

СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

УДК 621.317

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.020>

БАЗОВИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИСОКОТОЧНИХ ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПЕДАНСУ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

В.Г. Мельник*, докт. техн. наук, **П.І. Борщов****, канд. техн. наук, **В.К. Беляєв*****,
О.Д. Василенко****, канд. техн. наук, **О.Л. Ламеко*******, **О.В. Сліцький**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: melnik@ied.org.ua

У роботі розглядаються принципово нові технічні рішення з формування тестових і опорних сигналів, а також з обробки вимірювальних сигналів у імпедансометричному каналі, які дають змогу збільшити ефективність отримання корисної інформації про стан об'єкта вимірювання в широкому діапазоні частот. Представлено новий метод паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворення вимірювального сигналу з його модуляцією і безперервним синхронізованим інтегруванням, який дає змогу збільшити кількість одержуваної за малий час інформації, у тому числі з рухомих об'єктів, підвищити придушення шумів і завад від силової мережі. Для підвищення точності вимірювань в широкому діапазоні частот розроблено нові структури вимірювачів параметрів імпедансу, зокрема мостових схем зі зрівноваженням за фазовим кутом і модулем вимірювального сигналу. Запропонований комплекс технічних рішень дав змогу розробити та реалізувати експериментальні зразки базового модуля вимірювального каналу для визначення параметрів імпедансу з гнучкими функціями, який за технічними та економічними характеристиками є конкурентоспроможним відносно кращих зразків аналогічної апаратури провідних світових виробників. Наведено результати експериментальних досліджень основних характеристик створених приладів. Бібл. 6.

Ключові слова: імпеданс, вимірювання, фазовий кут, спектральна імпедансометрія.

Визначення параметрів комплексних опорів (імпедансу і адмітансу) становить велику область вимірювань фізичних величин як електричного, так і неелектричного (за допомогою сенсорів) характеру. Такі вимірювання є найважливішою ланкою технічного контролю, широко використовуються в біомедичній сфері та для наукових досліджень, зокрема методом спектральної імпедансометрії [1 – 3]. Існуюча апаратура широкого застосування, що може використовуватись з цією метою, у більшості випадків має обмежені можливості з точності, чутливості та розрізнявальної здатності. Її робочі частоти обмежено звуковим діапазоном. Це відповідно звужує інформативність одержуваних даних. Прилади з більш досконалими метрологічними характеристиками є функціонально універсальними, складними і дорогими (\$10000 і вище). Вони можуть застосовуватись тільки для лабораторних вимірювань в обмеженому обсязі.

Метою представленої роботи є створення уніфікованих базових апаратно-програмних вимірювальних засобів з гнучкими функціями, серійно-придатних і недорогих, які забезпечують реалізацію на їх основі приладів і систем різного призначення з метрологічними характеристиками, що відповідають вищому світовому рівню в галузі імпедансних вимірювань. Такі засоби дають змогу швидко розробляти та впроваджувати нові прилади і інформаційно-вимірювальні системи для вирішення багатьох актуальних завдань: контролю якості матеріалів і харчових продуктів, стану технічного обладнання і навколишнього середовища, розвитку біомедичних технологій. У роботі розглядаються принципово нові технічні рішення з формування тестових і опорних сигналів, а також з

обробки вимірювальних сигналів в імпедансометричному каналі, які дають змогу збільшити ефективність отримання корисної інформації про стан об'єкта вимірювання в широкому діапазоні частот.

Основною проблемою для розширення частотного діапазону таких пристроїв є зростання амплітудних і фазових похибок при формуванні двох зразкових сигналів: тестового, який подається на об'єкт вимірювання і опорного, з яким порівнюють сигнал відгуку об'єкта на тестовий вплив (вимірювальний сигнал). Ця проблема отримала перспективне рішення завдяки розробці цифрового генератора квазисинусоїдальної напруги (32 сходинки на період) і двох опорних напруг (синфазної і квадратурної відносно тестової) зі структурою, яка забезпечує дуже малу величину і достатню рівність затримок у часі при формуванні зазначених напруг із високочастотної тактової послідовності. Опорними сигналами для цифрового генератора є високостабільні постійна напруга та тактова частота від кварцового генератора. Розроблено прецизійну міру регульованого фазового зсуву з використанням двох таких генераторів і спеціальної схеми їх взаємної синхронізації зі зсувом вихідних сигналів на певне число тактових інтервалів. Експериментально визначено, що похибка синхронності формування цих сигналів складає не більше кількох наносекунд у діапазоні від інфранизьких частот до 1МГц, а приведена похибка відтворення модулів сигналів не перевищує 0,1%. Показано, що запропоновані технічні рішення дають змогу реалізовувати прості та економічні канали вимірювання параметрів імпедансу з малими фазовими похибками.

Друга проблема для досягнення високих метрологічних характеристик у широкому діапазоні частот полягає в необхідності підвищення точності, чутливості і дискретності перетворення вимірювального сигналу. У галузі сенсорних систем як технологічного, так і біомедичного призначення ця проблема загострюється необхідністю забезпечення стійкості до впливу шумових і індустриальних завад, а також до впливу різноманітних неінформативних факторів за низького енергетичного рівня тестового сигналу на об'єкті вимірювання. Традиційні шляхи вирішення цих питань ведуть до зниження швидкості вимірювань, ускладнення апаратури, зниження її технологічності і підвищення вартості.

Оптимальне задоволення зазначених вище вимог досягається застосуванням нових методів паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворення вимірювального сигналу з його модуляцією і безперервним синхронізованим інтегруванням [4, 5]. Його суть полягає у гнучкому поєднанні аналогового і цифрового накопичування (інтегрування) вимірювального сигналу, які виконуються при синхронізації відліків сигналу зі зміною стану об'єкту та зовнішніми завадами. Це забезпечує максимальне використання інформації з об'єкта контролю і досягнення оптимальної сукупності основних метрологічних характеристик приладів (дискретності, точності, швидкодії, завадостійкості, рівня тестового сигналу). Запропоновані рішення дали змогу збільшити кількість інформації, одержуваної з рухомих об'єктів [6], підвищити придушення шумів і завад від силової мережі при високій швидкості вимірювань. Це має велике значення для вирішення проблем моніторингу та діагностики, особливо при великій кількості сенсорів. Вимірювальні канали з високою дискретністю аналого-цифрового перетворення мають кілька контурів порівняння вимірюваних та зразкових сигналів, що може викликати деяку диференційну нелінійність їх функції перетворення. Застосування модуляції сигналів при їх інтегруванні забезпечило практично повне усунення такої нелінійності.

Крім удосконалення формування зразкових сигналів і аналого-цифрового перетворення, для розширення діапазонів та підвищення точності вимірювань у широкому діапазоні частот розроблено нові структури вимірювачів параметрів імпедансу, зокрема мостових схем зі зрівноваженням за фазовим кутом і модулем вимірювального сигналу. Запропонований комплекс технічних рішень дав змогу розробити та реалізувати у вигляді експериментальних зразків базовий вимірювальний канал для визначення параметрів імпедансу з гнучкими функціями, який за технічними та економічними характеристиками є конкурентоспроможним з кращими зразками аналогічної апаратури провідних світових виробників.

Програмне забезпечення базового апаратно-програмного комплексу включає програмні модулі нижнього та верхнього рівнів. Програма нижнього рівня забезпечує виконання основних функцій базового вимірювального модуля та можливість керування його ресурсами з верхнього рівня вимірювальної системи (з персонального комп'ютера). Безперервне синхронізоване інтегрування вимірювального сигналу з використанням трьох АЦП багатократного інтегрування цілком забезпечується засобами мікроконтролера без використання дискретних електронних елементів. Мікроконтролер формує тактові імпульси, необхідні для роботи АЦП. Значення частоти цих імпульсів може бути встановлено як оператором приладу з клавіатури, так і за командою з комп'ютера. Одночасно ці імпульси подаються на вхід внутрішнього таймера мікроконтролера, при цьому тривалість циклу роботи таймера дорівнює тривалості циклу роботи одного АЦП. За цикл роботи таймера відбувається три переривання, момент кожного відповідає закінченню перетворення одним з АЦП. Мікроконтролер зчитує результат перетворення цього АЦП і виконує запуск його для виконання наступного перетворення. Таким чином, АЦП виконують інтегрування вимірювального сигналу зі зміщенням на третину циклу перетворення, а оскільки інтегрування вхідного сигналу також триває третину циклу, то інтегрування вхідного сигналу трьома АЦП не переривається.

Створений базовий вимірювальний канал призначений для визначення будь-яких параметрів імпедансу в діапазоні частот 0 – 1 МГц при рівнях тестових сигналів не більше 0,5 В, що забезпечує 20-розрядну дискретність і розрізнявальну здатність вимірювань, чутливість – 0,5 мкВ (на вході АЦП), швидкодію до 300 відліків за секунду. При швидкості вимірювань до 50 відліків за секунду забезпечується придушення завад промислової частоти до 300 разів. Первинними еталонами базового каналу є прецизійне джерело постійної напруги 2,5 В, що використовується в блоці АЦП та кварцовий тактовий генератор мікроконтролера з частотою 32 МГц. За результатами метрологічних досліджень наскрізного каналу перетворення, що включає генератор тестового сигналу, синхронний детектор та блок аналого-цифрового перетворення інформативного сигналу, показано, що диференційна нелінійність функції перетворення на частоті 1 кГц має значення на рівні 0,001 %. Приведена похибка за квадратурною складовою інформативного сигналу (похибка визначення тангенса фазового кута) на цій частоті не перевищує 0,001 %, а на частоті 1 МГц вона має значення до 0,03 % при сигналах до 0,25 В і зростає до 0,2 % при зростанні тестових сигналів до 0,5 В. Дослідження тракту формування сигналу зрівноваження мостового кола за модулем вимірювального сигналу, яке здійснювалось регулюванням постійної опорної напруги цифрового генератора цифро-аналоговим перетворювачем, що є у складі базового модуля, показали, що приведена похибка цього формування в усьому діапазоні робочих частот може не перевищувати кількох сотих часток відсотка. Указані метрологічні характеристики отримані без будь-яких корекцій похибок і можуть бути додатково поліпшені відомими структурними та алгоритмічними методами.

Робота виконувалась за фінансової підтримки Цільової програми наукових досліджень НАН України "Розумні" сенсорні прилади нового покоління на основі сучасних матеріалів та технологій" на 2018 - 2022 р.р." при виконанні тем "Електрохімія" (№ ДР 0120U002200), "Кондуктометрія" (№ ДР 0120U002199) та Держбюджетної теми "Аналізатор" (№ ДР 0117U002582). КПКВК 6541030.

1. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications. John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, New Jersey. 2005. 596 p.
2. Grossi M., Riccò B. Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review, J. Sens. Sens. Syst., 2017. 6. Pp.303–325. URL: <https://www.j-sens-sens-syst.net/6/303/2017/> (Accessed: 13.02.2020).
3. Лепіх Я.І., Гордієнко Ю.О., Дзядевич С.В., Дружинін А.О., Євтух А.А Лесков С.В., Мельник В.Г., Романов В.О., Проценко В.О. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління: монографія. Одеса: Астропринт, 2011. 353 с.
4. Мельник В. Г., Борщев П. И., Василенко А. Д., Слицкий А. В. Оптимизация структуры и алгоритма работы высокочувствительной мультисенсорной системы с импедансными преобразователями. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2018. Т.15, № 4. С.100–109. URL: <http://semst.onu.edu.ua/article/view/150520/152029> (дата звернення: 13.02.2020).
5. Мельник В.Г. , Слицкий А.В. Повышение линейности высокочувствительных импедансометрических сенсорных систем. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2016. Т. 13, № 3. С. 80–90. URL:

<http://semst.onu.edu.ua/article/viewFile/78648/89418> (дата звернення: 13.02.2020).

6. Мельник В. Г., Борщев П. И., Василенко А. Д., Слицкий А. В. Повышение производительности измерительных систем с емкостными сенсорами. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 2. С. 82–87.

УДК 621.317

БАЗОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПЕДАНСА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В.Г. Мельник, докт. техн. наук, П.И. Борщев, канд. техн. наук, В.К. Беляев, А.Д. Василенко, канд. техн. наук, А.Л. Ламеко, А.В. Слицкий

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: melnik@ied.org.ua

В работе рассматриваются принципиально новые технические решения по формированию тестовых и опорных сигналов, а также по обработке измерительных сигналов в импедансометрическом канале, которые позволяют повысить эффективность получения полезной информации о состоянии объекта измерения в широком диапазоне частот. Представлен новый метод параллельно-последовательного аналого-цифрового преобразования измерительного сигнала с его модуляцией и непрерывным синхронизированным интегрированием, который позволяет увеличить количество получаемой за малое время информации, в том числе с подвижных объектов, повысить подавление шумов и помех от силовой сети. Для повышения точности измерений в широком диапазоне частот разработаны новые структуры измерителей параметров импеданса, в частности мостовая схема с уравниванием по фазовому углу и модулю измерительного сигнала. Предложенный комплекс технических решений позволил разработать и реализовать экспериментальные образцы базового модуля измерительного канала для определения параметров импеданса с гибкими функциями, который по техническим и экономическим характеристикам является конкурентоспособным с лучшими образцами аналогичной аппаратуры ведущих мировых производителей. Приведены результаты экспериментальных исследований основных характеристик созданных приборов. Библи.б.

Ключевые слова: импеданс, измерения, фазовый угол, спектральная импедансометрия.

BASIC MEASURING MODULE FOR IMPLEMENTATION OF THE HIGH-PRECISION DEVICES FOR DETERMINING THE IMPEDANCE PARAMETERS IN A WIDE FREQUENCY RANGE

V.G. Melnyk, P.I. Borschov, V. K. Beliaev., O.D. Vasylenko, O.L. Lameko O.V. Slitskiy

Institute of electrodynamic National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: melnik@ied.org.ua

In the paper fundamentally new technical solutions for the formation of test and reference signals are discussed, as well as for the processing of measuring signals in the impedance measurement channel, which can improve the efficiency of extracting useful information about the state of the measurement object in the wide frequency range. A new method of parallel-serial analog-to-digital conversion of the measuring signal with its modulation and continuous synchronized integration is presented, which allows to increase the amount of information received in a short time, including from moving objects, to increase the suppression of noise and interference from the power network. To increase the accuracy of measurements in a wide frequency range, new structures of impedance parameter meters have been developed, in particular a bridge circuit with balancing over the phase angle and the measuring signal module. The proposed set of technical solutions allowed us to develop and implement experimental samples of the basic module of the measuring channel to determine the impedance parameters with flexible functions, which is competitive in technical and economic characteristics with the best samples of similar equipment from leading world manufacturers. The results of experimental studies of the main characteristics of the created devices are presented. References 6.

Key words: impedance, measurements, phase angle, spectral impedancemetry.

1. Barsoukov Evgenij, Macdonald Ross. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Application. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey. 2005. 596 p.
2. Grossi M. and Riccò B.: Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review, *J. Sens. Sens. Syst.*, 2017. No 6. Pp.303–325. URL: <https://www.j-sens-sens-syst.net/6/303/2017/> (Accessed: 13.02.2020).
3. Lyepikh Ya.I., Hordiyenko Yu.O., Dzyadevych S.V., Druzhynyn A.O., Yevtukh A.A., Lyenkov S.V., Mel'nyk V.H., Romanov V.O., Protsenko V.O. Intellectual measurement systems based on the new generation of microelectronic sensors: monograph. Odesa: Astroprynt, 2011. 353p. (Ukr.)
4. Melnik V. G., Borshchev P. I., Vasilenko A. D., Slitskiy A. V. Optimization of the structure and algorithm of the work of the highly sensitive multisensors system with impedance transducers. *Sensorna elektronika i mikrosystemni texnologiji*. 2018. V. 15. No 4. Pp.100–109. (Rus). URL: http://liber.onu.edu.ua/pdf/semst_4_2018.pdf, (Accessed 13.02.2020).
5. Melnyk V. G., Slitskiy A. V. Increasing of linearity of the highly sensitive impedance-measuring systems with sensors - *Sensorna elektronika i mikrosystemni texnologiji*. 2016. V. 13. No 3. Pp.80–90. URL: <http://semst.onu.edu.ua/article/viewFile/78648/89418> (Accessed: 13.02.2020) (Rus.)
6. Melnik V. G, Borschov P. I., Vasylenko A. D., Slitskiy A. V. Increasing of the performance of measuring systems with capacitive sensors *Technichna Electrodynamica*. 2019. No 2. Pp.82–87. (Rus).

Надійшла: 28.02.2020

Received: 28.02.2020