

**ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ІМПЕДАНСОМЕТРИЧНИХ КАНАЛІВ
ДЛЯ РОБОТИ НА НИЗЬКИХ ТА ІНФРАНИЗЬКИХ ЧАСТОТАХ**

П.І. Борщов*, канд. техн. наук, **І.О. Брагинець**** , канд. техн. наук, **Ю.О. Масюренко***** , канд. техн. наук, **В.Г. Мельник****** , докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: masjuriv@ied.org.ua.

Визначено особливості низького та інфранизького частотних діапазонів гармонічних вимірювальних сигналів, а також властивості досліджуваних об'єктів, які необхідно враховувати під час побудови імпедансометричних каналів. Для поєднання необхідних метрологічних характеристик таких каналів (точність, швидкодія, завадостійкість) використовується підхід, що полягає в аналого-цифровому перетворенні сигналів, отриманих від сенсорів, та застосуванні в подальшому цифрових методів їхньої обробки. Розглянуто та проаналізовано варіанти реалізації цього підходу за допомогою цифрових методів визначення амплітуди синусоїдальних сигналів, серед яких вибрано найбільш перспективні для метрологічного забезпечення імпедансних вимірювань на низьких та інфранизьких частотах. Показано перспективність застосування на цих частотах паралельно-последовного аналого-цифрового перетворення інформативного сигналу з його безперервним інтегруванням. Зроблено висновки та дано рекомендації щодо використання розглянутих методів з урахуванням властивостей об'єктів вимірювання. Бібл. 16.

Ключові слова: імпеданс, низькі та інфранизькі частоти, вимірювальний канал, амплітуда синусоїдального сигналу, аналого-цифрові методи.

Вступ. Методи вимірювання імпедансу широкого використовуються під час визначення характеристик електротехнічних пристроїв та їхніх компонентів, в практиці наукових досліджень, зокрема для вивчення властивостей електрохімічних, біологічних, геофізичних та інших природних і штучних об'єктів. Аналіз публікацій із застосування імпедансних вимірювань показує, що найбільш повну інформацію щодо властивостей досліджуваних об'єктів можна отримати проведенням вимірювань параметрів їхнього імпедансу в широкій області частот ($10^4 \dots 10^7$ Гц). Для метрологічного забезпечення таких досліджень різноманітними методами у відділі електричних і магнітних вимірювань Інституту електродинаміки НАН України раніше були створені спеціалізовані прилади та гнучкі базові засоби вимірювань імпедансу для діапазону частот від 1 кГц до 100 кГц [1].

Разом з тим, останнім часом стали актуальними імпедансні вимірювання в області низьких (менш ніж 200 Гц) та інфранизьких частот (менш ніж 10...15 Гц). Це стосується контролю процесів шляхом визначення параметрів електрохімічного імпедансу або імпедансу рідин, що може бути виконано лише на низьких та інфранизьких частотах. На цьому базуються методи контролю якості продукції, екологічного контролю, численні медико-біологічні технології. Актуальність вказаної задачі пов'язана також з потребами в нових видах імпедансних вимірювань в умовах виробництва, наприклад, для контролю параметрів конденсаторів великої ємності (від одиниць до сотень фарад). Задля забезпечення необхідного значення опору конденсатора ці вимірювання треба проводити в діапазоні інфранизьких частот. Використання таких конденсаторів, наприклад, необхідно для швидкого запуску двигунів військової техніки, особливо в зимових умовах. Крім того, зазначені конденсатори відрізняються від акумуляторів здатністю швидко віддавати та накопичувати енергію, тобто можливістю високої потужності, довговічністю, експлуатаційною надійністю та економічністю. Вони можуть використовуватися як самостійно, так і паралельно з акумуляторами в перспективних транспортних засобах. В останньому випадку це дає змогу підвищити термін служби акумулятора.

© Борщов П.І., Брагинець І.О., Масюренко Ю.О., Мельник В.Г., 2024
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-1363-9252>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9528-5808>;
*** <https://orcid.org/0000-0003-4209-1126>; **** <https://orcid.org/0000-0002-4470-4339>

Авторами проведено пошук та аналіз патентів і науково-технічних публікацій, присвячених принципам побудови імпедансовимірювальних приладів для роботи в діапазоні низьких та інфранизьких частот. При цьому бралось до уваги, що в таких приладах повинні поєднуватися високі чутливість, точність, швидкодія та розрізнявальна здатність. Аналіз показав, що, попри на гостру необхідність вирішення таких питань, прогрес в цій області недостатній. Так, в [2, 3, 4] для визначення складових комплексної провідності використовуються аналогові фільтри, що призводить до низької швидкодії вимірювального процесу. Низькочастотний комплекс імпедансних вимірювань, який описано в [5], засновано на визначенні амплітуд на еталонному резисторі та вимірювальному імпедансі в частотному діапазоні $10^{-2} \dots 10^4$ Гц. У вказаному комплексі використовуються аналогові та цифрові методи обробки сигналів, похибка вимірювання в даному разі складає 0,5 %. Недоліком є відносно невисока точність вимірювання імпедансу. В заявленій корисній моделі [6] пропонується пристрій для вимірювання ємності та провідності МДП-структур в області інфранизьких частот. Тут використовуються процедури періодичної корекції, синхронного детектування та фільтрації (інтегрування за період частоти тестового сигналу). Недоліком такого пристрою є низька чутливість через малі напруги на досліджуваному об'єкті. Відомі також промислові зразки приладів для вимірювання параметрів R, L, C , які дають можливість проводити вимірювання імпедансів на низьких частотах з досить високою точністю [7]. Однак в даних приладах частотний діапазон в бік нижніх частот обмежено 15 – 20 Гц.

Таким чином, для розширення області застосування імпедансних вимірювань та об'єму їхнього впровадження з відповідним метрологічним забезпеченням необхідно розширити частотний діапазон у бік низьких та інфранизьких частот, що потребує проведення відповідних досліджень. Як правило, на таких частотах застосовують мостові методи вимірювання імпедансу з автобалансуванням мостового кола. При цьому найзручнішими інформативними параметрами під час вимірювання векторної напруги нерівноваги мостового кола є її амплітуда або синфазна та квадратурна складові. Тому канал обробки сигналу нерівноваги мостового кола, до складу якого входять масштабні та функціональні перетворювачі (підсилювачі, фільтри, амплітудний або синхронний детектори, аналого-цифрові перетворювачі), багато в чому буде визначати метрологічні характеристики під час імпедансних вимірювань на низьких та інфранизьких частотах.

Метою даних досліджень є визначення факторів, які повинні враховуватися під час побудови імпедансометричних каналів для роботи на низьких та інфранизьких частотах, розробка рекомендацій щодо застосування методів вимірювання векторної напруги нерівноваги мостового кола та обробки даних задля забезпечення необхідних метрологічних характеристик (точність, швидкодія, завадостійкість) в області низьких та інфранизьких частот.

Особливості вимірювань на низьких та інфранизьких частотах. У разі розширення частотного діапазону імпедансних вимірювань у бік низьких та інфранизьких частот необхідно враховувати специфіку цих діапазонів, які характеризуються наступними особливостями: тривалістю протікання процесу; низькою крутизною наростання та спаду інформативного електричного сигналу; низьким рівнем сигналу біля нуля та досить малою і тривалою зміною сигналу біля його екстремальних значень; спотворенням форми сигналів після проходження нелінійних кіл більш високими гармоніками; трудностю фільтрації сигналів; схильністю цих сигналів до впливу шумів, завад та наводок.

Крім зазначених вище факторів, слід також враховувати, що параметри, наприклад, біолого-медичних або електрохімічних об'єктів нестабільні у часі і для отримання достовірної інформації про властивості контрольованого об'єкту вимірювання імпедансу необхідно проводити з максимально можливою швидкістю та прийнятною для практичних цілей точністю. Особливо актуальною ця задача стає в області інфранизьких частот, коли під час визначення імпедансу необхідно забезпечити високий ступінь збереження стану об'єкта досліджень і властивостей процесів, що у ньому протікають. У зв'язку з цим постає задача прецизійного вимірювання імпедансу об'єкта з часом вимірювання, що не перевищує тривалість від одного до декількох періодів гармонійної складової досліджуваного сигналу інфранизької частоти.

З іншого боку відмітимо, що, наприклад, досліджувані електрохімічні об'єкти (ЕХО) мають суттєво нелінійну вольт-амперну характеристику. Тому задля збереження лінійних властивостей ЕХО в заданій точці вимірювального режиму необхідно, щоб амплітуда гармонійної складової вимірювального сигналу на досліджуваній ділянці ЕХО не перевищувала одиниць мілівольт, тобто вимірювання імпедансу проводяться за малих відношень сигнал/шум. При цьому виникає випадкова

похибка вимірювання імпедансу, яка визначається параметрами шумового сигналу на вході АЦП та числом N незалежних вимірювань (оцінок амплітуди), які надалі усереднюються

$$\delta = \sqrt{D/N},$$

де D – дисперсія шумової складової при кожному вимірюванні; $N = T/\tau$, τ – час одного вимірювання, T – загальний час дослідження сигналу (від одного до декількох його періодів). Звідси задля забезпечення заданої точності вимірювання імпедансу необхідно збільшувати час дослідження (число вимірювань), тобто знижувати швидкість.

Вказані вище фактори необхідно враховувати під час проектування вимірювачів імпедансу на низьких та інфранизьких частотах. Тому задля забезпечення необхідних метрологічних характеристик приладів постає задача розробки та застосування відповідних алгоритмів вимірювань та обробки їхніх даних. Край важливим є також вибір компонентів основних блоків під час побудови імпедансометричного каналу.

Застосування сучасних методів вимірювань імпедансу в діапазонах низьких та інфранизьких частот. Як було зазначено вище, структури відомих пристроїв для імпедансних вимірювань на низьких та інфранизьких частотах містять аналогові фільтри (вибіркові підсилювачі, фільтри нижніх частот та інш.), що дуже ускладнює апаратуру та призводить до суттєвого зниження швидкодії вимірювань. Тому для отримання оптимальних метрологічних характеристик вимірювального каналу (точність, швидкість, завадостійкість), доцільно використовувати цифрові методи визначення амплітуди сигналу як інформативного параметру [8, 9]. Вказані методи можуть полягати в аналого-цифровому перетворенні миттєвих значень сигналів з виходів сенсорів після їхнього попереднього підсилення та подальшої обробки масиву цифрових відліків з обчисленням амплітуди сигналу. При цьому перед обробкою даних доцільно застосовувати цифрову фільтрацію отриманого масиву цифрових відліків. В роботах останнього часу широко використовуються методи, що ґрунтуються на використанні швидкого перетворення Фур'є та визначенні амплітуд квадратурних складових сигналів, для чого створені спеціалізовані мікросхеми [10–13]. Однак в доступних публікаціях відсутні переконливі дані про задовільне вирішення вказаних вище метрологічних питань такими методами.

Серед відомих методів цифрового визначення параметрів електричного імпедансу, в тому числі з використанням вимірювань амплітуди синусоїдальних сигналів, перспективним за точністю на низьких та інфранизьких частотах є метод, запропонований в Інституті електродинаміки НАН України [14]. Цей метод реалізується за алгоритмом згідно формули

$$A_x = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{N_i}{\sin \varphi_i},$$

де A_x – розрахункове значення амплітуди досліджуваного сигналу; K – кількість цифрових відліків миттєвих значень сигналу, що беруться за довільний інтервал часу, не прив'язаний до цілого числа періодів сигналу; N_i – миттєві значення оцифрованого сигналу; φ_i – фаза моменту вибірки відліку N_i .

Перевагою цього методу перед іншими є виключення принципової необхідності в усередненні масиву відліків за ціле число періодів. Амплітуда сигналу визначається для кожного відліку сигналу, а усереднення додатково підвищує завадостійкість та знижує випадкову похибку, обумовлену похибками квантування аналого-цифрового перетворювача й похибкою вимірювання фазових кутів. За допомогою отриманого в [14] математичного виразу можна визначити оптимальну кількість цифрових відліків, що відповідає мінімальному значенню випадкової похибки вимірювання амплітуди синусоїдального сигналу описаним методом. Однак зауважимо, що цей метод забезпечує швидко і точно визначення амплітуди сигналів лише за досить високих відношеннях сигнал/завада.

Іншим методом визначення амплітуди синусоїдальних сигналів, що може бути застосовано для побудови імпедансометричних каналів, є використання цифрового квадратурного синхронного детектування досліджуваного сигналу. При цьому визначаються квадратурні складові сигналу і за їхніми значеннями за відомою формулою знаходиться амплітуда сигналу. Останні виділяються під час перемноження в цифровій формі миттєвих значень досліджуваного сигналу із миттєвими значеннями по чергово двох ортогональних опорних сигналів. Далі виконується усереднення значень добутків сигналів. В даному разі амплітуда визначається тим точніше, чим більше часовий інтервал усереднення, кратний періоду досліджуваного сигналу.

Метод із цифровим синхронним детектуванням більш ефективний в компенсації впливу шумів. Разом з тим під час реалізації він потребує використання процесорів з високою обчислювальною потужністю. Також треба враховувати, що високочастотні цифрові сигнали створюють додаткові завади у вимірювальному каналі. Під час прецизійних вимірювань сигналів з низькими рівнями ці обставини можуть суттєво обмежити досягнення високих метрологічних характеристик приладів, особливо їхньої чутливості. Тому більш перспективним представляється комбінація аналогових та цифрових перетворень вимірювальних сигналів з використанням розроблених в Інституті електродинаміки НАН України уніфікованих базових модулів для вимірювань параметрів електричного імпедансу [1, 15]. Їхньою особливістю є використання комбінованих методів перетворення параметрів, чим забезпечується дуже висока чутливість вимірювального каналу (без підсилення до часток мікрівольта в діапазоні $\pm 0,5\text{В}$) та широкий діапазон швидкості (від 16 до 100 вимірювань за секунду). При цьому смуга пропускання становить від одиниць до сотень Гц і може розташовуватися у широкому діапазоні частот – від інфранизьких частот (малі частки Гц) до 1 МГц.

Структуру вимірювального каналу уніфікованого імпедансометричного базового модуля та принцип його дії детально розглянуто в [15]. Нижче розглянемо деякі особливості функціонування його основних блоків з урахуванням вимог застосування на низьких частотах за малих рівнів тестових сигналів.

Використання каналу вимірювань з комбінованим перетворенням на низьких частотах.

В роботах [1, 15] розглянуто варіанти алгоритмів реалізації методу паралельно-последовних аналого-цифрових перетворень, що передбачають безперервне інтегрування інформативного сигналу вимірювального кола з одночасним перетворенням його в цифрову форму та забезпечення придушення завад мережевої частот (50 або 60 Гц). Завдяки цьому, на відміну від методів, основаних на обробці масивів вибірок, інформація, що несе сигнал, використовуються повністю. Це призводить до зростання співвідношення сигнал/шум. Дослідження показують, що задля забезпечення хорошої повторюваності результатів вимірювань на низьких та інфранизьких частотах важлива синхронізація імпульсів тактування (Т1) основних блоків базового модуля: мікроконтролера, АЦП (Т11) та цифрового генератора тестових сигналів (Т12).

Задля отримання високої чутливості вимірювального каналу за малих рівнів вимірювальних сигналів, що є особливо актуальним у сенсорних системах, доцільно застосовувати інтегруючі АЦП. Зокрема, дуже перспективним є застосування мікросхеми MAX 132 [16]. Для її тактування виробник рекомендує частоту 32768 кГц (або близьку до неї), що забезпечує швидкодію 16 відліків в секунду та оптимальний час інтегрування 20 мілісекунд для придушення мережевих завад з частотою 50 Гц. Задля розширення функціональності приладів також дуже бажана частота тактування АЦП в 6 разів вище – 196608 кГц), що дає змогу отримати максимальну швидкість перетворення – 96 відліків за секунду. Якщо виконувати усереднення за двома суміжними результатами на цій швидкості, можна також значно придушити мережеву заваду і отримати частоту видачі даних 48 відліків за секунду [15]. Зазначимо, що для глибшого придушення мережевих завад краще використовувати частоту 200 кГц.

Цифровий генератор виробляє ступінчастий квазісинусоїдальний тестовий сигнал для живлення вимірювального кола. Для цілого ряду практичних завдань оптимальною є апроксимація синусоїди 32 сходинками. Використовуючи вказану тактову частоту, можна отримати квазісинусоїдальну напругу з частотою 1024 Гц. Вимога синхронізації Т11 та Т12 стає все більш важливою у разі зниження робочої частоти, враховуючи зближення періодів цих послідовностей. Через прив'язку періоду інтегрування АЦП до періоду мережевої завади та відсутності його синхронності з інформативним сигналом, початкова фаза інтегрування останнього дрейфує, а результати періодично змінюються у вигляді биття з різницевою частотою. Особливо гостро дана проблема стоїть у нижній частині області низьких і на інфранизьких частотах (нижче 50 Гц), оскільки крім синхронізації тактових послідовностей виникає потреба збільшення часу інтегрування інформативного сигналу до тривалості його періоду або кратного йому при одночасній кратності до 20 мсек. Таким чином, для високочутливих і точних вимірювань за низьких рівнях тестових сигналів необхідно використовувати робочі частоти, для яких тривалість періоду кратна 20 мсек, а час інтегрування сигналу, що перетворюється, дорівнює 40, 60, 80, 100, ..., $20 \cdot n$ мілісекундам.

Доцільне рішення щодо частот тактування АЦП і генератора, наприклад, може базуватися на тактуванні мікроконтролера частотою 32 МГц, яку також можна використовувати як вихідну для формувань Т11 і Т12. Поділом цієї частоти на 977 можна отримати частоту 32,7533 кГц (Т11), що забезпечує час інтегрування 19,997 мсек., а діленням на 20000 отримуємо частоту 1,6 кГц, з якої в

свою чергу – частоти Т12 для 50, 25, 16,66 Гц та інших частот низького та інфранизького частотних діапазонів.

Для використання описаного підходу в реальній апаратурі існує ще одна проблема. Інтегруючий АЦП (як і інші їхні види) має цикл перетворення, у якому інтегрування інформативного сигналу займає лише частину його тривалості (для МАХ-132 це 1/3). Виникає питання: яким чином із окремих фрагментів періоду інформативного сигналу отримати інтеграл цілого періоду? Це завдання може бути успішно вирішено використанням нових уніфікованих базових вимірювальних модулів МХР-6 та МХР-7. Блок АЦП цих модулів складається із трьох мікросхем МАХ-132, що по чергово підключаються до джерела сигналу після закінчення періоду його інтегрування попередньою мікросхемою (після першої – друга, після другої – третя, після третьої – знову перша) [15]. На вході блоку АЦП встановлений ключовий синхронний детектор, який перетворює в цифровий код дві квадратурні складові інформативного синусоїдального сигналу, отриманого з вимірювального кола, що живиться від цифрового генератора тестового сигналу. Отримання потрібної складової (синфазної або квадратурної з тестовим сигналом) здійснюється вибором опорного сигналу, що подається на синхронний детектор. Ці сигнали формуються цифровим генератором одночасно із тестовим сигналом. Таким чином, на виході блоку створюється безперервний потік даних від трьох мікросхем з інтервалами 20 мсек, який несе інформацію про відповідні фрагменти інформативного сигналу з об'єкта вимірювання з придушенням завад промислової частоти. Усреднюючи дані потрібної кількості таких інтервалів (наприклад, двох послідовно для робочої частоти 25 Гц, трьох – для частоти 16,666 Гц або п'яти – для 10 Гц, і т.п.) ми отримуємо значення амплітуди квадратурних складових вимірюваного сигналу. В інфранизкочастотному діапазоні сітка таких частот досить густа. Для деяких досліджень в цьому діапазоні можливе також застосування розроблених модулів у режимі швидких вимірювань (96 відліків за секунду) [15].

Висновки. Визначені особливості низького та інфранизького частотних діапазонів гармонічних вимірювальних сигналів показують, що перспективним підходом для оптимізації метрологічних характеристик імпедансометричних каналів (точність, швидкодія, завадостійкість) є аналого-цифрове перетворення сигналів, отриманих з виходів сенсорів і мінімально підсилених, та застосування в подальшому цифрових методів визначення їхньої амплітуди. Серед методів, що реалізують такий підхід, можна рекомендувати, як найбільш розвинутий, метод визначення амплітуди синусоїдального сигналу, заснований на підсумовуванні відношень миттєвих значень цифрових відліків сигналу до синусів фазових кутів, які відповідають моментам часу вибірок. Іншим методом для використання може бути цифрове квадратурне синхронне детектування досліджуваного сигналу. Цей метод більш ефективний для придушення впливу шумів. Разом з тим під час реалізації він потребує процесорів з високою обчислювальною потужністю. Обидва ці методи ефективні у випадках, коли немає жорстких обмежень рівнів тестових сигналів. У разі досліджень в умовах таких обмежень хороші результати можуть бути отримані застосуванням методу паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворення інформативного сигналу з його безперервним інтегруванням. На низьких та інфранизьких частотах необхідно, щоб період інтегрування був кратний як періоду досліджуваного сигналу, так і періоду завади мережевої частоти. Для цього необхідне узгодження частот тактування АЦП та отримання від них даних з частотами тестових сигналів та, одночасно, з мережевою частотою та її субгармоніками. Час інтегрування повинен зростати кратно 20 мілісекундам під час зниження частоти тестових сигналів, що може реалізовуватися усередненням відповідної кількості результатів інтегрування. Робочими частотами, на яких вказане узгодження може бути здійснене, є промислова частота (50 Гц) та її субгармоніки.

Роботу виконано за рахунок держбюджетної теми «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» (шифр «Параметр-Д»), державний реєстраційний номер теми 0122U000136, КПКВК 6541030.

1. Мельник В.Г., Борщов П.І., Беляєв В.К., Василенко О.Д., Ламеко О.Л., Сліцький О.В. Базовий вимірювальний модуль для реалізації високочастотних засобів визначення параметрів імпедансу в широкому діапазоні частот. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 56. С. 20-23. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.020>.

2. Кензин В.И., Новицкий С.П. Инфранизкочастотный измеритель комплексной проводимости. Патент SU 788037A1, 1980.

3. Буренков И.И., Буренкова Р.И., Гладких И.В., Пашнин А.И., Сюткина В.В. Измеритель комплексных сопротивлений. Патент SU 1781635A1, 1992.
4. Казаков Н.И., Скрипник Ю.А., Киреев В.В. Устройство для оценки биоэлектрической активности точек акупунктуры. Патент RU 2 209 033 C1, 2002.
5. Афанасьев А.В., Москвичев А.Н., Москвичев А.А., Ордоносцев В.А., Орлов И.Я. Низкочастотный комплекс импедансных измерений характеристик проводящих сред. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2008. № 3. С. 60-64.
6. Попов Ю.А. Устройство для измерения емкости и проводимости МДП-структур в области инфранизких частот. Полезная модель RU 127942, 2010.
7. Измерим все. Измерители RLC. URL: http://www.izmerimvse.ua/Izmeriteli_RLC.aspx?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA84CvBhCaARIsAMkAvkIKEJIX72evjp_qrGkIU_2Zzr1MNBhOT-OLJ5mOP9Nu5kUC7qyGsW8aAvzkEALw_wcB (дата звернення 25.02.2024).
8. Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. К.: Техніка, 1985. 151 с.
9. Andow F., Matsushima T., Iwasaki M. Apparatus for calculating amplitude values. Patent USA 4073008, 1978.
10. Analog Devices. AN-1252. Application Note. AD5933 (Rev.0). URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-1252.pdf> (дата звернення 25.02.2024).
11. Hoja Jerzy, Lentka Grzegorz. Portable analyzer for impedance spectroscopy. XIX IMEKO World Congress *Fundamental and Applied Metrology*. Lisbon, Portugal, 06–11 September 2009. Pp. 497–502.
12. PalmSens. PStace-5.6-Manual. URL: <https://www.palmsens.com/software/ps-trace/https://idm-instrumentos.es/wp-content/uploads/2019/04/PStace-5.6-Manual.pdf> (дата звернення 25.02.2024).
13. Analog Devices. Precision Analog Microcontroller with Chemical Sensor Interface. ADuCM355. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuCM355.pdf> (дата звернення 25.02.2024).
14. Борщов П.І. Мінімізація випадкової похибки цифрового методу вимірювання амплітуди синусоїдального сигналу. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 62. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.055>.
15. 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. DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2018.4.150520>.
16. Elcodis. Electronic components marketplace. MAX132EVKIT-DIP Maxim Integrated Products, MAX132EVKIT-DIP Datasheet. URL: <http://elcodis.com/parts/837421/MAX132EVKIT-DIP.html> (дата звернення 25.02.2024).

FEATURES OF CONSTRUCTION OF IMPEDANSOMETRIC CHANNELS FOR WORK AT LOW AND INFRARED FREQUENCIES

P.I. Borchshov, I.O. Brahynets, Yu.O. Masiurenko, V.G. Melnyk
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: masjuriv@ied.org.ua.

The features of the low and infra-low frequency ranges of harmonic measurement signals, as well as the properties of the investigated objects, which must be taken into account during the construction of impedance measuring channels, are determined. To combine the necessary metrological characteristics of such channels (accuracy, speed, immunity), an approach is used, consisting in analog-to-digital conversion of signals received from sensors, and subsequent application of digital methods of their processing. Options for implementing this approach using digital methods for determining the amplitude of sinusoidal signals were considered and analyzed, among which the most promising ones were selected for metrological support of impedance measurements at low and infra-low frequencies. The perspective of using parallel-serial analog-digital conversion of an informative signal with its continuous integration at these frequencies is shown. Conclusions were made and recommendations were given regarding the use of the considered methods taking into account the properties of the measurement objects. References 16.

Keywords: impedance, low and infra-low frequencies, measurement channel, sinusoidal signal amplitude, analog-digital methods.

1. Melnyk V.G., Borschov P.I., Beliaev V.K., Vasylenko O.D., Lameko O.L., Slitskiy O.V. Basic measuring module for implementation of the high-precision devices for determining the impedance parameters in a wide frequency

- range. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2020. Vyp. 56. Pp. 20-23. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.020>. (Ukr)
2. Kenzin V.I., Novitskii S.P. Infra-low frequency complex conductivity meter. Patent SU 788037A1, 1980. (Rus)
 3. Burenkov I.I., Burenkova R.I., Gladkih I.V., Pashnin A.I., Siutkina V.V. Complex resistance meter. Patent SU 1781635A1, 1992. (Rus)
 4. Kazakov N.I., Skripnik Yu.A., Kireev V.V. Device for assessing the bioelectric activity of acupuncture points. Patent RU 2 209 033 C1, 2002. (Rus)
 5. Afanasev A.V., Moskvichev A.N., Moskvichev A.A., Ordonostsev V.A., Orlov I.Ia. Low-frequency complex of impedance measurements of characteristics of conducting media. *Vestnik Nizhegorodckogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*. 2008. No 3. Pp. 60-64. (Rus)
 6. Popov Yu.A. Device for measuring the capacitance and conductivity of MIS structures in the infra-low frequency range. Utility model RU 127942, 2010. (Rus)
 7. Izmerim vse. Izmeriteli RLC. URL: http://www.izmerimvse.ua/Izmeriteli_RLC.aspx?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA84CvBhCaARIsAMkAvkIKEJIX72evjp_qrGkIU_2Zzr1MNBhOT-OLJ5mOP9Nu5kUC7qyGsW8aAvzkEALw_wcB (date accessed 25.02.2024). (Rus)
 8. Gorlach A.A., Mints M.Ia., Chinkov V.N. Digital signal processing in measurement technology. Kiev: Tekhnika, 1985. 151 p.
 9. Andow F., Matsushima T., Iwasaki M. Apparatus for calculating amplitude values. Patent USA 4073008, 1978.
 10. Analog Devices. AN-1252. Application Note. AD5933 (Rev.0). URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-1252.pdf> (date accessed 25.02.2024).
 11. Hoja Jerzy, Lentka Grzegorz. Portable analyzer for impedance spectroscopy. XIX IMEKO World Congress *Fundamental and Applied Metrology*. Lisbon, Portugal, 06-11 September 2009. Pp. 497-502.
 12. PalmSens. PStace-5.6-Manual. URL: <https://www.palmsens.com/software/ps-trace/https://idm-instrumentos.es/wp-content/uploads/2019/04/PStace-5.6-Manual.pdf> (date accessed 25.02.2024)
 13. Analog Devices. Precision Analog Microcontroller with Chemical Sensor Interface. ADuCM355. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuCM355.pdf> (date accessed 25.02.2024)
 14. Borschov P.I. Minimization of the random error of the digital method of measuring the amplitude of a sinusoidal signal. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. Vyp. 62. Pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.055>. (Ukr)
 15. Melnik V.G., Borschov P.I., Vacilenko A.D., Slitskiy O.V. Optimization of the structure and algorithm of the highly sensitive multisensor system with impedance converters. *Sensorna elektronika i mikrosistemni tekhnologii*. 2018. Vol. 15. No 4. Pp. 100-109. DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2018.4.150520>. (Rus)
 16. Elcodis. Electronic components marketplace. MAX132EVKIT-DIP Maxim Integrated Products, MAX132EVKIT-DIP Datasheet. URL: <http://elcodis.com/parts/837421/MAX132EVKIT-DIP.html> (date accessed 25.02.2024).

Надійшла 15.04.2024
Остаточний варіант 26.04.2024