

**БАРИЛО ГРИГОРІЙ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-5749-9242>e-mail: [hryhorii.i.barylo@lpnu.ua](mailto:hryhorii.i.barylo@lpnu.ua)**ГОЛЯКА РОМАН**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-7720-0372>e-mail: [roman.l.holiaka@lpnu.ua](mailto:roman.l.holiaka@lpnu.ua)**АДАМ'ЯК ОЛЕГ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6290-6516>e-mail: [oleh.a.adamiak@lpnu.ua](mailto:oleh.a.adamiak@lpnu.ua)**САВИЦЬКИЙ АНДРІЙ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0009-0746-2463>e-mail: [andrii.v.savvitskiy@lpnu.ua](mailto:andrii.v.savvitskiy@lpnu.ua)**ШКРІБИНЕЦЬ ВІТАЛІЙ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0008-3416-2039>e-mail: [vitalii.v.shkribynets@lpnu.ua](mailto:vitalii.v.shkribynets@lpnu.ua)

## МУЛЬТИФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ СИГНАЛІВ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ

В роботі наведено результати досліджень сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорів, в яких використовується аналіз додаткових параметрів, які безпосередньо впливають на результати вимірювань. Багатофункціональність перетворювача сигналів реалізується за допомогою комутованих конденсаторних схем, які реалізують кулонометричний метод вимірювання. Запропоновано алгоритми керування комутацією таких схем для введення додаткових режимів вимірювання, які виявляють дестабілізуючі фактори, такі як паразитні ємності та вплив зовнішніх об'єктів, що можуть впливати на точність сигнального перетворення.

Ключові слова: ємнісний сенсор, багатофункціональний перетворювач сигналів, SPICE-модель, PSoC, комутовані конденсаторні схеми.

BARYLO HRYHORII, HOLIAKA ROMAN, ADAMIAK OLEH, SAVYTSKYI ANDRII,  
SHKRIBYNETS VITALII  
Lviv Polytechnic National University

## MULTIFUNCTIONAL SIGNAL CONVERTER FOR CAPACITIVE SENSORS

This paper presents the results of research on signal converters for capacitive sensors, focusing on the analysis of additional parameters that directly influence measurement outcomes. The study addresses the problem of limited functionality in traditional signal converters, which often leads to reduced accuracy and reliability in measurements. To overcome this limitation, a new multifunctional operating mode is proposed, enabling the formation of additional signal families. These signal families not only allow for measurements but also perform self-diagnostics and detect parasitic interactions, significantly improving the reliability of the measurement results. A thorough review of existing research on capacitive sensors and their signal converters is provided, highlighting key advancements in impedance measurement systems and the impact of various materials on sensor performance. The development of specialized signal conversion circuits, aiming to expand the functionality and enhance the accuracy of capacitive sensor measurements, is emphasized. The core of the proposed solution lies in the use of switched capacitor circuits (SCC), which implement a coulometric measurement method. The basic circuit structure includes a measured capacitor, an integrating capacitor, a set of analog switches, and a reference voltage source. The signal conversion process involves the periodic charging and discharging of the measured capacitor, followed by the transfer of charge to the integrating capacitor. The system operates in multiple phases, controlled by corresponding switch signals, enabling accurate measurement of the output voltage. The multifunctional nature of the signal converter is realized through specific control algorithms, which modulate the switching process to introduce additional measurement modes. These modes include various signal processing techniques that detect destabilizing factors, such as parasitic capacitances and external object influences, which can affect the sensor's accuracy. By employing extended SPICE models of the sensor's capacitive structure, the system accounts for the complex reactive components and parasitic effects within both the sensor and its signal pathways. The research demonstrates the practical implementation of the multifunctional signal converter using a Programmable System-on-Chip (PSoC) architecture. The experimental studies validate the proposed approach, showing high linearity in the output signal under ideal conditions and effective compensation for destabilizing influences in non-ideal environments. The developed signal converter also supports several diagnostic modes, allowing for the detection of noise and DC offset in the measurement circuit, which further enhances the measurement accuracy.

Keywords: capacitive sensor, multifunctional signal converter, SPICE model, PSoC, switched capacitor circuits.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У цій статті ми досліджуємо проблему обмеженої функціональності сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорів. Ця проблема є важливою, тому що вона призводить до зниження точності та надійності вимірювань. Дане дослідження спрямоване на вирішення цієї проблеми шляхом розробки нового

мультифункціонального режиму роботи сигнальних перетворювачів. Цей режим передбачає формування додаткових сімейств сигналів, які дозволяють не лише проводити вимірювання, але й здійснювати самодіагностику та виявляти паразитні взаємозв'язки, завдяки чому підвищується достовірність результатів вимірювання.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Тематика ємнісних сенсорів та їх сигнальних перетворювачів в сучасних наукових публікаціях представлена широким рядом робіт. Це зокрема: багатоканальна система вимірювання імпедансу на основі автоматичного обнулення для ємнісних сенсорів [1]; друковані та гнучкі ємнісні сенсори тиску для м'якої робототехніки [2]; вплив діелектрика та жорсткості м'якого матеріалу між електродами ємнісного сенсора тиску на ефективність його функціонування [3]; дослідження тонких гнучких інтегрованих ємнісних сенсорів тиску в масивах тактильних датчиків для використання в робототехніці та протезуванні [4]; алгоритм корекції перехресних перешкод для панелей ємнісних сенсорів [5].

Враховуючи тенденції розвитку сучасної мікроелектронної сенсорики, і зокрема в концепції Інтернету речей, значною актуальністю характеризуються реалізації сенсорних пристроїв на основі вбудованих систем [6, 7], визначальною особливістю яких є змішане сигнальне перетворення (Mixed-Signal) [8, 9]. Максимальний ефект з точки зору ефективності процесу розроблення, можливості реконфігурування та мініатюризації сенсорних пристроїв забезпечується в концепції програмованих систем на кристалі PSoC (Programmable System-on-Chip) [10, 11]. Відтак, значна увага приділяється задачам розроблення спеціалізованих схем сигнальних перетворювачів, що направлені на задачі розширення функціональності та підвищення точності вимірювання ємності чутливої структури сенсора [12, 13].

Вирішення цих задач потребує поглибленого функціонального аналізу та параметричної оптимізації сигнальних кіл вимірювальних перетворювачів. В свою чергу, це передбачає використання модельних досліджень, зокрема, на основі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) моделей. Приклади розроблення та використання таких моделей представлені зокрема роботами: розширення можливостей інструментів аналізу електротермічного SPICE моделювання силових електронних схем [14]; розроблення SPICE моделі силового MOSFET [15]; аналітична модель великого сигналу та SPICE модель плазмонного польового транзистора [16].

У відповідності до вищезгаданих напрямків розвитку сенсорики та вимог до їх реалізації, в роботі використано методи SPICE моделювання, а реалізація сигнальних перетворювачів здійснена в концепції програмованих систем на кристалі PSoC.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** дослідження моделей сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорів в мультифункціональному режимі роботи та їх практична реалізація на основі PSoC.

#### Виклад основного матеріалу

В основі запропонованого мультифункціонального сигнального перетворення ємнісних сенсорів лежить схема на перемикальних конденсаторах SCC (Switched Capacitor Circuits), що реалізує кулонометричний метод вимірювання (рис. 1а). Елементарна схема такого типу містить вимірюваний конденсатор  $C_X$ , інтегруючий конденсатор  $C_{INT}$ , набір аналогових комутаторів  $SW$  та джерело опорної напруги  $V_E$ . Компоненти  $SW$  – це Rail-to-Rail аналогові комутатори з прицевійним (безвтратним) передаванням струму. Їх реалізують в базисі CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) з вбудованими колами бустерного перемикавання, що забезпечує високу провідність каналу транзисторів при доволі невисоких напругах їх керування (напругами на затворах транзисторів).

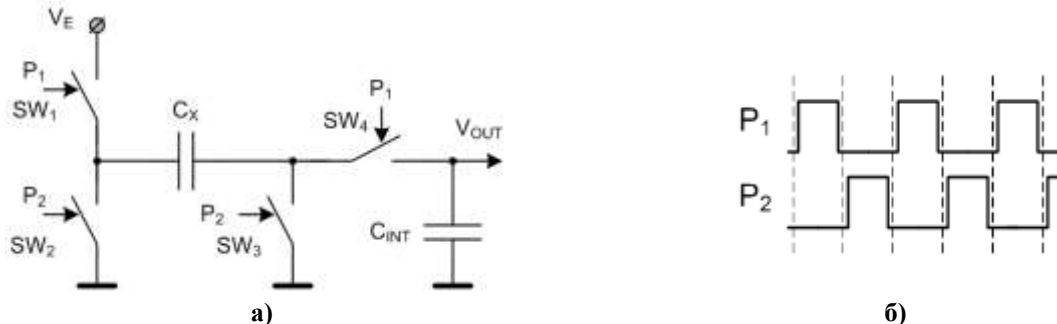


Рис. 1. Перетворювач на перемикальних конденсаторах SCC: а) – електрична схема; б) – діаграма імпульсів керування

В початковій стадії інтегруючий конденсатор розряджений і напруга на ньому рівна нулю. Заряд вимірюваного конденсатора  $Q(C_X)$  чутливої структури ємнісного сенсора відбувається в колі опорної напруги  $V_E$ . Далі накопичений на конденсаторі  $C_X$  електричний заряд передається на інтегруючий конденсатор  $C_{INT}$ . Процеси заряду  $C_X$  та його розряду в колі інтегруючого конденсатора  $C_{INT}$  проводяться певну кількість раз (визначається алгоритмом вимірювання). Параметри передавання заряду визначаються процесами перерозподілу накопиченого заряду. Інформативними параметрами вимірювального перетворення є напруга  $V_{OUT}$  на конденсаторі  $C_{INT}$ .

Вимірювальне перетворення передбачає двофазне багатотактне (періодичне) перемикавання у

відповідності до імпульсів керування  $P_1, P_2$  (рис. 1б) з півперіодним зміщенням: if  $P_1 = 0$  then  $P_2 = 1$ ,  $P_1 = 1$  then  $P_2 = 0$ . В першій фазі замкнені комутатори  $SW_1$  та  $SW_3$ . Натомість, комутатори  $SW_2$  та  $SW_4$  – розімкнені. Відбувається заряд вимірюваного конденсатора  $Q(C_X) = C_X \cdot V_E$ . Далі, у другій фазі, усі комутатори перемикаються у протилежний стан, що забезпечує перерозподіл накопиченого заряду між  $C_X$  та  $C_{INT}$ .

**Мультифункціональний режим формування сімейства сигналів**

Перетворювач на перемикальних конденсаторах використано для реалізації мультифункціональних режимів формування сімейства сигналів за якими визначається вплив дестабілізуючих факторів на результат вимірювання. Мультифункціональність забезпечується відповідними алгоритмами керування комутаторами, перемикання яких (табл. 1) реалізує відповідні модифікації кулонометричного методу вимірювання.

Аналіз параметрів такої схеми передбачає використання розширеної SPICE моделі ємнісної структури сенсора  $C_{XP}$ , в якій враховані компоненти комплексного реактивного опору (ємнісна, омична та індуктивна складові) та паразитні впливи G&O (Ground & Object), як в самій структурі первинного перетворювача, так і в сигнальних колах (кабелях) та комутаторах. SPICE модель модифікованої схеми сигнального перетворення симетричної структури ємнісного сенсора, що відтворює мультифункціональні режими формування сімейства сигналів, наведена на рис. 2.

Позначення  $P_{S1}, P_{S2}, P_{S3}, P_{S4}$  відповідають сигналам керування комутаторів  $SW_1, SW_2, SW_3, SW_4$ , позначення  $P_1, P_2$  – сигналам генераторів періодичних імпульсів з півперіодним зміщенням: if  $P_1 = 1$  then  $P_2 = 0$ , if  $P_2 = 1$  then  $P_1 = 0$  (зокрема, реалізується джерелами імпульсів напруги  $V_{p1}, V_{p2}$ ), позначення 0 та 1 – логічні рівні, при яких комутатори розімкнені (0) чи замкнені (1). Кількість тактів інтегрування визначаються алгоритмом вимірювання та реалізується відповідною кількістю імпульсів  $P_1, P_2$ .

Запропонований в даній роботі мультифункціональний алгоритм керування забезпечує реалізацію шести режимів Mode #SM сигнального перетворення. Перший (Mode #SM1) та другий (Mode #SM2) режими реалізують мультитактний заряд-розряд вимірюваного конденсатора  $C_X$  з переносом заряду в коло інтегрування на конденсаторі  $C_{INT}$ . Саме ці два режими забезпечують вимірювальне перетворення сенсорного пристрою, причому Mode #SM1 формує наростаючі (додатні), а Mode #SM2 - спадаючі (від’ємні) імпульси напруги сигнального перетворювача. В ідеалізованих умовах, тобто, без паразитних ємностей та впливу сторонніх об’єктів на сигнальне коло, ці режими можна умовно представити ефектом дзеркальності.

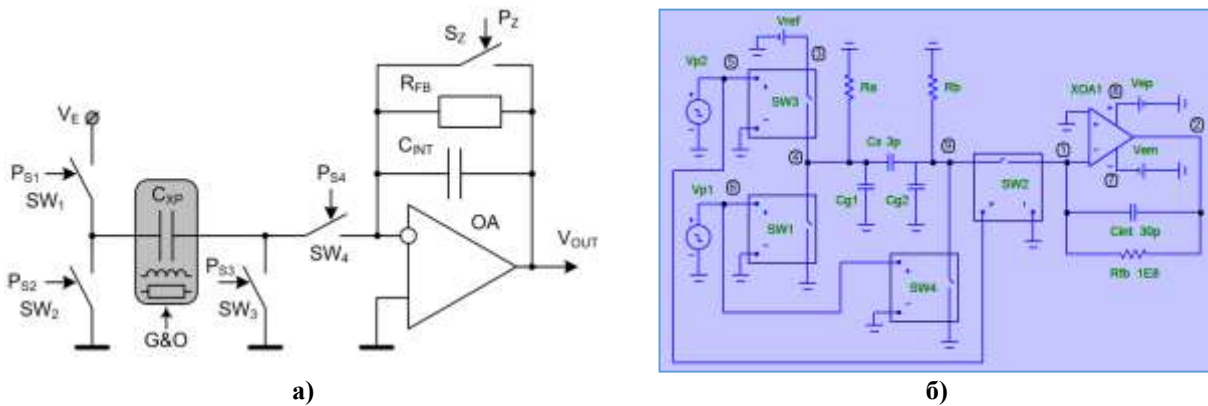


Рис. 2. Сигнальний перетворювач ємності: а) – електрична схема; б) –SPICE модель

Приклади результатів дослідження процесів сигнального перетворення в цих режимах наведено на рис.3. Дослідження проводилися для чотирьох значень ємності вимірюваного конденсатора  $C_X = 0, 1, 2, 3$  E-12 Ф в ідеалізованих умовах вимірювального перетворення.

Таблиця 1

Стан комутаторів відповідно до режиму вимірювання				
Режим	$P_{S1}$	$P_{S2}$	$P_{S3}$	$P_{S4}$
Mode#SM1	$P_2$	$P_2$	$P_1$	$P_1$
Mode #SM2	$P_1$	$P_2$	$P_2$	$P_1$
Mode #SM3	$P_1$	$P_2$	0	1
Mode #SM4	0	1	0	1
Mode #SM5	0	0	0	1
Mode #SM6	0	0	1	1

Можна бачити відсутність зміни вихідного сигналу (напруга у вузлі V(2)) при нульовому значенні вимірюваної ємності  $C_X = 0$  та високу лінійність залежності динаміки зміни вихідного сигналу (наростання в Mode #SM1 та спадання в Mode #SM2 вихідної напруги) в процесі процесі мультитактного вимірювального перетворення.

Поєднання режимів Mode #SM1 та Mode #SM2 реалізує дві суттєві переваги. По-перше, забезпечується можливість підвищення чутливості вимірювального перетворення, що обумовлюється підвищенням роздільної здатності подальшого аналого-цифрового перетворення. Це пояснюється формуванням двох сигналів з

протилежними полярностями, що вдвічі розширює динамічний діапазон вихідного сигналу. По-друге, і це є визначальним з точки зору вирішуваних задач вбудованої самодіагностики, забезпечується можливість виявляти паразитний дрейф вимірювального перетворення, що обумовлений дією дестабілюючих факторів. Знаючи цей дрейф, реалізується можливість корекції результату вимірювання. Це відбувається в подальших етапах інтелектуального (smart) вимірювання і реалізується на рівні програмного коду вбудованої системи ємнісного сенсора.

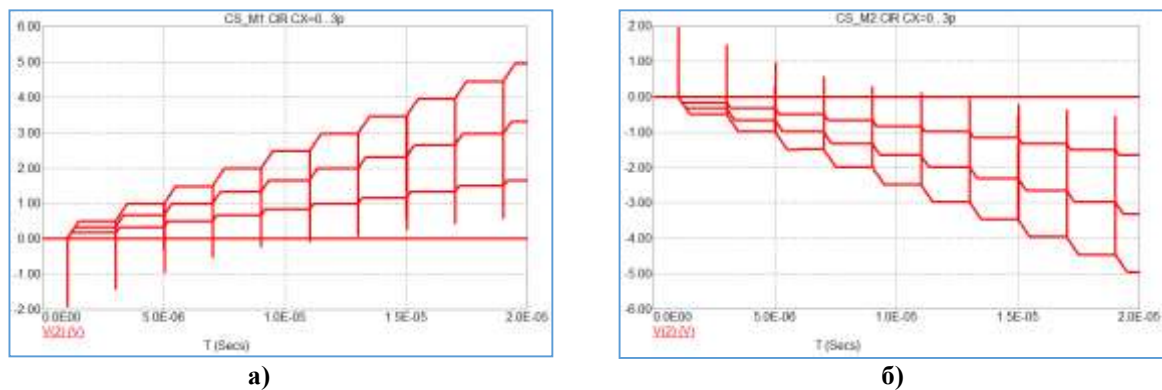


Рис. 3. Діаграми вихідної напруги сигнального перетворювача в ідеалізованих умовах: а) – режимі Mode #SM1; б) – в режимі Mode #SM2

Приклади результатів дослідження процесів сигнального перетворення в умовах дестабілізації наведено на рис. 4. Можна бачити відхилення від вищезгаданого ефекту дзеркальності, тобто, дестабілізуючі фактори обумовлюють різний вплив на результат інтегрування. В ході проведення відповідного набору модельних та експериментальних досліджень встановлюють закономірності впливу тих чи інших дестабілізуючих факторів та використовують ці закономірності в процесі корекції результату інтелектуального вимірювання.

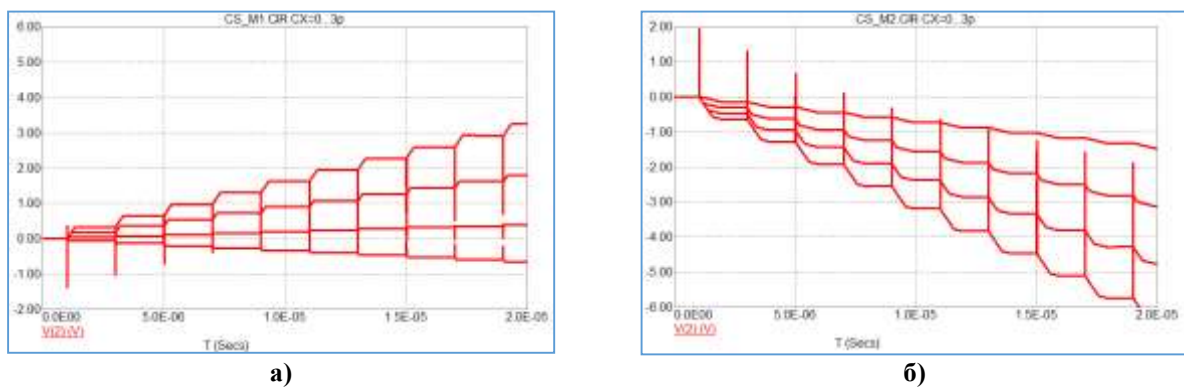


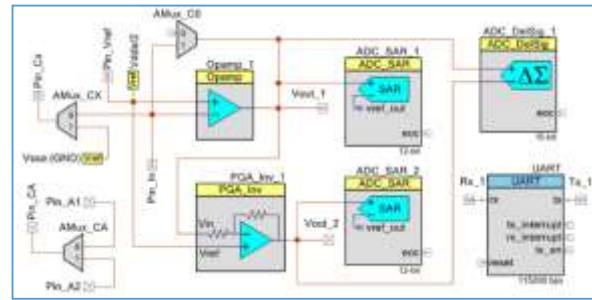
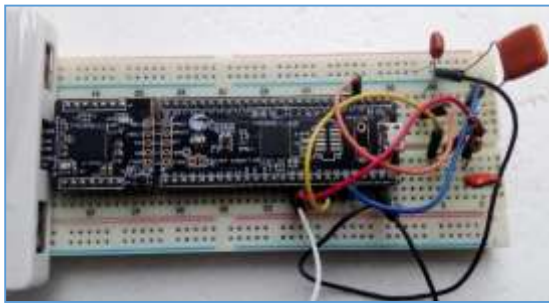
Рис. 4. Діаграми вихідної напруги сигнального перетворювача в умовах дестабілізації: а) – режимі Mode #SM1; б) – в режимі Mode #SM2

Режим Mode #SM3 реалізує можливість вимірювання DC омичної складової імпедансу вимірювального кола. Режими Mode #SM4 та Mode #SM5 реалізують можливість вимірювання рівня шуму вимірювального кола, причиною якого є електромагнітні завади. Причому, у Mode #SM4 формується умова короткого замикання входу вимірювального кола, а у Mode #SM5 – умова «антени» (вхід кола розімкнений). І врешті, режим Mode #6 реалізує можливість вимірювання DC напруги зміщення інтегратора заряду, причиною якої, здебільшого, є напруга зміщення (off-set) операційного підсилювача.

Таким чином, запропонований мультифункціональний алгоритм керування забезпечує можливість формування сімейства сигналів за якими визначається вплив дестабілізуючих факторів вимірювального перетворення. Подальше підвищення ефективності цього алгоритму передбачає вимірювання наборів вихідних сигналів при зміні кількості тактів інтегрування. Зокрема, це рішення дозволяє визначити нелінійність функції перетворення та обмеження динамічного діапазону, причина якого пояснюється проблемами низьковольтних Rail-to-Rail кіл живлення.

#### Реалізація та експериментальні дослідження

Сигнальний тракт розробленого в рамках даної роботи мультифункціонального вимірювального перетворювача ємнісних сенсорів реалізовано з використанням програмованої системи на кристалі PSoC (Programmable System on Chip, Cypress, Infineon Technologies) серії PSoC 5LP (рис. 5). Основним компонентом фронт-енду сигнального тракту є операційний підсилювач Opaamp\_1, який разом з аналоговими комутаторами AMux\_CX, AMux\_CA, AMux\_C0 та конденсатором CINT, виконує функцію мультитактного інтегрування струму заряду вимірюваного конденсатора CX (на рисунку зовнішні компоненти схеми, зокрема вказані конденсатори, не показано).

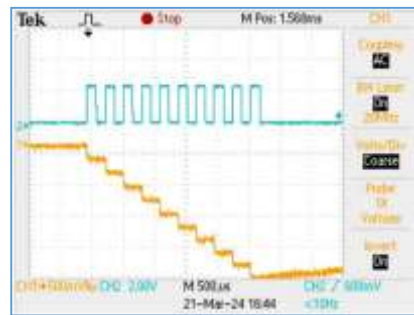
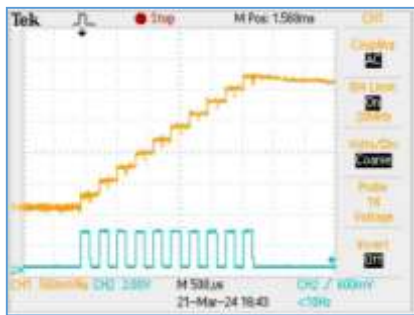


а) б)  
**Рис. 5. Вимірювальний перетворювач на основі PSoC 5LP: а) – макет; б) – внутрішня структура**

З метою розширення динамічного діапазону вихідного сигналу останній підсилюється на інвертуючому PGA\_Inv\_1 (Programmable Gain Amplifier) з програмно-керованим коефіцієнтом підсилення. В процесі мультитактного інтегрування масиви напруг Vout\_1 на виході інтегратора та Vout\_2 на виході інвертуючого підсилювача оцифровуються парою швидких аналого-цифрових перетворювачів ADC (Analog-to-Digital Converter) послідовного наближення SAR (Successive Approximation Register) - ADC\_SAR\_1 та ADC\_SAR\_2 з роздільною здатністю 12 біт. Крім того, з метою підвищення роздільної знатності отриманого наприкінці інтегрування сигналу, різниця вихідних напруг Vout\_1 - Vout\_2 оцифровується дельта-сигма перетворювачем ADC\_DeltaSig (Delta-Sigma) з роздільною здатністю від 16 до 20 біт (остання визначається компромісом між точністю та швидкодією).

В схемі вимірювального перетворювача використовуються ще один підсилювач неінвертуючого типу з програмно-керованим коефіцієнтом підсилення PGA\_AS для формування кола активного екранування та цифро-аналоговий перетворювач VDAC8 (Digital-to-Analog Converter) для відладки та калібрування сигнального тракту. Передавання керуючих команд та результатів вимірювання здійснюється універсальним асинхронним інтерфейсом UART.

Приклади осцилограм сигналів, отриманих в ході дослідження розглянутих процесів вимірювального перетворення наведені на рис. 6. Осцилограми демонструють імпульси мультитактного (в даному прикладі – десятитактного) заряду та розряду вимірювального конденсатора C<sub>x</sub> та процес інтегрування такого заряду на інтегруючому конденсаторі C<sub>INT</sub>. Можна бачити взаємну відповідність результатів експериментальних та модельних досліджень. За результатами експериментальних досліджень проводять верифікацію SPICE моделей сигнальних перетворювачів, визначають причини та наслідки нестабільності вимірювання, вплив завад, обмеження динамічних характеристик тощо.



а) б)  
**Рис. 6. Осцилограми вихідної напруги сигнального перетворювача: а) – наростаючий фронт; б) – спадаючий фронт**

**Висновки з даного дослідження**

**і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Вирішена задача розширення функціональності сигнальних перетворювачів емнісних сенсорів. Таке розширення реалізується новим мультифункціональним режимом формування сімейства сигналів за якими проводиться вбудована самодіагностика, зокрема, встановлюється паразитні взаємозв'язки та їх вплив на результат вимірювального перетворення.

Сигнальний тракт вимірювального перетворювача реалізовано з використанням програмованої системи на кристалі PSoC серії 5LP. Запропонований алгоритм керування забезпечує реалізацію шести режимів Mode #SM сигнального перетворення. Перший Mode #SM1 та другий Mode #SM2 режими реалізують мультитактний заряд-розряд вимірюваного конденсатора C<sub>x</sub> з переносом заряду в коло інтегрування на конденсаторі C<sub>INT</sub>. Ці режими забезпечують вимірювальне перетворення сенсорного пристрою, причому Mode #SM1 формує наростаючі, а Mode #SM2 - спадаючі імпульси напруги сигнального перетворювача. Режим Mode #SM3 реалізує можливість вимірювання DC омичної складової імпедансу вимірювального кола. Режими Mode #SM4 та Mode #SM5 реалізують можливість дослідження шумових параметрів вимірювального кола.

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

### Література

1. L. P., M. I. Wani, S. S. Khan, S. Malik. Autounnulling-Based Multichannel Impedance Measurement System for Capacitive Sensors. *IEEE Sensors Letters*. 2023. Vol. 7, No. 3. Pp. 1-4. Art no. 5501104. DOI: 10.1109/LENS.2023.3253696.
2. M. T. Vijjapu, et al. Printed and Flexible Capacitive Pressure Sensors for Soft Robotics. 2023 IEEE Applied Sensing Conference (APSCON), Bengaluru, India. 2023. Pp. 1-3. DOI: 10.1109/APSCON56343.2023.10101193.
3. Y. Kumaresan, O. Ozioko, R. Dahiya. Effect of Dielectric and Stiffness of Soft Material between the Electrodes of a Capacitive Pressure Sensor on its Performance. 2020 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), Manchester, UK. 2020. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/FLEPS49123.2020.9239583.
4. J. A. Müntjes, J. Häfner, M. Görtz, W. Mokwa. Studies on Thinned Flexible Integrated Capacitive Pressure Sensors in Tactile Sensor Arrays for the Use in Robotics and Prosthetics. *Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, Barcelona, Spain. 2013. Pp. 1460-1463. DOI: 10.1109/Transducers.2013.6627055.
5. R. Tortosa, J. Calpe-Maravilla, J. Cleary. A Crosstalk Error Correction Algorithm for Capacitive Sensor Panels. *SENSORS*, 2014 IEEE, Valencia, Spain. 2014. Pp. 1559-1562. DOI: 10.1109/ICSENS.2014.6985314.
6. I. Zafeirakis, M. -K. Filippidou, S. Chatzandroulis, E. D. Kyriakis-Bitzaros, N. Stathopoulos, S. Vassiliadis. Design and Implementation of a Re-Configurable Embedded System for Capacitive Sensor Array Interface. 2018 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece. 2018. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/MOCASST.2018.8376640.
7. M. A. Johar, R. Freier, A. Koenig. Adding Self-X Capabilities to AMR Sensors as a First Step Towards Dependable Embedded Systems. 2011 Proceedings of the Ninth International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, Regensburg, Germany. 2011. Pp. 41-46.
8. C. Leineweber, M. Pacher, B. Betting, J. v. Rosen, U. Brinkschulte, L. Hedrich. Detection and Defense Strategies Against Attacks on an Artificial Hormone System Running on a Mixed Signal Chip. 2012 IEEE 15th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, Shenzhen, China. 2012. Pp. 135-143. DOI: 10.1109/ISORC.2012.26.
9. S. Pechmann, A. Hagelauer. A Mixed-Signal Interface Circuit for Integration of Embedded 1T1R RRAM Arrays. 2022 IEEE 35th International System-on-Chip Conference (SOCC), Belfast, UK. 2022. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOCC56010.2022.9908137.
10. C. Díaz, M. Vázquez, M. Fuentes, J. Durán, P. Acevedo. Pulse Generator for Ultrasonic PZT and PVDF Transducer Arrays Based on a Programmable System-on-Chip (PSoC). 2016 13th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico City, Mexico. 2016. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICEEE.2016.7751244.
11. I. S. Nadezhdin, A. G. Goryunov. Differential Pressure Transmitter Based on Programmable System-on-Chip (PSoC). 2019 13th International Conference on Sensing Technology (ICST), Sydney, Australia. 2019. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICST46873.2019.9047690.
12. M. Helmy Abd El-Raouf, M. H. A. Raouf. Fully Automated Capacitance Measurement System Using New Precise Capacitance Box. 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016), Ottawa, Canada. 2016. Pp. 1-2. DOI: 10.1109/CPEM.2016.7540612.
13. S. Xiaoya, T. Hanmin. High-Precision Micro Capacitance Signal Measurement System-Based on Pcap01. 2022 International Conference on Smart Systems and Power Management (IC2SPM), Beirut, Lebanon. 2022. Pp. 129-134. DOI: 10.1109/IC2SPM56638.2022.9988930.
14. Барило Г.І. Вбудована система конвертера напруги живлення органічних світлодіодів / Барило Г.І., Гельжинський І.І., Голяка Р.Л., Марусенкова Т.А., Хільчук М.О.// Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. –2021. –№2 (295). –С. 151–155.
15. R. Pratar, R. K. Singh, V. Agarwal. SPICE Model Development for SiC Power MOSFET. 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Bengaluru, India. 2012. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/PEDES.2012.6484369.
16. A. Gutin, A. Muraviev, M. Shur, V. Kachorovskii, T. Ytterdal. Large Signal Analytical and SPICE Model of THz Plasmonic FET. 2012 Lester Eastman Conference on High Performance Devices (LEC), Providence, RI, USA. 2012. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/lec.2012.6410980.

### References

1. L. P., M. I. Wani, S. S. Khan, S. Malik. Autounnulling-Based Multichannel Impedance Measurement System for Capacitive Sensors. *IEEE Sensors Letters*. 2023. Vol. 7, No. 3. Pp. 1-4. Art no. 5501104. DOI: 10.1109/LENS.2023.3253696.
2. M. T. Vijjapu, et al. Printed and Flexible Capacitive Pressure Sensors for Soft Robotics. 2023 IEEE Applied Sensing Conference (APSCON), Bengaluru, India. 2023. Pp. 1-3. DOI: 10.1109/APSCON56343.2023.10101193.
3. Y. Kumaresan, O. Ozioko, R. Dahiya. Effect of Dielectric and Stiffness of Soft Material between the Electrodes of a Capacitive Pressure Sensor on its Performance. 2020 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), Manchester, UK. 2020. Pp.

1-4. DOI: 10.1109/FLEPS49123.2020.9239583.

4. J. A. Müntjes, J. Häfner, M. Görtz, W. Mokwa. Studies on Thinned Flexible Integrated Capacitive Pressure Sensors in Tactile Sensor Arrays for the Use in Robotics and Prosthetics. *Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSensors XXVII)*, Barcelona, Spain. 2013. Pp. 1460-1463. DOI: 10.1109/Transducers.2013.6627055.
5. R. Tortosa, J. Calpe-Maravilla, J. Cleary. A Crosstalk Error Correction Algorithm for Capacitive Sensor Panels. *SENSORS*, 2014 IEEE, Valencia, Spain. 2014. Pp. 1559-1562. DOI: 10.1109/ICSENS.2014.6985314.
6. I. Zafeirakis, M. -K. Filippidou, S. Chatzandroulis, E. D. Kyriakis-Bitaros, N. Stathopoulos, S. Vassiliadis. Design and Implementation of a Re-Configurable Embedded System for Capacitive Sensor Array Interface. *2018 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, Thessaloniki, Greece. 2018. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/MOCASST.2018.8376640.
7. M. A. Johar, R. Freier, A. Koenig. Adding Self-X Capabilities to AMR Sensors as a First Step Towards Dependable Embedded Systems. *2011 Proceedings of the Ninth International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems*, Regensburg, Germany. 2011. Pp. 41-46.
8. C. Leineweber, M. Pacher, B. Betting, J. v. Rosen, U. Brinkschulte, L. Hedrich. Detection and Defense Strategies Against Attacks on an Artificial Hormone System Running on a Mixed Signal Chip. *2012 IEEE 15th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*, Shenzhen, China. 2012. Pp. 135-143. DOI: 10.1109/ISORC.2012.26.
9. S. Pechmann, A. Hagelauer. A Mixed-Signal Interface Circuit for Integration of Embedded 1T1R RRAM Arrays. *2022 IEEE 35th International System-on-Chip Conference (SOCC)*, Belfast, UK. 2022. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOCC56010.2022.9908137.
10. C. Díaz, M. Vázquez, M. Fuentes, J. Durán, P. Acevedo. Pulse Generator for Ultrasonic PZT and PVDF Transducer Arrays Based on a Programmable System-on-Chip (PSoC). *2016 13th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, Mexico City, Mexico. 2016. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICEEE.2016.7751244.
11. I. S. Nadezhdin, A. G. Goryunov. Differential Pressure Transmitter Based on Programmable System-on-Chip (PSoC). *2019 13th International Conference on Sensing Technology (ICST)*, Sydney, Australia. 2019. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICST46873.2019.9047690.
12. M. Helmy Abd El-Raouf, M. H. A. Raouf. Fully Automated Capacitance Measurement System Using New Precise Capacitance Box. *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, Ottawa, Canada. 2016. Pp. 1-2. DOI: 10.1109/CPEM.2016.7540612.
13. S. Xiaoya, T. Hanmin. High-Precision Micro Capacitance Signal Measurement System-Based on Pcap01. *2022 International Conference on Smart Systems and Power Management (IC2SPM)*, Beirut, Lebanon. 2022. Pp. 129-134. DOI: 10.1109/IC2SPM56638.2022.9988930.
14. Barylo H.I. Embedded system for supply voltage converter of organic light-emitting diode / H.I. Barylo , I.I. Helzhynskyy, R.L. Holyaka, T.A. Marusenkova, M.O.Khilchuk // *Herald of Khmelnytskyi National University*. –2021. –No 2 (295). –C. 151–155.
15. R. Pratap, R. K. Singh, V. Agarwal. SPICE Model Development for SiC Power MOSFET. *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Bengaluru, India. 2012. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/PEDES.2012.6484369.
16. A. Gutin, A. Muraviev, M. Shur, V. Kachorovskii, T. Ytterdal. Large Signal Analytical and SPICE Model of THz Plasmonic FET. *2012 Lester Eastman Conference on High Performance Devices (LEC)*, Providence, RI, USA. 2012. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/lec.2012.6410980.