

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-86-4>

УДК 681.5

ВАРХОЛЯК Роман

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0006-4447-1770>

e-mail: varrom@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ НА БАЗІ $\Delta\Sigma$ -АЦП З КОМУТОВАНИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

У статті досліджується проблема підвищення точності перетворення первинних аналогових сигналів (тиску та температури) у промислових системах автоматизації, а також її вирішення за допомогою методу переключення конденсаторів в архітектурі $\Delta\Sigma$ АЦП. Математичне моделювання в MATLAB та статистичний аналіз Монте-Карло довели, що такий підхід знижує середню похибку з 7,23% до 0,2% і підвищує ефективну розрядність до 7,17 біт. Це дає змогу перевести доступні промислові датчики у клас точності 0,2% і вище без використання дорогих приладів.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, $\Delta\Sigma$ -модулятор, точність вимірювання, перетворювач тиску, математичне моделювання.

VARKHOLIAK Roman

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

ENHANCING THE ACCURACY OF MEASUREMENT CHANNELS IN AUTOMATION SYSTEMS BASED ON SWITCHED-CAPACITOR DELTA SIGMA ADCS

This article investigates the critical problem of improving the conversion accuracy of primary analog signals, specifically pressure and temperature, within industrial automation systems. In modern industrial applications, such as the alcohol production industry, the overall accuracy of an automated control system is fundamentally limited by the precision of its primary sensors. Upgrading entire facilities with high-end, ultra-precise instruments is frequently economically unviable, creating a strong demand for cost-effective, mid-range sensors that can deliver superior accuracy without a proportional increase in manufacturing costs.

Traditional analog-to-digital converter (ADC) architectures typically rely on integrated continuous-time resistive networks for voltage division and feedback. However, these integrated resistors exhibit significant inherent drawbacks, including high susceptibility to temperature drift, substantial manufacturing tolerances, and elevated thermal noise levels. These physical limitations directly degrade the overall accuracy of measurement systems, often capping the performance of standard analog transmitters at a 0.5% error rate.

To comprehensively address this hardware limitation, this research justifies and implements the application of the Switched-Capacitor (SC) method within a 16-bit Delta-Sigma ($\Delta\Sigma$) ADC architecture. By replacing conventional resistors with capacitors that are periodically switched by precise clock signals, the electrical charge is transferred with exceptional accuracy.

To rigorously validate the proposed architectural solution, an advanced mathematical model was developed in the MATLAB environment. The simulation incorporated realistic industrial constraints and physical imperfections, including a standard 4-20 mA current loop input converted to a 1-5 V full-scale range, random thermal fluctuations reflecting the actual workshop environment, additive hardware noise at a 0.2% level, and specific two-phase clocking dynamics at a 100 kHz sampling rate. A comprehensive statistical Monte Carlo analysis comprising 2000 independent iterations was performed to evaluate the robustness and repeatability of both the conventional resistive and the proposed SC architectures under identical dynamic conditions.

The findings theoretically confirm that implementing switched-capacitor techniques allows upgrading standard, cost-effective industrial sensors to a high-precision measurement class (with an error margin of 0.2% or better) using standard CMOS technologies, thereby paving the way for highly reliable automation systems in the food industries.

Keywords: Analog-to-Digital Converter, pressure transducer, delta-sigma modulators, oversampling, resolution.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 22.04.2026

Опубліковано / Published 31.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ВАРХОЛЯК Роман

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Одним із ключових напрямків розвитку сучасної промисловості є впровадження високонадійних систем автоматизації, які здійснюють безперервний контроль технологічних параметрів. Загальна точність будь-якої автоматизованої системи визначається точністю її найслабшої ланки - первинних перетворювачів. Практичний досвід впровадження систем автоматизації на підприємствах України (зокрема, у спиртовій галузі) виявляє гостру дилему для виробників: використання датчиків стандартної точності (наприклад, аналогових приладів з вихідним сигналом 4-20 мА та похибкою 0,5%) призводить до втрат продуктивності та зниження якості продукції. Водночас повне переоснащення підприємства приладами високого класу точності часто є економічно недоцільним.

Спиртове виробництво - це завжди екстремальні умови для промислової електроніки. Датчики тиску, рівня та температури, які встановлюються на брагоректифікаційних колонах чи варильних апаратах, змушені працювати при постійних перепадах температур. У холодну пору року температура в цеху може опускатися до +10 °С, а безпосередньо біля паропроводів та гарячих резервуарів вона сягає до +100 °С.

Оптимальним розв'язанням цієї проблеми є підвищення точності перетворювачів тиску та температури середнього цінового діапазону за рахунок вдосконалення їхньої апаратно-обчислювальної частини, зокрема аналого-цифрового перетворювача (АЦП), без суттєвого збільшення собівартості. Сучасні інтелектуальні перетворювачі (із заявленою похибкою 0,25%) часто використовують вбудовані 16-розрядні $\Delta\Sigma$ -АЦП [1, 2]. Проте традиційні архітектури, що покладаються на інтегровані резистори у схемах подільників чи зворотного зв'язку, вичерпують свій потенціал. Ці елементи безпосередньо в мікросхемі є джерелом значних похибок через температурний дрейф, технологічні допуски при виробництві та ефекти старіння. В умовах експлуатації спиртового виробництва (+10...+100 °С) опір цих елементів не лінійно змінюється, що призводить до суттєвого дрейфу нульової точки та зміни загального коефіцієнта передачі вимірювального тракту. Отже, пошук методів мінімізації цих апаратних похибок для досягнення вищих класів точності залишається актуальним завданням [3, 4].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є підвищення точності вимірювальних каналів систем автоматизації контролю тиску та температури шляхом обґрунтування та застосування архітектури $\Delta\Sigma$ -АЦП на основі методу перемикання конденсаторів (Switched-Capacitor). Заміна резисторів на конденсатори, які періодично комутуються, дозволяє формувати відношення сигналів за рахунок ємностей, що гарантує значно вищу стабільність на одному кристалі. Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Проаналізувати вплив нестабільності інтегрованих резисторів на загальну похибку АЦП.
2. Повести теоретичне обґрунтування доцільності впровадження у первинні вимірювальні канали промислових перетворювачів архітектури на комутованих конденсаторах (Switched-Capacitor, SC) замість класичних резистивних каскадів.
3. Розробити математичну модель методу перемикання конденсаторів у середовищі MATLAB для оцінки часових та зарядових характеристик.
4. Провести статистичний аналіз результатів (методом Монте-Карло) для доведення зниження відносної похибки порівняно з традиційними рішеннями.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Основою сучасних інтелектуальних перетворювачів тиску та температури є високороздільні аналого-цифрові перетворювачі, найчастіше архітектури $\Delta\Sigma$. Традиційно для формування коефіцієнтів підсилення, побудови фільтрів або подільників напруги в аналоговій частині мікросхем використовуються інтегровані резистори. Незважаючи на простоту реалізації, саме резистивні елементи є головним джерелом апаратних похибок в вимірюваннях.

В інтегральних схемах резистори формуються методами дифузії або нанесення полікремнієвих плівок. Цим технологіям притаманні суттєві недоліки:

- Технологічні розбіжності: абсолютний допуск інтегрованих резисторів може сягати $\pm 20\%$. Навіть два сусідні резистори на одному кристалі можуть мати різницю опорів у 1–3%.
- Температурна нестабільність: опір напівпровідникових та плівкових резисторів істотно змінюється зі зміною температури. У промислових умовах (наприклад, у спиртовому виробництві), де датчики зазнають значних температурних коливань, цей дрейф порушує стабільність вимірювань.
- Тепловий шум: рівень шуму є прямо пропорційним до величини опору.

Ці фізичні обмеження роблять класичні резисторні архітектури головною перешкодою для підвищення точності датчиків середнього цінового діапазону. Зазвичай такі прилади впираються у межу похибки 0,25%, що є недостатнім для багатьох сучасних технологічних процесів.

Для розв'язання проблеми обмеженої точності бюджетних та середньо-цінових перетворювачів у даній роботі пропонується адаптувати та впровадити у вимірювальний тракт $\Delta\Sigma$ -АЦП архітектуру на комутованих конденсаторах (Switched-Capacitor, SC) [5, 6, 7]. Її цілеспрямоване застосування для компенсації апаратних похибок у масових промислових перетворювачах тиску з метою переведення їх у клас точності 0,2% і вище становить значний практичний інтерес в контексті автоматизації технологічних процесів.

Суть запропонованого підходу полягає у повній заміні фізичних резисторів в аналоговому тракті на конденсатори, які періодично комутуються транзисторними ключами під керуванням двофазного тактового генератора. Замість безперервного пропускання струму, SC-ланцюг дискретно переносить порції електричного заряду Q між вузлами схеми.

Якщо конденсатор ємністю C періодично заряджається до напруги V і розряджається з частотою тактового сигналу f_s , середній струм через нього дорівнює:

$$I = C \cdot V \cdot f_s \quad (1)$$

Відповідно, еквівалентний опір такого ланцюга обчислюється як:

$$R_{eq} = \frac{1}{C \cdot f_s} \quad (2)$$

Ця фундаментальна залежність дозволяє формувати параметри схеми (наприклад, коефіцієнти передачі) не через абсолютні значення опорів, а виключно через відношення ємностей та стабільну частоту тактування.

Запропоноване рішення для систем контролю тиску базується на таких факторах:

1. Мінімізація температурного дрейфу первинного каналу: конденсатори структури метал-діелектрик-метал мають вкрай низький температурний коефіцієнт. Це критично важливо для датчиків, встановлених безпосередньо на технологічних трубопроводах, де температура середовища постійно змінюється.

2. Усунення розбіжностей виробництва: відношення двох ємностей на одному кристалі (C1/C2) завдяки фотолітографії витримується з точністю до 0,01%. Це дозволяє автоматично компенсувати виробничі похибки, які у випадку з резисторами вимагали б дорогого індивідуального лазерного підганяння кожного датчика на заводі.

3. Зниження собівартості точного вимірювання: використання SC-архітектури дозволяє реалізувати високоточний вимірювальний тракт (рівня 16 біт і вище) на базі стандартних і дешевших КМОН-технологій без застосування прецизійних зовнішніх компонентів.

Таким чином, цілеспрямований перехід до архітектури $\Delta\Sigma$ -АЦП на комутованих конденсаторах є не просто схемотехнічним рішенням, а комплексним методом підвищення точності та надійності промислових систем автоматизації при збереженні економічної доцільності їх впровадження [8].

Математичне моделювання та аналіз результатів у середовищі MATLAB

Для первинної перевірки ефективності архітектури на комутованих конденсаторах (SC) було розроблено комплексну математичну модель у середовищі MATLAB [11]. Головна мета цього етапу - порівняння динаміки перетворення класичної резисторної та запропонованої SC-схем в умовах, максимально наближених до реального промислового середовища (зокрема, процесів спиртового виробництва).

У модель було закладено такі базові параметри та додаткові фактори:

- Вхідний сигнал: імітація стандартної струмової петлі 4–20 мА, що відповідає діапазону напруг 1–5 В (напряга повної шкали).
- Температурний профіль: зважаючи на специфіку роботи датчиків на варильних апаратах, згенеровано динамічний температурний масив у діапазоні від +10 °С до +100 °С (із середнім значенням близько 55 °С). Температурний коефіцієнт для резисторів задано на рівні 0,0039, а для інтегрованих конденсаторів — 0,0001.
- Апаратний шум: до ідеального сигналу додано випадковий шум (рівень 0,2%) для імітації реальних електромагнітних наведень на виробництві.
- Реальна динаміка SC-схеми: замість простого математичного множення, модель SC-ланцюга враховує реальне двофазне тактування з частотою 100 кГц. У коді чітко розділено процеси: фазу зарядки вимірювального конденсатора (ϕ_1) та фазу передачі і накопичення заряду на інтегруючому конденсаторі (ϕ_2).
- Виробничі допуски: для імітації технологічного розкиду при серійному виробництві мікросхем введено випадкові відхилення номіналів: $\pm 1\%$ для резисторів та $\pm 0,1\%$ для конденсаторів.

Для перевірки коректності симуляції динамічних процесів було побудовано осцилограму перехідного процесу (Рис. 1), яка демонструє форму вихідної напруги для обох архітектур.

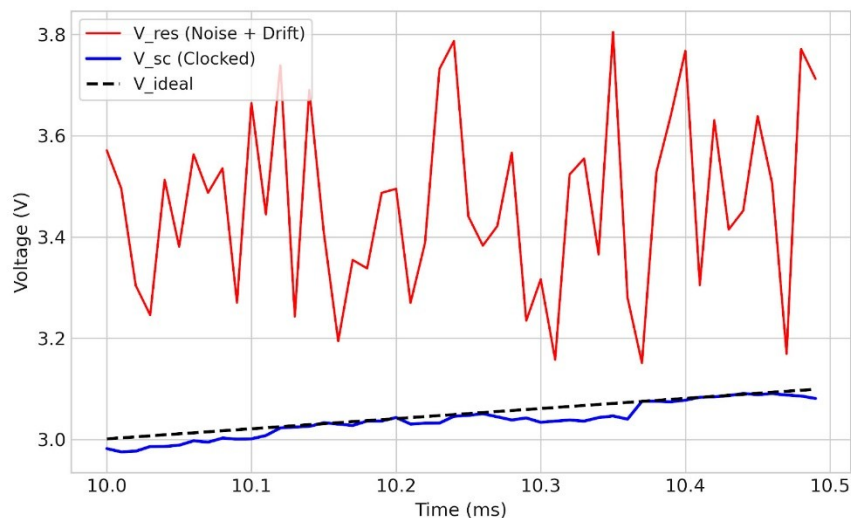


Рис.1. Форма напруги: перенесення заряду

На графіку чітко відстежується ступінчастий характер сигналу SC-схеми. Ці "сходинки" є візуальним підтвердженням тактового режиму роботи: напруга змінюється дискретно в моменти передачі заряду між конденсаторами і фіксується під час фази накопичення. Сигнал резисторної схеми є безперервним, однак він помітно відхиляється від ідеального значення через дію накладеного апаратного шуму та температури.

Наступним кроком було досліджено стійкість архітектур до температурного дрейфу, що є критичним фактором для датчиків тиску. Рис. 2 демонструє залежність максимальної відносної похибки від температури навколишнього середовища.

Графік показує, що при відхиленні температури від нормальної (25 °C) опір напівпровідникових резисторів стрімко змінюється, що призводить до лінійного зростання похибки. У той самий час крива SC-схеми залишається практично горизонтальною у всьому промисловому діапазоні температур (+10...+100 °C), підтверджуючи мінімальний температурний дрейф відношення ємностей.

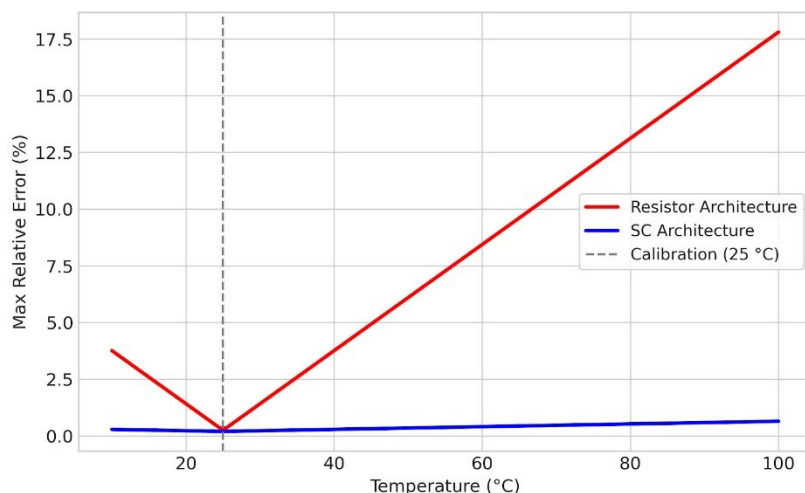


Рис.2. Графік температурного дрейфу від +10 до +100 градусів

Для комплексної оцінки загальної точності з урахуванням як температурних змін, так і технологічного розкиду компонентів, було проведено статистичний аналіз. На Рис. 3 наведено гістограму розподілу відносної похибки, отриману після серії з 2000 ітерацій Монте-Карло.

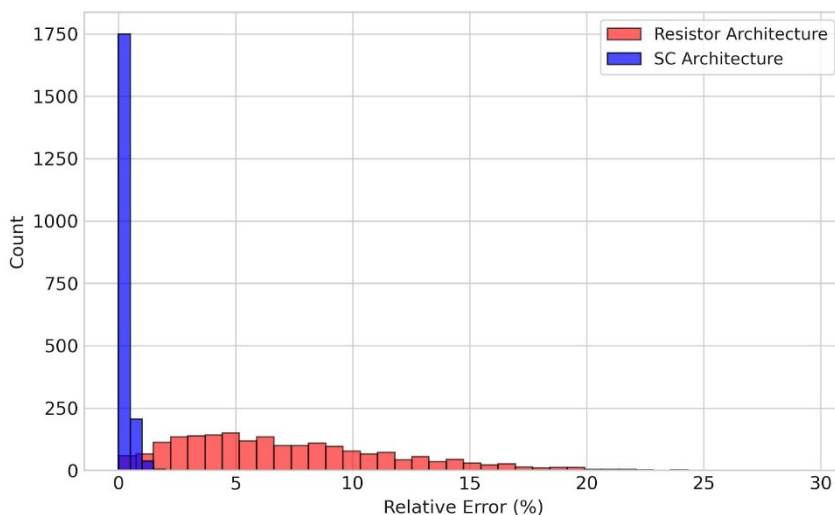


Рис.3. Гістограма розподілу відносної похибки

Як видно з гістограми, резисторна архітектура демонструє широкий розкид похибок із середнім значенням близько 7,2%. Таке значне відхилення зумовлене сумарною дією допусків виробництва та високих робочих температур цеху. Натомість SC-схема демонструє виняткову стабільність: похибка локалізована у вузькому діапазоні із середнім значенням 0,2%.

Для фінальної оцінки якості перетворення було розраховано ефективну розрядність (ENOB — Effective Number of Bits), яка враховує вплив шумів та спотворень на корисний сигнал [9, 10]. За заданих жорстких промислових умов ефективна розрядність класичного резисторного тракту впала до 3,25 біт. Натомість

використання методу комутованих конденсаторів дозволило ефективно подавити шуми та дрейф, зберігши ENOB на рівні 7,17 біт.

Введення до моделі реалістичних виробничих допусків, апаратного шуму та промислового температурного профілю (+10...+100 °C) довело, що резистивні елементи є найслабшою ланкою вимірювального тракту. Перехід до архітектури на комутованих конденсаторах дозволяє згладити вплив цих факторів та забезпечити стабільну похибку на рівні 0,2%. Це відкриває шлях до створення точних і надійних перетворювачів тиску середнього цінового діапазону.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У межах даної роботи проведено комплексне дослідження та обґрунтовано доцільність застосування архітектури на комутованих конденсаторах (Switched-Capacitor, SC), для підвищення точності перетворення первинних аналогових сигналів у промислових системах автоматизації контролю тиску та температури.

1. Доведено, що традиційні резистивні архітектури аналого-цифрових перетворювачів є основною перешкодою для досягнення високої точності приладів середнього цінового діапазону. Вплив технологічних допусків (до ± 1), та значний температурний коефіцієнт напівпровідникових резисторів призводять до значного зростання похибки в умовах реальних промислових середовищ (зокрема, при нагріванні вимірювальних середовищ від +10 °C до +100 °C).

2. Запропоновано заміну фізичних резисторів на SC-інтегратори, де передача заряду визначається відношенням ємностей та частотою двофазного тактування. Оскільки інтегровані конденсатори на одному кристалі демонструють значно кращу технологічну узгодженість (допуск $\pm 0,1\%$) та мінімальний температурний дрейф, така архітектура забезпечує високу стабільність вимірювального каналу.

3. Розроблено математичну модель SC-тракту в середовищі MATLAB, яка враховує дискретну природу перенесення заряду, апаратні шуми та температурні коливання. Статистичний аналіз за методом Монте-Карло ($N=2000$) показав, що в робочих температурних умовах застосування SC-схеми дозволило знизити середню відносну похибку до рівня 0,2% (проти 7,2% для класичної резисторної архітектури) та збільшити ефективну розрядність (ENOB) до 7,17 біт.

Оскільки математичне моделювання оперує ідеалізованими дискретними моделями, наступним логічним кроком дослідження є проведення глибокого схемотехнічного моделювання. Подальша робота буде спрямована на аналіз впливу фізичних неідеальностей напівпровідникових елементів (опору відкритого каналу транзисторних ключів, паразитних ємностей, ефекту інжекції заряду та "мертвого часу" тактування) на кінцеву точність SC-тракту.

References

1. Schreier R., Temes G. C. Understanding Delta-Sigma Data Converters. 2nd ed. Hoboken, NJ : Wiley-IEEE Press, 2017. 450 p.
2. Zhang B., Schreier R. Delta-Sigma Modulators: Modeling, Design and Applications. New York : Springer, 2005. P. 92–95.
3. Verreault A., Cicek P.-V., Robichaud A. Oversampling ADC: A review of recent design trends. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 121753–121779.
4. Chen J., Liu Q., Luo X. An Energy-Efficient Pipelined ADC Using Background Calibration for Industrial Sensor Systems. *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 20, No. 24. P. 14628–14636.
5. Huang Y., Wang X., Li P. Design of a Low-Power 16-bit Delta-Sigma ADC for Biomedical Applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2022. Vol. 69, No. 10. P. 4128–4140.
6. Shiue M.-T., Ou Y.-C., Li G.-S. A Low-Power Continuous-Time Delta-Sigma Analogue-to-Digital Converter for the Neural Network Architecture of Battery State Estimation. *Electronics*. 2024. Vol. 13, No. 17. P. 3459.
7. Wu H., Li W., Zhang T. et al. A 1.2 V, 92 dB Dynamic-Range Delta-Sigma Modulator Based on an Output Swing-Enhanced Gain-Boost Inverter. *Electronics*. 2024. Vol. 13, No. 8. P. 1475.
8. Han Y., Liu W., Zhang X. et al. A Wide Dynamic Range Sigma-Delta Modulator for EEG Acquisition Using Randomized DWA and Dynamic-Modulated Scaling-Down Techniques. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 1. P. 312.
9. Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. 4th ed. London : Pearson Education, 2007. P. 347–389.
10. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2011. P. 279–305.
11. Higham D. J., Higham N. J. MATLAB Guide. 3rd ed. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2016. 504 p.