

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/45>

Барило Г.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Голяка Р.Л.

Національний університет «Львівська політехніка»

Брич М.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Шлюсар Ю.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

Онутчак Т.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

РЕАЛІЗАЦІЯ СИГНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА УЛЬТРАЗВУКОВИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ПРОГРАМОВАНОЇ СИСТЕМИ НА КРИСТАЛІ

У статті розглянуто підхід до вбудованої самодіагностики сигнальних перетворювачів ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів. Запропоновано доповнення вхідного сигнального тракту сенсорного пристрою спеціалізованою схемою активації власних автоколивань п'єзоелектричного перетворювача. Метод ґрунтується на аналізі перехідних процесів та коливань на частоті власного резонансу при періодичному підключенні сенсора до трансімпедансного підсилювача (TIA). У результаті TIA формує затухаючі автоколивання, а їх частота, амплітуда та швидкість затухання використовуються як діагностичні параметри для моніторингу стабільності та виявлення параметричного дрейфу.

Оптимізація режимів функціонування вузла на основі TIA виконана за критерієм максимальної ефективності формування інформативного сигналу. SPICE-моделювання підтвердило залежність характеристик вихідних імпульсів від елементів зворотного зв'язку (RFB, CFB) та параметрів операційного підсилювача, що дозволило сформулювати закономірності для контролю деградаційних процесів. Додатково показано, що введення інтегруючого конденсатора CFB знижує надлишкові високочастотні компоненти й стабілізує форму імпульсів, спрощуючи цифрову обробку.

Сигнальний тракт вбудованої системи реалізовано на базі PSoC 5LP, який об'єднує аналоговий фронт-енд (AMUX, OA, PGA, TIA) із цифровими модулями (ADC, SC, Timer, UART) у єдиній реконфігурованій мікросхемі. Розроблений застосунок iSound забезпечує керування процесами вимірювального перетворення, конфігурування параметрів і візуалізацію результатів у реальному часі.

Експериментальні дослідження підтвердили відтворюваність діагностичних сигналів і практичну реалізованість методу. Отримані результати демонструють перспективність застосування архітектури PSoC для створення компактних, енергоефективних та інтелектуальних сенсорних систем нового покоління. Такі системи можуть бути використані у промисловому моніторингу, медичній діагностиці та аерокосмічних застосуваннях, де критично важливими є надійність і стабільність роботи.

Ключові слова: п'єзоелектричний сенсор, самодіагностика, сигнальний перетворювач, вбудована система, PSoC, трансімпедансний підсилювач.

Постановка проблеми. У сучасній сенсорній електроніці спостерігається інтенсивний розвиток пристроїв на основі п'єзоелектричних перетворювачів ультразвукового діапазону [1]. Базовим інформативним параметром більшості сенсорів є час прольоту (ToF, Time-of-Flight) ультразвукових коливань, що визначається шляхом вимірювання затримки Δt між випроміненим та прийнятим імпульсами [4]. Проте формування такого сигналу істотно залежить від сторонніх впливів, компенсація яких у багатьох випадках залишається проблематичною. Особливо складними є умови експлуатації у середовищах із жорсткими вимогами (harsh environments), зокрема в космічних застосуваннях [5, 6].

У зв'язку з цим постає завдання створення сигнального перетворювача ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів, який би поєднував точність вимірювального перетворення з вбудованою функцією самодіагностики. Таке рішення дозволить здійснювати моніторинг стабільності роботи сенсора та своєчасно виявляти параметричний дрейф, що підвищить надійність роботи сенсорних систем у критичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогрес у розвитку сенсорних пристроїв зумовлений як появою новітніх структур, зокрема на базі MEMS-технологій та PMUT (Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers) [2, 3], так і розширенням сфер їх застосування, включно з електронікою Інтернету речей (IoT, Internet of Things) [4]. Розвиток сучасної сенсорики також тісно пов'язаний з інтелектуалізацією вимірювальних процесів на основі теорії надлишковості (redundancy theory) та її сучасного розвитку в інформатиці, сенсорикі й вимірювальній техніці [7, 8]. У таких підходах вимірювальна система формує додаткові інформативні сигнали – критерії стабільності функціонування сенсора, що ґрунтуються на аналізі релаксаційних процесів і перехідних характеристик у спеціалізованих сигнальних трактах.

Ключову роль у забезпеченні точності та стабільності відіграють мікроелектронні компоненти аналогового фронт-енду (AFE, Analog Front-End), які реалізують взаємодію між фізичним (аналоговим) та цифровим середовищем. З урахуванням тенденцій розвитку сенсорних технологій особливу актуальність мають вбудовані системи зі змішаним сигнальним (mixed-signal) перетворенням [9, 10]. Високу ефективність при їх проектуванні забезпечують програмовані системи на кристалі (PSoC, Programmable System-on-

Chip), які дозволяють інтегрувати вимірювальні, обчислювальні та діагностичні функції в єдиній мікросхемі [11]. Реалізація таких систем потребує функціонального аналізу та параметричної оптимізації сигнальних трактів, що досягається за допомогою модельних досліджень у середовищах SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [12, 13].

Таким чином, розроблення та реалізація сигнального перетворювача ультразвукових сенсорів із вбудованою самодіагностикою на основі PSoC є актуальним завданням, що поєднує надійність, функціональність та практичну придатність до використання в сучасних сенсорних системах.

Метою статті є розроблення та реалізація сигнального перетворювача ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів на основі програмованої системи на кристалі PSoC 5LP, який поєднує результати SPICE-моделювання та параметричної оптимізації із апаратною реалізацією аналогового фронт-енду та цифрових модулів і програмним забезпеченням iSound, що забезпечує підвищену стабільність, надійність та можливість вбудованої самодіагностики сенсорних систем.

Виклад основного матеріалу. Задача, що розглядається у статті, полягає в реалізації сигнального перетворювача ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів із вбудованою функцією самодіагностики. Основною метою є створення апаратно-програмного рішення, яке поєднує функції вимірювального перетворення та моніторингу стабільності роботи сенсора на єдиній платформі. Для цього у сигнальний тракт інтегровано спеціалізовану схему активації власних автоколивань п'єзоелектричного перетворювача. Суть методу полягає у моніторингу перехідних процесів та коливань на частоті власного резонансу при періодичному підключенні сенсора до трансімпедансного підсилювача (TIA, Transimpedance Amplifier). У такій конфігурації TIA формує затухаючі автоколивання, а за їх частотою, амплітудою та швидкістю затухання здійснюється контроль дрейфу параметрів п'єзоелектричного перетворювача.

Спрощена схема вбудованої діагностики зображена на рис. 1. Трансімпедансне перетворення реалізовано на операційному підсилювачі з резистором зворотного зв'язку RFB. Періодичне перемикання сенсора CQ між входом TIA та нульовим потенціалом забезпечує процес заряду-розряду, внаслідок чого на виході формується напруга VDG із характерними затухаючими коливаннями.

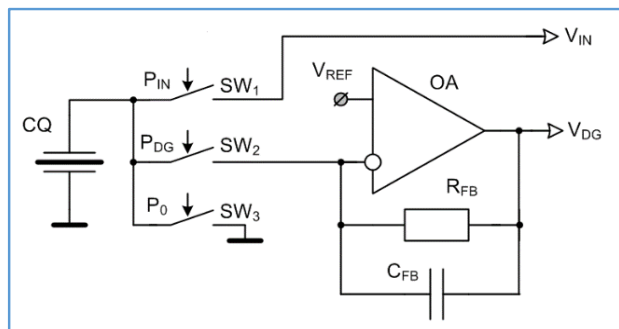


Рис. 1. Спрощена схема вбудованої діагностики приймального тракту п'єзоелектричних перетворювачів

У традиційному режимі сенсор формує інформативний сигнал V_{IN} , тоді як у режимі самодіагностики перемикається між інвертуючим входом ТІА та землею. Таким чином відбувається заряд до рівня V_{REF} і подальший розряд сенсора, що відтворює ефект релаксації.

Отримані результати моделювання підтвердили, що форма вихідного сигналу V_{DG} суттєво залежить від параметрів кола зворотного зв'язку та може бути використана для моніторингу нестабільності роботи сенсора.

Подальші дослідження були спрямовані на оптимізацію схеми за критерієм ефективності формування інформативного сигналу. Введення інтегруючого конденсатора C_{FB} у коло зворотного зв'язку дозволило регулювати динаміку перехідних процесів.

В результаті SPICE-моделювання отримано модифіковану схему (рис. 2) яка показує, що поєднання параметрів R_{FB} та C_{FB} дозволяє забезпечити як стійкість, так і достатню інформативність перехідних процесів.

Крім того, у подальших дослідженнях встановлено вплив параметрів сенсора (LS , CS) на форму сигналів V_{OUT} і V_{CQ} , зокрема:

- форма вихідних імпульсів керовано змінюється залежно від R_{FB} і C_{FB} ;
- великі значення R_{FB} спричиняють тривалу стабілізацію сигналів;
- введення C_{FB} зменшує надлишкові високочастотні компоненти та спрощує програмний аналіз;
- параметри сенсора визначають частоту та характер релаксації, що робить можливим відокремлення нестабільностей у сенсорі та сигнальному тракті.

Сигнальний тракт розробленої в рамках даної роботи вбудованої системи ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів з функцією самодіагностики реалізовано з використанням програмованої системи на кристалі PSoC (Programmable System on Chip) серії PSoC 5LP (Cypress, Infineon Technologies). В склад PSoC 5LP входять мікропроцесор, багатофункціональні модулі аналогового та цифрового перетворення сигналів, модулі пам'яті, інтерфейси та ряд інших важливих для концепції програмованої системи вузлів. З точки зору реалізації змішаного сигнального перетворення в сенсорній техніці перевагою вищезгаданого сімейства PSoC 5LP є широкий набір програмно керованих аналогових компонентів, режими роботи яких конфігуруються при їх ініціалізації та програмно керуються з допомогою API (Application Programming Interface).

Апаратну реалізацію сигнального перетворювача ультразвукових сенсорів на основі програ-

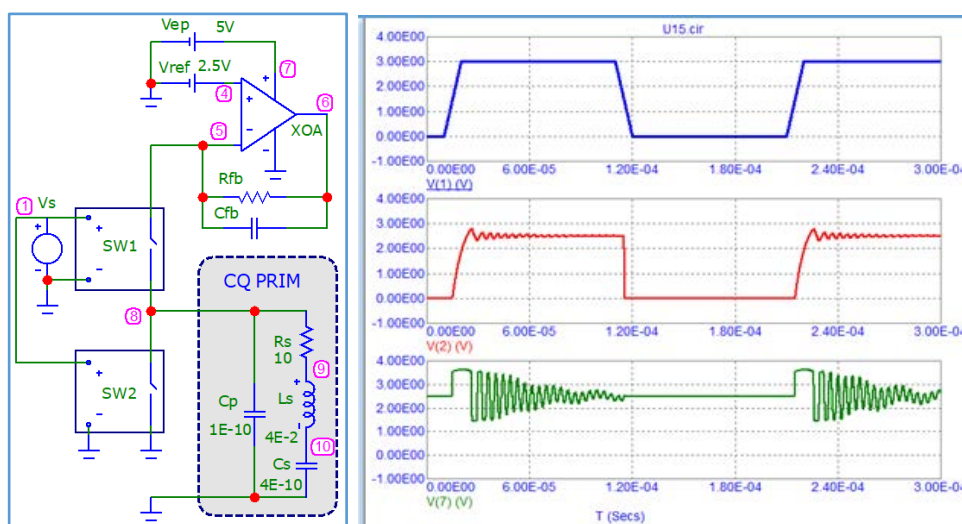


Рис. 2. SPICE-модель модифікованої схеми діагностики

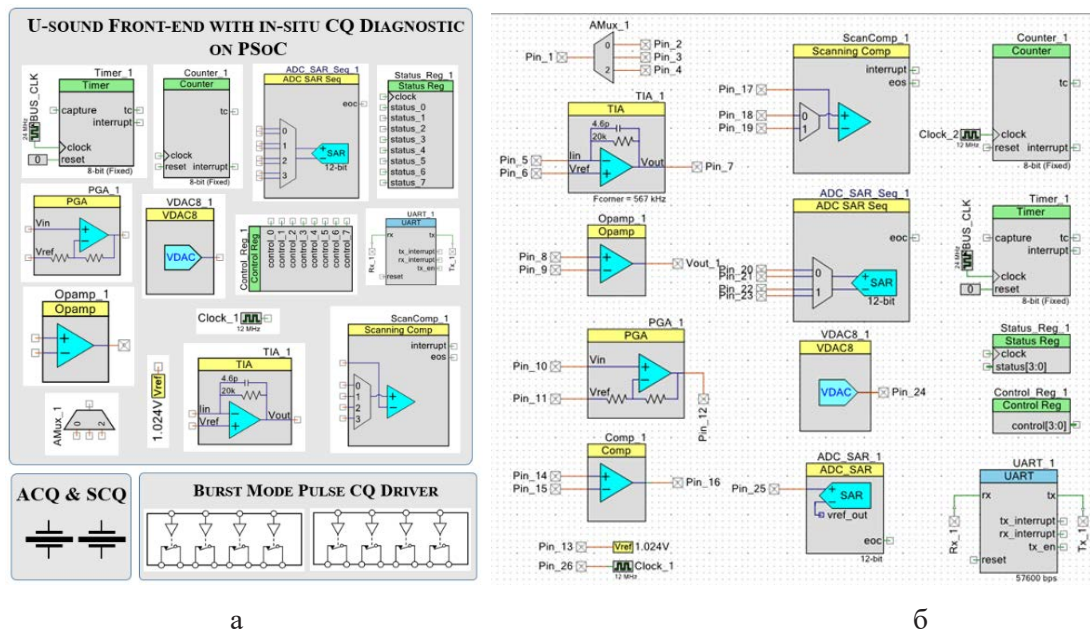


Рис. 3. Сигнальний перетворювач ультразвукового сенсора: а – структура; б – зображення схеми в режимі конфігурування зв'язків

мованої системи на кристалі з функцією самодіагностики UCQD (U-sound Front-end with in-situ CQ Diagnostic) виконано відповідно до структури представленої на рис. 3 а.

Функціональна організація цієї системи охоплює кілька взаємопов'язаних трактів.

Аналоговий тракт вхідного сигналу реалізований комбінацією мультиплектора аналогових сигналів (AMUX), операційного підсилювача (ОА) та підсилювача з програмно керованим коефіцієнтом підсилення (PGA). Така конфігурація забезпечує вибір вхідного каналу, його початкове підсилення та адаптацію параметрів до вимог подальшої обробки.

Тракт формування збуджувальних та цифрових сигналів містить цифро-аналоговий перетворювач (VDAC) для керування актюатором, а також аналого-цифровий перетворювач (ADC) типу SAR (Successive Approximation Register), який виконує перетворення аналогових сигналів у цифрову форму з високою швидкістю та точністю.

Часовий вимірювальний тракт призначений для визначення затримки Δt між випроміненим та прийнятим ультразвуковим імпульсом. Він реалізований за допомогою скануючого компаратора (SC), таймера (Timer) та лічильника (Counter), що спільно забезпечують реєстрацію та обробку сигналів для визначення параметра ToF (Time-of-Flight).

Тракт керування та передавання даних включає регістри програмного керування (Status_Reg, Control_Reg) та асинхронний інтерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

Ці елементи забезпечують конфігурування компонентів PSoC (рис. 3. б), їх синхронізацію та передавання вимірювальної інформації до зовнішніх систем. Зовнішній вигляд дослідного макета сигнального перетворювача показано на рис. 4.

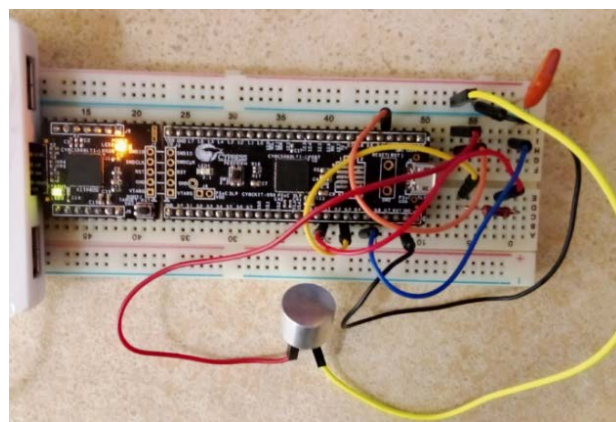
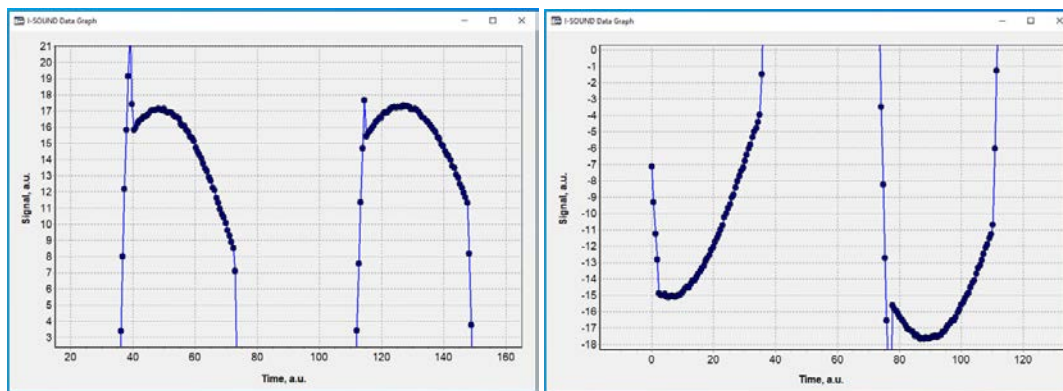


Рис. 4. Вигляд дослідного макета

Керування процесами вимірювального перетворення та візуалізація отриманих результатів здійснюється програмним застосунком iSound (рис. 5) у вікнах якого представляються широкі можливості програмного конфігурування компонентів PSoC (DSIN, SARN, DSC тощо) та формування режимів вимірювання (Mode:#, dt, NxС, ZS тощо). Для ілюстрації типових результатів вимірювання на рис. 5, а демонструється епюра періодичних процесів при періодичному перемиканні п'єзоелектричного перетворювача на вхід трансімпедансного підсилювача TIA у відповідності



а

б

Рис. 5. Зображення перехідних процесів при періодичному перемиканні п'єзоелектричного перетворювача: а – для високого рівня сигналу; б – для низького рівня сигналу

до запропонованого методу вбудованої діагностики вхідних трактів ультразвукових сенсорів.

Можна спостерігати наявність перехідних процесів, які виникають у моменти включення та відключення сенсора, що дає можливість отримати інформацію щодо властивостей матеріалу сенсора та формувати відповідні параметри, що властиво і вирішує задачу формування інформативних сигналів вбудованої діагностики.

Висновки. У роботі реалізовано сигнальний перетворювач ультразвукових сенсорів із вбудованою функцією самодіагностики на основі програмованої системи на кристалі PSoC 5LP (Cypress, Infineon Technologies). Архітектура пристрою

поєднує аналоговий фронт-енд (AMUX, ОА, PGA, ТІА) з цифровими модулями керування, що забезпечує інтеграцію та програмне конфігурування параметрів.

Практичне впровадження реалізовано з використанням застосунку iSound для керування вимірюваннями, конфігурації PSoC та візуалізації результатів. Експерименти підтвердили ефективність підходу та відтворюваність діагностичних сигналів.

Отримані результати доводять перспективність використання PSoC для створення компактних, енергоефективних та реконфігурованих сенсорних систем, придатних для роботи в умовах високих вимог до надійності.

Список літератури:

1. Zhou X., Lee H. J. Recent Advances in Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (PMUTs) for Medical and Industrial Applications. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 1234. DOI: 10.3390/s21041234.
2. Muralt P., et al. Piezoelectric MEMS sensors and actuators: fundamentals and advances. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2020. Vol. 67, No. 6. P. 1208–1222. DOI: 10.1109/TUFFC.2020.2989874.
3. Ahmed S., Lee C. Ultrasonic Sensors for Internet of Things Applications: A Review. *Measurement*. 2022. Vol. 199. P. 111500. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111500.
4. Reverter F., Li X. Time-of-Flight Measurement Techniques for Ultrasonic Sensors: Challenges and Solutions. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, No. 10. P. 10823–10832. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3245678.
5. Kim J., et al. Reliability of Piezoelectric Sensors in Harsh Environments. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. Vol. 322. P. 112610. DOI: 10.1016/j.sna.2021.112610.
6. Teng X., et al. Piezoelectric Transducers for Space Applications: Materials and Reliability Issues. *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 170. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.01.009.
7. Ahrens M., et al. Redundancy in Sensor Networks: Principles and Applications in Self-Diagnosis. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 161233–161245. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3132134.
8. Chen Y., Zhang Y. Intelligent Sensor Systems with Built-in Self-Diagnostics Based on Redundancy Information Theory. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 17. P. 6488. DOI: 10.3390/s22176488.
9. Mandal S., et al. Embedded Systems for Ultrasonic Sensing: Design and Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 12. P. 4012. DOI: 10.3390/s21124012.
10. Wang J., et al. Mixed-Signal Design for Embedded Ultrasonic Sensing Systems. *Microelectronics Journal*. 2022. Vol. 121. P. 105387. DOI: 10.1016/j.mejo.2022.105387.

11. Infineon Technologies. PSoC 5LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip. Cypress/Infineon, 2020. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PSoC_5LP (дата звернення: 24.09.2025).
12. Zhao L., et al. SPICE-Based Modeling of Ultrasonic Sensor Circuits for Reliability Analysis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2023. Vol. 72. P. 3507910. DOI: 10.1109/TIM.2023.3507910.
13. Барило Г.І., Брич М.В., Шлюсар Ю.А., Живицький І.Б., Бойкачов Г.В., Пришляк С.О. Макромодель п'єзоелектричного перетворювача з розширеною функціональністю. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 36 (75) № 2, 2025. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/47>

Barylo H.I., Holyaka R.L., Brych M.V., Shliusar Yu.A., Onutchak T.A. DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SIGNAL CONVERTER FOR ULTRASONIC SENSORS BASED ON A PROGRAMMABLE SYSTEM-ON-CHIP

This paper presents the design and development of a signal converter for ultrasonic piezoelectric sensors with an integrated self-diagnostic function, implemented on a programmable system-on-chip (PSoC 5LP, Cypress, Infineon Technologies). The motivation for this work stems from the growing importance of ultrasonic sensing in advanced electronic systems, where reliability and stability under varying operating conditions are crucial. Traditional approaches to signal conversion often face challenges associated with parameter drift of piezoelectric transducers and the influence of external factors, which significantly complicate accurate measurement and long-term operation.

The proposed approach addresses these limitations by introducing a novel method of embedded self-diagnostics. A specialized circuit was designed to activate intrinsic oscillations of the piezoelectric transducer, achieved through its periodic switching between the inverting input of a transimpedance amplifier (TIA) and ground potential. As a result, damped self-oscillations are generated, and their key characteristics – frequency, amplitude, and decay rate – serve as informative diagnostic parameters for evaluating the stability and identifying possible degradation of the sensor element.

Comprehensive SPICE simulations were conducted to analyze transient responses and the influence of feedback elements (RFB, CFB) as well as operational amplifier parameters (GBW, SRP, SRN) on the output waveform. These studies confirmed that predefined patterns of transient and oscillatory behavior can be used as diagnostic markers for detecting parameter variations. Furthermore, optimization of the TIA operating modes was performed according to the criterion of maximizing diagnostic signal efficiency, which significantly simplifies subsequent digital analysis.

The practical realization of the system was carried out on the PSoC 5LP platform, which combines analog front-end components with digital control and communication modules in a single reconfigurable chip. A dedicated software application, iSound, was developed to support sensor switching, parameter configuration, measurement control, and real-time visualization of results. Experimental validation demonstrated consistent and reproducible diagnostic signals under varying sensor conditions, confirming the robustness of the proposed approach.

The presented solution not only verifies the feasibility of TIA-based self-diagnostics for ultrasonic piezoelectric sensors but also highlights the broader potential of PSoC-based architectures. By integrating modeling, optimization, hardware implementation, and software support into a unified framework, this work contributes to the development of compact, energy-efficient, and intelligent ultrasonic sensing systems. Such systems are particularly relevant for applications requiring high reliability and adaptability, including industrial monitoring, medical diagnostics, and aerospace instrumentation.

Key words: piezoelectric sensor, self-diagnostics, signal converter, embedded system, PSoC, transimpedance amplifier.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 19.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025