальні мікрополя, що приводять до флуктуації енергетичних зон і локалізації зарядів. Дія

мікрополів адсорбованих полярних молекул суттєво змінює значення дрейфової рухливості носіїв заряду та дисперсійних параметрів, що приводить до зміни електрофізичних властивостей нанопоруватої поверхні сенсора [6-8]. Метод імпедансної спектроскопії виявився найефективнішим методом реєстрації зміни інформаційних сигналів експериментальних зразків сенсорних елементів за умов впливу реєстрованих молекул газу {1,2,14}.

Одночасно практична реалізація даного методу породжує задачу створення достатньо складної вимірювально-обчислювальної системи та розробки методів аналізу та інтерпретації результатів вимірювань. В роботі розглядаються принципи побудови вимірювального тракту частотного аналізатора електричного імпедансу на базі сучасної елементної бази мікроелектроніки та інформаційних технологій. Використання сучасної елементної бази електроніки та інтелектуальних алгоритмів керування інформаційно-вимірювальними системами дозволяє на якісно вищому рівні реалізовувати традиційні методи вимірювань і створювати системи нового типу, принципи функціонування яких кардинально відрізняються від попередніх ідеологій побудови вимірювальних систем.

Програмно-апаратна реалізація та функціонування пристрою.

Розроблений пристрій представляє собою прецизійний перетворювач "імпеданс-код", який забезпечує програмно-керований цифровий синтез зондуючих ортогональних гармонічних сигналів у широкому діапазоні частот та вимірювання в реальному масштабі часу фазо-квадратурних складових з використанням дискретного перетворення Фур'є. Пристрій реалізований на основі мікросхеми спеціалізованого інтегрального перетворювача спектрального складу імпедансу типу AD5933A (Analog Devices). Даний виріб представляє собою функціонально завершену цифро-аналогову систему, виконану по технології "система на кристалі", яка містить програмно-керовані електронні вузли, що взаємодіють по комунікаційному інтерфейсу типу I²C із зовнішньою управляючою системою для організації вимірювального процесу. Внутрішні електричні зв'язки між інтегрованими структурними електронними вузлами некомутовані, і схемотехнічно реалізують високоефективну систему імпедансної спектроскопії на основі дискретного Фур'є-аналізу реального масштабу часу [10,12,16]. Даний тип інтегральної мікросхеми дозволяє створювати портативні аналізатори імпедансу з діапазоном вимірювання 100 Ом – 20 Мом в діапазоні частот 100 Гц – 100 кГц [9].

Функціональна блок-схема перетворювача імпедансу представлена на рис.1.

Гармонічний сигнал напруги зондування досліджуваних об'єктів із необхідною мінімальною і максимальною частотою спектру і кроком квантування формується внутрішнім синтезатором ортогональних сигналів методом прямого цифрового синтезу (DDS). Тактова частота на вході DDS формується внутрішнім опорним генератором. 27-розрядний фазовий акумулятор дозволяє синтезувати сигнали \sin і \cos з роздільною здатністю по частоті менше 0,1 Гц в робочому інтервалі частот.

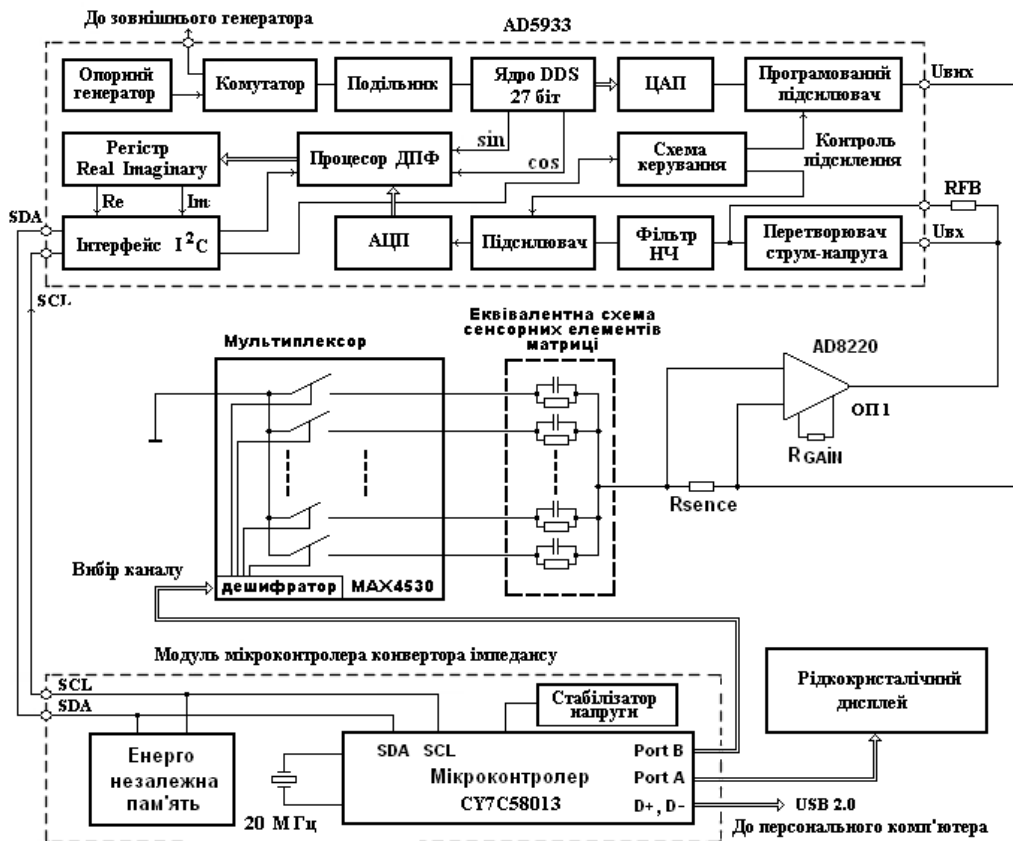


Рис.1 Функціональна блок-схема системи вимірювання.

Під дією зондувочної гармонічної напруги через елементи сенсорної ланки (R_{sense} , RC-еквівалент сенсорного елемента) тече струм $I = U_{\text{вх}} / Z$. Даний струм несе інформацію про вимірювані імпедансні властивості, але для подальшого аналізу і обробки необхідне перетворення його в напругу. Перетворювач "струм-напруга" реалізований на основі інтегрованого операційного підсилювача. Аналоговий сигнал відклику подається на вхід 12-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з частотою перетворення 1 МГц. Отриманий 12-розрядний цифровий код з допомогою інтегрованого в ІМС AD5933A апаратного Фур'є-процесора піддається дискретному Фур'є-аналізу (ДПФ). В результаті отримується дійсна R і уявна I частини імпедансу для даної частоти. На основі цих даних можна визначити амплітуду і фазу імпедансу для будь-якої частоти в межах розгортки, яку забезпечує генератор.

Фур'є-процесор реалізує одночастотний алгоритм ДПФ, який описується виразом:

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) \cdot (\cos(2\pi fn / N) - j \sin(2\pi fn / N))), \quad (1)$$

де $X(f)$ - спектральна густина досліджуваного сигналу на частоті зондувального сигналу, $x(n)$ - часові відліки сигналу АЦП, $\cos\left(\frac{2\pi fn}{N}\right)$ та $\sin\left(\frac{2\pi fn}{N}\right)$ представляють вектори ортогональних сигналів, які генеруються цифровим синтезатором ядра DDS на частоті f , n і N – відповідно номер відліку сигналу та кількість відліків у блоці ($N=1024$) [10,15].

Для кожного значення частоти f процесор ДПФ виконує перемноження і додавання 1024 дискретних відліків АЦП. Результати зберігаються у двох 16-розрядних регістрах (Регістр Real та Imaginary), що представляють дійсну R та уявну I частину результату перетворення.

Модуль імпедансу та його фаза знаходиться по відомих формулах:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + I^2}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{I}{R}\right). \quad (2)$$

Розроблено модуль мікроконтролера (CY7C58013, Cypress Semiconductor corp.), який забезпечує програмне керування модулем конвертора імпедансу на базі AD5933A. Модуль мікроконтролера здійснює програмне ініціювання робочих регістрів ІМС AD5933A, керування синтезатором частоти для задання початкової і кінцевої частот спектру і кроку квантування, читання вихідних регістрів конвертора імпедансу і передачу даних на систему візуалізації і комп'ютерного аналізу.

Матриця сенсорних елементів на основі поруватого кремнію може містити до 8 первинних перетворювачів, кожен з яких в силу відмінних технологічних процесів виготовлення характеризується відмінним профілем характеристики перетворення. Мультиплексор (MAX4630, Maxim corp.) забезпечує почергове програмно-кероване підключення елементів лінійки сенсорів до системи реєстрації, в якій реалізована електрична схема вимірювання із заземленим імпедансним елементом [11]. Такий метод підключення дозволяє розглядати фрагмент електричної схеми вимірювання імпедансу (поєдновано включені $R_{sense} = \text{const}$ та RC -еквівалент сенсорного елемента) як інтегруючу ланку першого порядку, або фільтр низької частоти (ФНЧ). Пропонований підхід дає можливість застосовувати для аналізу отриманих результатів добре розвинуті в теорії радіотехнічних кіл методи математичного аналізу сигналів.

Аналіз та інтерпретація результатів вимірювання.

Розроблена система спектроскопії електрохімічного імпедансу апробована для задач досліджень характеру зміни індивідуальних профілів імпедансних характеристик сенсорних елементів в процесі адсорбції молекул різних типів водневмісних газів. Використано сенсорні елементи на основі поруватого кремнію, виготовлених по технології анодизації кремнію в електроліті на основі плавикової кислоти [8]. Для досліджень модифіковано експериментальну вимірювальну установку параметризації сенсорних структур на основі поруватого кремнію [2].

В процесі досліджень встановлено, що для вибраної схеми включення сенсорних елементів та номінального значення опору елемента сенсорної ланки $R_{sense} = 150$ кОм, оптимальний частотний діапазон вимірювання імпедансу лежить в межах 100 Гц – 10 кГц. Це добре ілюструється розробленою програмою графічної візуалізації, яка в режимі реального масштабу часу дозволяє представляти зміни амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) сенсорних елементів в процесі адсорбції наноструктуровану поверхню ПР молекул реєстрованого газу (див. рис.2).

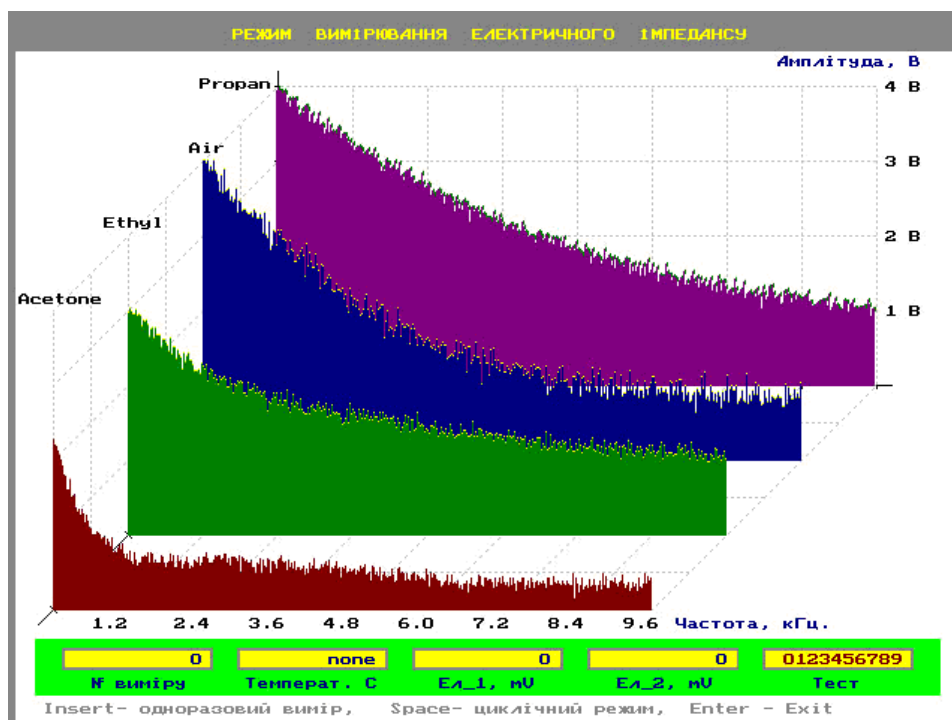


Рис.2 Графічна візуалізація характеру зміни амплітудно-частотних характеристик сенсорних елементів для різних типів реєстрованих газів.

Отримані експериментальні дані підтверджують існування функціональних залежностей імпедансних спектрів та індивідуальних парціальних чутливостей сенсорів до окремих компонент газу. Ці залежності, по суті, є аналогами перетворювальних характеристик сенсорів газу. Аналіз характеру зміни модуля комплексного коефіцієнта передачі кожного сенсора дозволяє ідентифікувати і чисельно описати процеси адсорбції різних типів газів, оскільки вони характеризуються індивідуальними частотними відкликами. На етапі тестування і для попереднього оцінювання результатів вимірювань зручно використовувати візуальні методи аналізу графічного представлення даних. Безпосереднє спостереження еволюції графічних залежностей дозволяє неперервно в процесі експерименту аналізувати і порівнювати на якісному рівні імпедансні спектри. На рис.3, рис.4 показано типові графічні представлення амплітудно-частотних характеристик сенсорів в процесі реєстрації випарів пропану, етилену, ацетону.

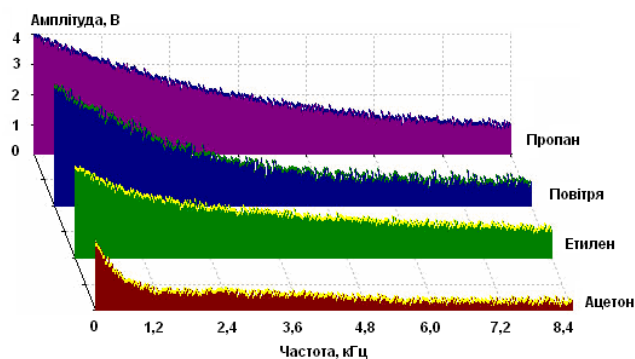


Рис.3 Характерні тенденції зміни модуля імпедансу сенсорів для різних типів реєстрованих газів.

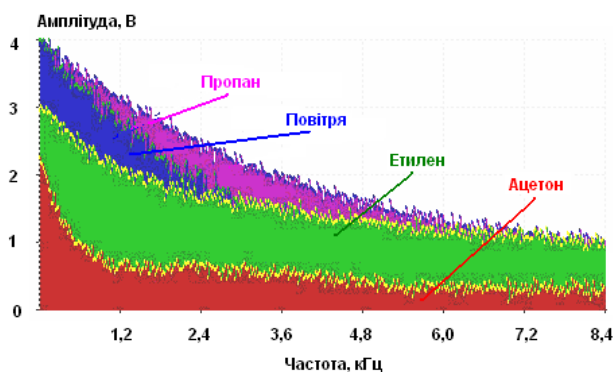


Рис.4. Порівняльний графічний аналіз трендів зміни імпедансних характеристик сенсорів при реєстрації випарів пропану, етилену та ацетону.

Графічна візуалізація результатів вимірювань дозволяє зробити висновок, що для кожного типу реєстрованого газу (пропан, етилен, ацетон) існує індивідуальний профіль зміни імпедансного спектру сенсора відносно базової калібрувальної характеристики. Базова калібрувальна характеристика отримується методом реєстрації імпедансного спектру сенсора, поміщеного в газову камеру наповнену чистим повітрям. На основі методів аналізу зображень по типових індивідуальних трендах імпедансних характеристик можуть бути ідентифіковані типи реєстрованих газів та їх концентрації.

Метод модельного представлення результатів вимірювання

Розроблено метод модельного представлення результатів вимірювання, який дозволяє в компактній формі описувати імпедансні характеристики кожного сенсорного елемента та обробляти отримані модельні представлення аналітично. Метод базується на апроксимації первинного масиву експериментальних даних функціями степеневих поліномів. Коефіцієнти апроксимації для кожної імпедансної характеристики визначаються на основі ітераційного методу найменших квадратів та оптимізаційної

задачі мінімізації похибки апроксимації. На перших ітераціях аналізується можливість отримання необхідної точності при нижчих порядках полінома, з наступним збільшенням порядку при необхідності. З точки зору реалізації на базі мікропроцесорної системи та забезпечення необхідної точності апроксимації найкращим умовам задовольняють функції степеневих поліномів 3-5 порядку.

Особливістю методу є ітераційне застосування єдиної програмної процедури для побудови системи одномірних апроксимаційних функцій на основі скануючого алгоритму вибору регулярної сітки вузлів апроксимації.

Алгоритм побудови аналітичного представлення коефіцієнта передачі кожного сенсорного елемента полягає в знаходженні коефіцієнтів апроксимуючого поліному у вигляді функції:

$$K(F) = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot F^i, \quad (3)$$

де F – частота, i – порядок поліному, a_i – шукані коефіцієнти поліному.

В межах робочого частотного діапазону з рівномірним кроком вибираються чотири вузли інтерполяції для значень частот F_0, F_1, F_2, F_3 . Записуючи значення поліному у вибраних вузлах інтерполяції, програмно генерується відповідна система лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} K_0(F) &= a_0 + a_1 \cdot F_0 + a_2 \cdot F_0^2 + a_3 \cdot F_0^3, \\ K_1(F) &= a_0 + a_1 \cdot F_1 + a_2 \cdot F_1^2 + a_3 \cdot F_1^3, \\ K_2(F) &= a_0 + a_1 \cdot F_2 + a_2 \cdot F_2^2 + a_3 \cdot F_2^3, \\ K_3(F) &= a_0 + a_1 \cdot F_3 + a_2 \cdot F_3^2 + a_3 \cdot F_3^3. \end{aligned} \quad (4)$$

Векторно-матрична форма система рівнянь має вигляд:

$$\begin{bmatrix} K_0(F) \\ K_1(F) \\ K_2(F) \\ K_3(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & F_0 & F_0^2 & F_0^3 \\ 1 & F_1 & F_1^2 & F_1^3 \\ 1 & F_2 & F_2^2 & F_2^3 \\ 1 & F_3 & F_3^2 & F_3^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, \quad \text{або } \mathbf{K}(F) = \mathbf{W}(F) \cdot \mathbf{a}, \quad (5)$$

де K_0, K_3 - коефіцієнти передачі у вибраних вузлах інтерполяції для частот F_0, \dots, F_3 . Значення коефіцієнтів отримуються з масиву первинних вимірювальних даних.

$\mathbf{K}(F) = [K_i(F)]$ - вектор вільних членів, побудований з експериментальних значень функції, $\mathbf{W}(F) = [F_i^i]$ - матриця Вандермонда, побудована з експериментальних значень аргументу F ; $\mathbf{a} = [a_i]$ - вектор невідомих, (вектор коефіцієнтів поліному, що визначається). Шукані коефіцієнти інтерполюючого поліному визначаються методом розв'язання системи рівнянь:

$$\mathbf{a} = \mathbf{W}^{-1}(F) \cdot \mathbf{K}(F). \quad (6)$$

Підставляючи коефіцієнти в шуканий поліном (3) чи у систему рівнянь (4), отримуємо інтерполяційні значення дискретно заданої функції.

Перевірка точності здійснюється шляхом поелементного порівняння реального відліку сигналу та його аналога, отриманого аналітичним методом. В кінці кожного апроксимаційного циклу формується константа максимальної похибки апроксимації для даного масиву.

Ідентифікація реєстрованих процесів виконується методом співставлення індивідуальних базових калібрувальних характеристик та характеристик експериментально отриманих в процесі вимірювання.

Моделні представлення індивідуальних характеристик кожного сенсорного елемента матриці зберігаються в оновлювальній базі даних і можуть уточнюватись процедурами калібровки та на основі результатів вимірів.

Висновки.

На базі спеціалізованої мікросхеми з інтегрованими вузлами DDS-генератора та процесора ДПФ реалізовано портативну систему спектроскопії електрохімічного імпедансу. Апробація системи для дослідження параметрів нового типу газових сенсорів на основі поруватого кремнію підтверджує високу інформативність імпедансного аналізу при вирішенні даної прикладної задачі. Встановлено функціональні залежності імпедансних спектрів та індивідуальних парціальних чутливостей сенсорів до окремих компонент газу. Ці залежності, по суті, є аналогами перетворювальних характеристик сенсорів газу. Запропоновані методи модельних представлень характеристик можуть бути використані як базові елементи побудови реальних прототипів сенсорних систем на основі ПП для аналізу компонентного складу газів в досліджуваних газових середовищах, а також для екологічного та медико-біологічного моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Galeazzo E.* Gas sensitive porous silicon devices: responses to organic vapors / E. Galeazzo et al. // *Sensors and Actuators B* 93 –2003. – P. 384–390.
2. *Монастирський Л.* Багатоелементні сенсорні системи на основі поруватого кремнію / Л. Монастирський, Р. Яремик, І. Оленич, П. Парандій // *Вісник Львівського ун – ту, Серія фізична.* – 2011. Випуск 46. – С. 189-195.
3. *Ibraimov M. K.* Selective Gas Sensor Using Porous Silicon / M. K. Ibraimov et al. // *Sensor Letters.* – 2016. – Vol.14. – P. 1–4.
4. *Saha H.* Porous Silicon Sensors- Elusive and Erudite / H. Saha // *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems.* – 2008. – Vol. 1, No.1. – P.34-56
5. *Barsoukov E.* Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Application. Second Edition./ Edited by E. Barsoukov, J.Ross Macdonald // *Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc.:* N.Y. – 2005. – P.10-75, 129-167, 264-275, 469-472.
6. *Seals L.* Rapid, reversible, sensitive porous silicon gas sensor / L Seals, J Gole, Laam Tse, P Hesketh // *Journal of Applied Physics,* 91-4. – 2002. – P.2519-2523.
7. *Baratto C.* Gas Detection with a porous silicon based sensors / C. Baratto et al. // *Sensors and Actuators.* – 2000. – Vol. 65. – P. 257-259.

8. *Parandiy P.* Investigation of porous silicon photoconductive structures / P. Parandiy, L. Monastyrskii // *Electronics and information technologies*. – 2018. – Issue 10. – P. 133–141.
9. AD 5933. 1 MSPS, 12 bit Impedance Converter, Data Sheet Analog Devices, Inc, 2017, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD5933.pdf
10. High Accuracy Impedance Measurements Using 12-Bit Impedance Converters, Circuit Note CN-0217, Analog Devices, Inc, 2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analog.com/CN0217>
11. Measuring a Grounded Impedance Profile Using the AD5933, by Sean Brennan. Application Note AN-847 Analog Devices, Inc, home page <http://www.analog.com>
12. *Стадник Б.* Розроблення та аналіз варіантів апаратної реалізації портативних частотних аналізаторів імпедансу / Б. Стадник, В. Хома // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2015. – № 76. – С.43–48
13. *Marczynski P.* Pattern Recognition Applied to Analysis of Gas Sensors' Array Data / P. Marczynski et al. // *Acta Physica Polonica A*, – 2012. – Vol. 122, No. 5. – P.849–847
14. *Монастирський Л.С.* Розпізнавання газів на основі мікрокомп'ютерного аналізу даних сенсорів поруватого кремнію / Л.С. Монастирський, О.І. Петришин, Б.П. Коман, Р.Я. Яремик // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. – 2016. – Т.13, №3. – С. 74–79.
15. *Matsiev L.* Improving Performance and Versatility of Systems Based on Single-Frequency DFT Detectors Such as AD5933 / L. Matsiev // *Electronics*. – 2015. – vol. 4, – P. 1-34
16. *Chabowski L.* Simple wide frequency range impedance meter based on AD5933 integrated circuit / Chabowski L. et al. // *Metrol. Meas. Syst.* – 2015. – Vol. XXII, No.1. – P. 13–24.

ELECTRICAL IMPEDANCE ANALYZER OF SENSOR CONVERTERS BASED ON POROUS SILICON

P. Parandiy, R. Yaremyk

*Ivan Franko National University of Lviv,
50, Dragomanov St., UA-79005 Lviv, Ukraine
petro.parandiy@lnu.edu.ua*

A portable measuring and computing system for information signals processing of a multi-element sensor matrix based on porous silicon the IC5933A (Analog Devices) specialized impedance spectral converter integrated circuit was realized. This system of electrochemical impedance spectroscopy has been tested for character change of individual profiles problems of sensory elements impedance characteristics in the process of adsorption of different types water-containing gases molecules. During the investigation it was fixed that the selected scheme including of sensor elements and the nominal value of the resistance element sensor units $R_{senc} = 150 \text{ K}\Omega$, the optimal frequency range of impedance measurement is in the range of 100 Hz - 10 kHz. Experimental data confirm the existence of functional dependence impedance spectra and partial sensitivities of individual sensors to individual gas component. These dependences are

essentially analog converter characteristic gas sensors. The analysis of the nature of the change of the complex transfer coefficient module of each sensor allows to identify and numerically describe the adsorption processes of different types of gases, since they are characterized by individual frequency responses. On the set of the obtained experimental data, a method of constructing a mathematical model of the transformative characteristics of each sensory element is proposed. The method is realized on the real-time registration of the sensor impedance responses to the external influence and an iterative algorithm of polynomial approximation of the obtained data array. Software for 3D visualization of measurement results is developed. Accuracy is done by comparing the real-element reference signal and its counterpart in the analytical method. At the end of each approximation cycle, a constant of the maximum approximation error for the given array is formed. The proposed approaches and the results obtained demonstrate the fundamental ability to identify the types of gases and calculate their concentrations, and can be the basis for the construction of systems for the express detection of molecules of CO, CO₂, H₂S, smoke, alcohols, propane and other hydrocarbons in the studied gas environments, as well as for environmental and biomedical monitoring.

Keywords: porous silicon, gas sensor, electrochemical impedance spectroscopy, Fourier analysis, approximation.

*Стаття: надійшла до редакції 25.10.2019,
доопрацьована 29.10.2019,
прийнята до друку 29.10.2019.*