

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-5>

УДК 621.382

БАРИЛО ГРИГОРІЙ

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-5749-9242>e-mail: hryhorii.i.barylo@lpnu.ua**БРИЧ МИКОЛА**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0004-9767-5991>e-mail: mykola.v.brych@lpnu.ua**МАРКІВ ДЕНИС**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0006-7744-8825>e-mail: denys.v.markiv@lpnu.ua**ВОВК МИКОЛА**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0001-6514-1141>e-mail: mykola.m.vovk@lpnu.ua**ГРИНЧИШИН АНДРІЙ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0006-6736-1793>e-mail: andrii.b.hrynychshyn@lpnu.ua

ПРОГРАМНО-КЕРОВАНІЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ

У даній роботі представлено результати розробки та дослідження програмно-керованого вимірювального перетворювача ємнісних сенсорів. На основі SPICE моделювання досліджено особливості функціонування схем типу SCC (Switched Capacitor Circuits), що реалізують кулонометричний метод вимірювального перетворення. Розроблений перетворювач базується на концепції програмованих систем на кристалі PSoC та забезпечує можливість формування сімейства сигналів для проведення вбудованої in-situ самодіагностики.

Ключові слова: ємнісний сенсор, програмно-керований перетворювач, PSoC, SPICE моделювання, самодіагностика.

**HRYHORII BARYLO, MYKOLA BRYCH, DENYS MARKIV, MYKOLA VOVK,
ANDRII HRYNCHYSHYN**

Lviv Polytechnic National University

SOFTWARE-CONTROLLED MEASUREMENT CONVERTER FOR CAPACITIVE SENSORS

This study focuses on the development and implementation of a software-controlled measurement converter for capacitive sensors. The system addresses critical challenges in modern sensor technology, particularly the temporal and temperature instability of capacitive measurements and the significant influence of external factors on measurement results. This is especially crucial in chemical and biochemical analysis applications, where the measured changes in capacitive parameters can be extremely small (10^{-15} ... 10^{-13} F), making them highly susceptible to interference from external objects (10^{-12} ... 10^{-11} F).

The developed converter is based on the PSoC (Programmable System-on-Chip) architecture, implementing the SCC (Switched Capacitor Circuits) approach for coulometric measurement conversion. The system features programmable control modes that generate multiple signal families, enabling built-in in-situ self-diagnostics. This functionality allows for the detection and analysis of parasitic influences from external factors on measurement results. The design incorporates comprehensive SPICE modeling methods to optimize signal path parameters and enhance measurement stability.

The research presents practical implementation results using the PSoC 5LP platform, demonstrating the system's capability to perform multi-stage integration and signal processing. The converter includes features such as programmable gain amplification, high-resolution analog-to-digital conversion (both SAR and Delta-Sigma types), and active shielding capabilities. Experimental results validate the effectiveness of the proposed approach in improving measurement accuracy and reliability in capacitive sensor applications. This work contributes to advancing sensor technology by providing a robust, programmable solution for precise capacitive measurements in challenging environments.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В даній роботі досліджується проблема підвищення точності функціонування ємнісних сенсорів, яка обумовлена їх часовою та температурною нестабільністю, а також значним впливом сторонніх факторів на результат вимірювання. Особливої актуальності ця проблема набуває в ємнісних сенсорах хімічного та біохімічного аналізу, де вимірювана зміна інформативного параметру характеризується гранично малими значеннями.

Вирішення цієї проблеми традиційними методами є складним через непередбачувану зміну впливу сторонніх об'єктів у часі, що унеможливорює врахування цих змін у процесі вимірювання сигналу. Це обумовлює необхідність розробки нових підходів до побудови вимірювальних перетворювачів ємнісних сенсорів.

Дане дослідження спрямоване на розширення функціональності вимірювальних

перетворювачів ємнісних сенсорів шляхом реалізації програмно-керованих режимів формування сімейства сигналів. Такий підхід забезпечує можливість проведення вбудованої in-situ самодіагностики для встановлення паразитних впливів сторонніх факторів на результат вимірювального перетворення. Основна увага приділяється використанню методів SPICE моделювання та реалізації вимірювальних перетворювачів в концепції програмованих систем на кристалі PSoC, що дозволяє оптимізувати параметри сигнального тракту та підвищити стабільність вимірювань.

Аналіз досліджень та публікацій

Сучасні дослідження в галузі ємнісних сенсорів охоплюють широкий спектр застосувань: від керамічних датчиків вологості з пористих плівок перовскіту [1] до гнучких матриць тактильних датчиків для діагностики пульсу [2]. Особлива увага приділяється розробці ємнісних сенсорів тиску з використанням новітніх технологій друку [3] та спеціалізованих мікрохвильових сенсорів [4]. Ці інноваційні розробки відкривають нові можливості для створення інтелектуальних систем моніторингу та контролю в різних галузях промисловості та медицини.

Ключовою проблемою ємнісних сенсорів залишається їх часова та температурна нестабільність, а також чутливість до зовнішніх впливів. Ці фактори суттєво впливають на точність та надійність вимірювань, що обумовлює необхідність подальшого вдосконалення методів та засобів вимірювального перетворення. Сучасні тенденції розвитку сенсорної електроніки спрямовані на створення вимірювальних перетворювачів на основі вбудованих систем [5, 6] з розширеною функціональністю змішаного сигнального перетворення. Особливо ефективним є використання програмованих систем на кристалі PSoC [7], які забезпечують високу гнучкість конфігурування та можливість адаптації до різних умов експлуатації.

Значна увага приділяється розробці програмно-керованих систем вимірювального перетворення ємності [8], які дозволяють не лише підвищити точність вимірювань, але й забезпечити додаткові функціональні можливості, такі як самодіагностика, калібрування та компенсація впливу зовнішніх факторів. Оптимізація таких систем здійснюється за допомогою SPICE-моделювання, що дає можливість проводити комплексний аналіз електромагнітних процесів та досліджувати вплив різноманітних факторів на роботу сенсорних систем [9, 10]. Такий комплексний підхід до розробки та оптимізації ємнісних сенсорних систем, що поєднує використання сучасних програмованих платформ та передових методів моделювання, створює основу для подальшого розвитку цього напрямку сенсорної електроніки та розширення сфер її практичного застосування.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення програмно-керованого вимірювального перетворювача ємнісних сенсорів, новизною якого є розширена функціональність на основі формування сімейства сигналів для проведення вбудованої in-situ самодіагностики, що забезпечує можливість виявлення паразитних впливів сторонніх факторів на результат вимірювального перетворення.

Виклад основного матеріалу

У загальному випадку похибки вимірювального перетворення, що відображають залежність сигналу S від зміни вимірюваної ємності DC , можна класифікувати на чотири основні складові: мультиплікативну, адитивну, нелінійну та обмеження динамічного діапазону. При розробці вбудованих систем ємнісних smart сенсорів з функцією in-situ самодіагностики важливо забезпечити можливість не тільки виявлення нестабільності роботи сигнального тракту, але й визначення природи виникаючих похибок.

Характерні форми сигналів у перетворювачах інтегруючого типу, які широко застосовуються в сучасній схемотехніці, проілюстровані на рис. 1, а. Найпростіша форма інтегрування (Int 1) представляє собою монотонно наростаючу функцію. Більш практичний підхід (Int 2) включає три послідовні фази: наростання (заряд), утримання та спадання (розряд). Особливо ефективним для ємнісних сенсорів є алгоритм мультистадійного інтегрування (Int 3), де фази заряду та утримання циклічно повторюються згідно з визначеним алгоритмом вимірювання.

На рис. 1, б представлено аналіз типових похибок при багаторазових вимірюваннях сигналу S в часі. Виділяють три характерні типи нестабільностей:

Тип N1 - природна невідтворюваність сигналу, яка завжди присутня при багаторазових вимірюваннях. Її характеризують через параметри шуму або співвідношення сигнал-шум. Джерелами такої нестабільності є теплові процеси, спонтанні відхилення режимів вимірювання (флікер-шум) та електромагнітні завади.

Тип N2 - часовий дрейф, що проявляється у вигляді поступового наростання або спадання значень вимірювань протягом тривалого часу. Основною причиною такої нестабільності є зміна умов вимірювання, особливо температурна релаксація.

Тип N3 - раптові значні відхилення сигналів, що найчастіше виникають через паразитний вплив сторонніх об'єктів на ємнісну структуру або лінію передачі сигналу.

Особливої уваги заслуговує третій тип нестабільностей, який створює найбільші проблеми для забезпечення точності роботи ємнісних сенсорів. Критичність впливу сторонніх об'єктів обумовлена двома основними факторами. По-перше, у багатьох ємнісних сенсорах, що використовуються для хімічного та біохімічного аналізу, інформативна зміна параметру є надзвичайно малою - порядку 10^{-6} .

$10^{-15} \dots 10^{-13}$ Ф, що на кілька порядків менше за паразитний вплив сторонніх об'єктів, який досягає значень $10^{-12} \dots 10^{-11}$ Ф. По-друге, характер зміни цього впливу в часі є непередбачуваним, що унеможливило його врахування та компенсацію в процесі вимірювання.

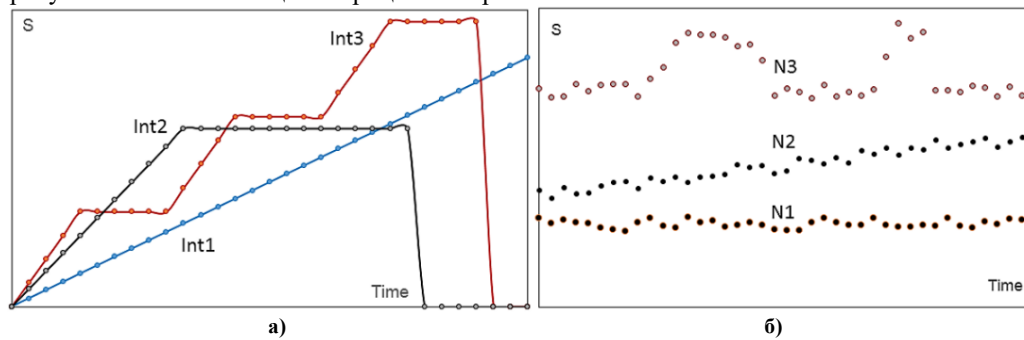


Рис. 1. Типові форми сигналів (а) на їх нестабільність (б) у вимірювальних перетворювачах інтегруючого типу

Комплекс описаних проблем, пов'язаних з нестабільністю функціонування ємнісних сенсорів, та обмеженість традиційних методів підвищення точності вимірювань, визначають актуальність та важливість дослідницьких завдань, що розглядаються в даній роботі. Необхідність розробки нових підходів до вирішення цих проблем стає особливо важливою для подальшого розвитку та вдосконалення ємнісних сенсорних систем.

У більшості ємнісних сенсорів формування інформативного сигналу здійснюється за допомогою схем типу SCC (Switched Capacitor Circuits), які базуються на кулонометричному методі вимірювального перетворення. Базова конфігурація такої схеми (представлена на рис. 2, а) включає вимірюваний конденсатор C_X , інтегруючий конденсатор C_{INT} , систему аналогових комутаторів SW та джерело опорної напруги V_E . Принцип роботи полягає в наступному: спочатку інтегруючий конденсатор перебуває в розрядженому стані з нульовою напругою, потім відбувається заряд вимірюваного конденсатора C_X до рівня опорної напруги V_E , після чого накопичений заряд передається на C_{INT} . Цей цикл заряду-розряду повторюється визначену кількість разів відповідно до алгоритму вимірювання. Ключовим інформативним параметром є напруга V_{OUT} на конденсаторі C_{INT} , а характеристики передачі заряду визначаються процесами його перерозподілу. Керування комутацією здійснюється двофазними періодичними імпульсами P_1 та P_2 , які працюють у протифазі: коли $P_1 = 0$, то $P_2 = 1$, і навпаки.

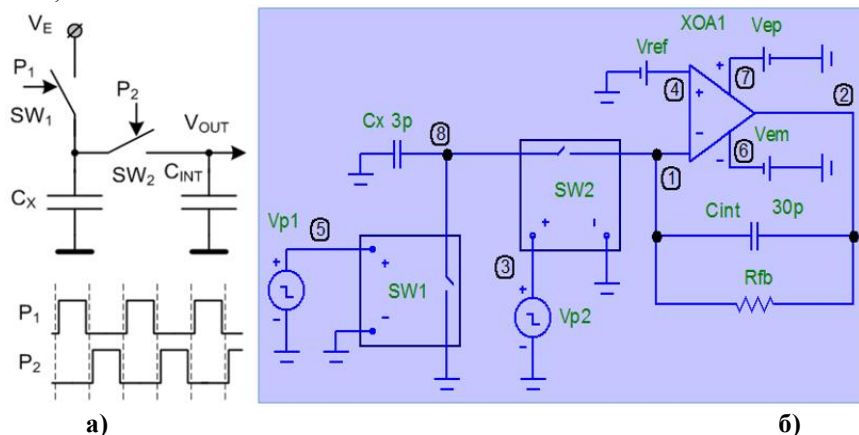


Рис. 2. Елементарна схема (а) та SPICE модель розвинутою схеми (б) вимірювального перетворення типу SCC

Більш досконала реалізація SCC-схеми (показана на рис. 2, б) доповнюється активним інтегратором заряду. Окрім базових компонентів - вимірюваного конденсатора C_X та комутаторів SW_1 , SW_2 - схема включає інтегратор на операційному підсилювачі OA . В колі негативного зворотного зв'язку OA встановлено інтегруючий конденсатор C_{INT} та резистор R_{FB} (номіналом близько 1 МОм) для стабілізації роботи підсилювача за постійним струмом.

Результати SPICE-моделювання роботи SCC-перетворювача для різних значень вимірюваної ємності ($C_X = 0, 1, 3, 4$ пФ) представлені на рис. 3. Аналіз показує наявність декількох характерних часових інтервалів у процесі формування сигналу. Їх тривалість залежить від множини факторів: параметрів комутації, швидкості наростання вихідної напруги інтегратора та інших перехідних процесів. Точність вимірювань суттєво погіршується через нестабільність цих процесів, вплив паразитних ємностей сенсора та електромагнітних завад. Порівняння результатів моделювання без урахування (рис. 3, а) та з урахуванням (рис. 3, б) дестабілізуючих факторів демонструє значні відмінності, що підкреслює важливість їх врахування при проектуванні вимірювальних систем.

На основі проведеного аналізу похибок сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорів та результатів моделювання постає необхідність розробки вдосконаленого вимірювального

перетворювача з розширеними функціональними можливостями. Такий перетворювач дозволить проводити експериментальні дослідження нестабільності вимірювань, оптимізувати режими роботи та здійснювати верифікацію SPICE моделей. Узагальнена характеристика нестабільностей представлена на рис. 4, де сигнальне перетворення інтегруючого типу характеризується амплітудами вихідних імпульсів напруги A1, A2, A3 та трьома часовими фазами: початковою (t_1), фазою наростання напруги інтегратора (t_2) та фазою фіксації заряду з утриманням вихідної напруги (t_3). Ефективність вимірювального перетворення оцінюється за параметром стабільності приростів напруг dV , що дозволяє кількісно охарактеризувати точність та надійність вимірювальної системи в різних режимах роботи.

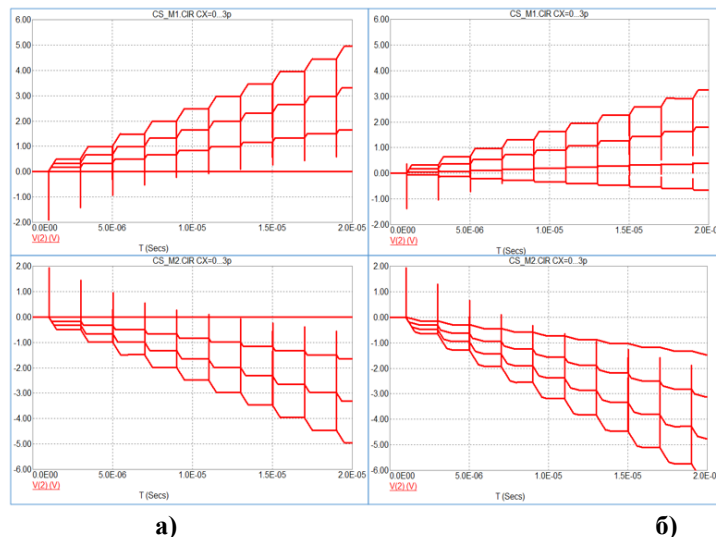


Рис. 3. Результати SPICE модельних досліджень без врахування (а) та з врахуванням (б) дестабілізуючих факторів

Сигнальний тракт інноваційного програмно-керованого вимірювального перетворювача ємнісних сенсорів iCAP SES (Sensor Embedded System) базується на програмованій системі на кристалі PSoC 5LP від компанії Cypress (Infineon Technologies). Макетний зразок перетворювача iCAP SES у процесі налагодження та тестування можна побачити на рис. 4. Ця реалізація дозволяє поєднати гнучкість програмного керування з надійністю апаратного забезпечення, забезпечуючи оптимальну продуктивність та точність вимірювань.

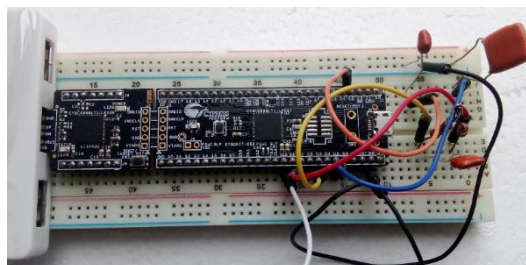


Рис. 4. Макет вимірювального перетворювачі

Головним елементом фронт-енду сигнального тракту (рис. 5) є операційний підсилювач Орамп_1, який спільно з аналоговими комутаторами AMux_CX, AMux_CA, AMux_C0 та конденсатором CINT здійснює мультитактне інтегрування струму заряду вимірюваного конденсатора CX. Для збільшення динамічного діапазону сигнал далі підсилюється на програмованому інвертуючому підсилювачі PGA_Inv_1. Під час мультитактного інтегрування вихідні напруги Vout_1 (з інтегратора) та Vout_2 (з інвертуючого підсилювача) оцифровуються двома 12-бітними АЦП послідовного наближення (ADC_SAR_1 та ADC_SAR_2). Додатково, для підвищення роздільної здатності кінцевого сигналу, різниця напруг Vout_1 - Vout_2 оцифровується дельта-сигма АЦП з роздільною здатністю 16-20 біт, де вибір конкретного значення залежить від балансу між точністю та швидкістю системи. Така архітектура сигнального тракту забезпечує оптимальне поєднання швидкості вимірювання та точності перетворення, дозволяючи системі ефективно працювати з широким діапазоном входних ємностей та забезпечувати стабільні результати вимірювань навіть за наявності зовнішніх завад та паразитних впливів.

Додатково до основного сигнального тракту схема вимірювального перетворювача включає неінвертуючий підсилювач PGA_AS з програмованим коефіцієнтом підсилення для формування кола активного екранування та ЦАП VDACC8 для калібрування та налагодження системи. Обмін даними, включаючи керуючі команди та результати вимірювань, здійснюється через асинхронний інтерфейс UART.

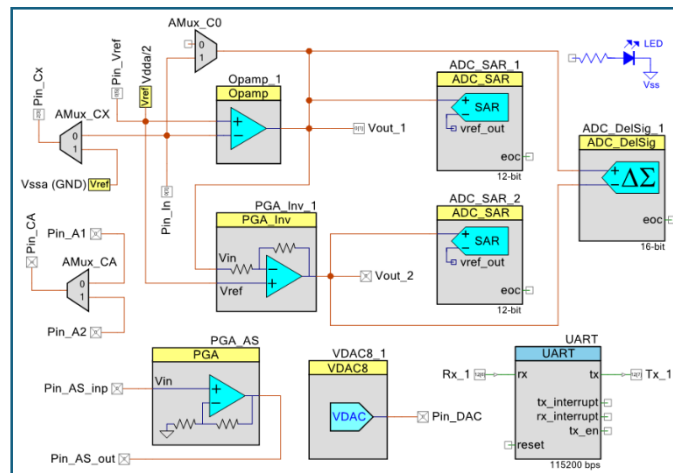


Рис. 5. Компоненти сигнального тракту на основі PSoC 5LP

Для формування режимів програмно-керованого вимірювального перетворення, розширення можливостей дослідження нестабільностей в процесі формування сигналів та відображення отримуваних даних розроблено програмний застосунок iCAP SCS (Sensor Control Software) (рис. 6).

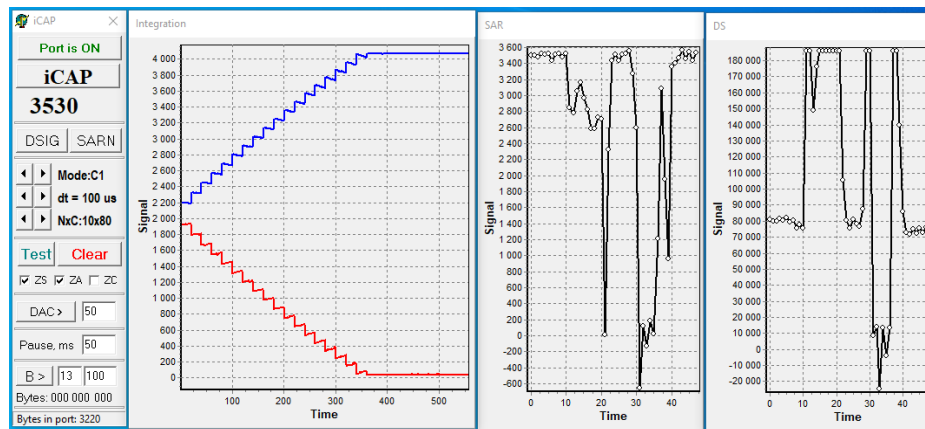


Рис. 6. Вікна програмного застосунку iCAP SCS

Його перше вікно iCAP забезпечує широкий набір керування режимами вимірювання, друге вікно Integration – відображає швидкі процеси формування сигналів в процесі багатотактного інтегрування, третє вікно SAR – результати вимірювання з використанням SAR ADC, а четверте DS результати вимірювання з використанням DelSig ADC.

Використовуючи ці компоненти програмного керування режимами роботи та розширені функції дослідження процесів формування сигналів проводять оптимізацію процесів вимірювального перетворення.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі розроблено програмно-керований вимірювальний перетворювач ємнісних сенсорів, який реалізує концепцію програмованих систем на кристалі PSoC. Новизною розробки є можливість формування сімейства сигналів для проведення вбудованої in-situ самодіагностики, що дозволяє виявляти паразитні впливи сторонніх факторів на результат вимірювального перетворення. Експериментальні дослідження макету вимірювального перетворювача iCAP SES підтвердили ефективність запропонованого підходу. Розроблений програмний застосунок iCAP SCS забезпечує широкі можливості керування режимами роботи та дослідження процесів формування сигналів. Отримані результати дозволяють оцінити характер нестабільностей вимірювального перетворення та оптимізувати його параметри.

Автори висловлюють щире вдячність Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку цього дослідження (грант «Органічний пристрій із внутрішнім підсиленням фотоструму для реєстрації слабких сигналів у близькій інфрачервоній області спектра», № 0123U101690).

Література

1. Farahani, H., Wagiran, R., & Urban, G. A. (2020). Capacitive properties of ceramic humidity sensors made from porous perovskite films. 2020 IEEE Sensors, Rotterdam, Netherlands, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278628>

2. Akbarzadeh, S., Shirsavar, R., Torkaman, R., Esfandiarpour, S., Mehran, M., & Alimardani, M. (2022). A simple fabrication, low noise, capacitive tactile sensor for use in inexpensive and smart healthcare systems. *IEEE Sensors Journal*, 22(9), 9069–9077. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3159610>
3. Yu, J., Yu, H., Zhou, P., Zou, W., & Liu, L. (2019). Fabrication of a flexible capacitive pressure sensor using full inkjet printing. *2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Suzhou, China, 598–603. <https://doi.org/10.1109/CYBER46603.2019.9066749>
4. Yan, H., & Liao, X. (2015). The high power up to 1 W characteristics of the capacitive microwave power sensor with grounded MEMS beam. *IEEE Sensors Journal*, 15(12), 6765–6766. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2466462>
5. Peng, J.-Y., & Lu, M. S.-C. (2015). A flexible capacitive tactile sensor array with CMOS readout circuits for pulse diagnosis. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 1170–1177. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360777>
6. Барило, Г. І., Голяка, Р. Л., Адам'як, О. А., Савицький, А. В., & Шкрибінець, В. В. (2024). Мультифункціональний перетворювач сигналів ємнісних сенсорів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, (341)(5), 182–188.
7. Fouad, H., & Kamel, H. (2021). A proposed end-to-end telemedicine system based on embedded system and mobile application using CMOS wearable sensors. *2021 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)*, Alexandria, Egypt, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITC-Egypt52936.2021.9513888>
8. Czaja, Z. (2007). Using a square-wave signal for fault diagnosis of analog parts of mixed-signal embedded systems controlled by microcontrollers. *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, Warsaw, Poland, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2007.379196>
9. Mosin, S. (2018). Entropy-based method of reducing the training set dimension at constructing a neuromorphic fault dictionary for analog and mixed-signal ICs. *2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro, 1–4. <https://doi.org/10.1109/MECO.2018.8406093>
10. Singha, S., Singh, A. S., Prasad, S., & Alam, A. (2019). A study on power optimization techniques in PSoC. *2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, India, 225–229. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2019.8698070>

References

1. Farahani, H., Wagiran, R., & Urban, G. A. (2020). Capacitive properties of ceramic humidity sensors made from porous perovskite films. *2020 IEEE Sensors*, Rotterdam, Netherlands, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSOR547125.2020.9278628>
2. Akbarzadeh, S., Shirsavar, R., Torkaman, R., Esfandiarpour, S., Mehran, M., & Alimardani, M. (2022). A simple fabrication, low noise, capacitive tactile sensor for use in inexpensive and smart healthcare systems. *IEEE Sensors Journal*, 22(9), 9069–9077. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3159610>
3. Yu, J., Yu, H., Zhou, P., Zou, W., & Liu, L. (2019). Fabrication of a flexible capacitive pressure sensor using full inkjet printing. *2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Suzhou, China, 598–603. <https://doi.org/10.1109/CYBER46603.2019.9066749>
4. Yan, H., & Liao, X. (2015). The high power up to 1 W characteristics of the capacitive microwave power sensor with grounded MEMS beam. *IEEE Sensors Journal*, 15(12), 6765–6766. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2466462>
5. Peng, J.-Y., & Lu, M. S.-C. (2015). A flexible capacitive tactile sensor array with CMOS readout circuits for pulse diagnosis. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 1170–1177. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360777>
6. Барило, Г. І., Голяка, Р. Л., Адам'як, О. А., Савицький, А. В., & Шкрибінець, В. В. (2024). Мультифункціональний перетворювач сигналів ємнісних сенсорів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, (341)(5), 182–188.
7. Fouad, H., & Kamel, H. (2021). A proposed end-to-end telemedicine system based on embedded system and mobile application using CMOS wearable sensors. *2021 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)*, Alexandria, Egypt, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITC-Egypt52936.2021.9513888>
8. Czaja, Z. (2007). Using a square-wave signal for fault diagnosis of analog parts of mixed-signal embedded systems controlled by microcontrollers. *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, Warsaw, Poland, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2007.379196>
9. Mosin, S. (2018). Entropy-based method of reducing the training set dimension at constructing a neuromorphic fault dictionary for analog and mixed-signal ICs. *2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro, 1–4. <https://doi.org/10.1109/MECO.2018.8406093>
10. Singha, S., Singh, A. S., Prasad, S., & Alam, A. (2019). A study on power optimization techniques in PSoC. *2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, India, 225–229. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2019.8698070>