УДК 621.382 **DOI: 10.15330/itee.2026.4.01**

І.Т.КОГУТ, д-р техн. наук, А.Ю.ПРИСТАЙКО, аспірант

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ФІКСАЦІЇ ЗМІНИ МІКРОЄМНОСТІ НА КІЛЬЦЕВОМУ ГЕНЕРАТОРІ

Вступ.

Для створення мікросистем-на-кристалі сенсорного типу, що містять на одному кристалі як сенсорні елементи фізичних величин, так і схеми перетворення інформації від них необхідні інтегральні сенсорні та мультисенсорні елементи. Базовою технологією їх створення може бути стандартна КМОН-технологія виготовлення інтегральних схем (ІС) та їх модифікації адаптовані одночасно і для сенсорних структур, що дасть змогу інтегрувати на одному кристалі як транзисторні, так і сенсорні КМОН-структури. Перспективнішими для цієї мети є кремній-на-ізоляторі (КНІ) КМОН-структури, які мають суттєві переваги завдяки діелектричній ізоляції елементів щодо спеціальних умов їх використання з врахуванням впливу зовнішніх факторів (температури, радіації, та ін.).

Для первинної обробки сигналів у парі із сенсорами можуть бути використані інтегральні операційні підсилювачі [12], інтегральні генератори, цифрові елементи, елементи чутливі до зміни рівня сигналу та ін. У роботі запропоновано і проведено моделювання сенсорного елемента для фіксації зміни інтегральних мікроємностей в межах десятих та одиниць пікофарад у складі 7-каскадного кільцевого генератора, що може бути використано для аналогічних первинних сенсорних перетворювачів сигналів фізичних величин для сенсорних мікросистем-на-кристалі.

Особливості використання КМОН-кільцевих генераторів для первинних перетворювачів сигналів.

Кільцевий генератор (КГ) складається з непарної кількості інверторів, з'єднаних у замкнене кільце. Кожен інвертор забезпечує логічну інверсію сигналу, що еквівалентно фазовому зсуву на 180°. Для виникнення стійких автоколивань необхідно виконати критерій Баркгаузена [1]. На частотні та імпульсні характеристики КГ можуть впливати як зовнішні чинники, так і параметри елементів, з яких утворено КГ, що може бути основою створення сенсорних елементів. До зовнішніх впливів належать:

- ***Вплив напруги живлення:*** Збільшення V_{DD} зазвичай призводить до збільшення струму стоку I_{ds}, що зменшує затримку V_{th} і підвищує частоту. Однак, це одночасно збільшує амплітуду вихідного сигналу, що спричиняє перезаряд ємностей навантаження до вищих рівнів. Для технологій з коротким каналом ефекти насичення швидкості носіїв роблять цю залежність менш лінійною [2].
- ***Температурний вплив:*** Зі зростанням температури рухливість носіїв зарядів $\frac{df}{dT} < 0$ зменшується, що призводить до падіння струму стоку I_{ds} і зниження частоти. Водночас порогова напруга C_{sens} також зменшується, що частково компенсує падіння рухливості, але ефект рухливості зазвичай домінує ($\frac{df}{dT} < 0$).

- ***Вплив змін мікроємностей:*** Додавання сенсорної ємності t_{p_sens} до одного або всіх вузлів генератора змінює час затримки. Якщо ємність додається до всіх вузлів рівномірно, частота масштабується обернено пропорційно. Якщо ж ємність додається до одного вузла (що є типовим для сенсорів), період коливань стає сумою затримок "швидких" та "повільних" каскадів:

$$T = (N - 1) \cdot t_{p0} + t_{p_sens}(C_{sens}) \quad (1)$$

де t_{p_sens} — затримка навантаженого каскаду.

Це створює асиметрію форми вихідного сигналу (duty cycle distortion), яка може бути використана як інформативний параметр, але також може призвести до згасання коливань, якщо затримка одного каскаду стане занадто великою порівняно з іншими, порушуючи умови регенерації сигналу [3].

- ***Вплив балансів фаз та амплітуд в колі зворотнього зв'язку кільцевого генератора:*** Сумарний фазовий зсув у петлі зворотного зв'язку на частоті генерації f_{osc} повинен дорівнювати 360° (або 2πk). Оскільки непарна кількість інверторів дає зсув N × 180°, система є нестабільною по постійному струму і прагне до коливань. Коефіцієнт підсилення розімкненої петлі на частоті генерації повинен бути більшим або дорівнювати одиниці (|Aloop| ≥ 1) [1].
- ***Конструктивними елементами,*** які можуть впливати на частотно-фазові характеристики КГ є у першу чергу RC-елементи, транзисторні елементи, які можуть бути включені у лінії зворотнього зв'язку, до затворів КМОН-транзисторів і використані як елементи, що реагують на зовнішні впливи та зміни схемотехнічних параметрів КГ. Якраз ця особливіть є основою для побудови сенсорних та мультисенсорних елементів на основі КГ.

Схемотехнічна реалізація мультисенсорного елемента.

На рис.1. зображено схему фіксації зміни інтегральних мікроємностей на основі КМОН-кільцевого генератора (КГ), зібраному на інверторах попарно транзистори М1, М2; … ..М11, М12. Чутливими інтегральними ємностями є С1, С2 та інтегральний резистор із високоомного полікремнію R1 або керованого МОН-транзистора з'єднаних, як зображено на схемі електричній принциповій відповідно до рис.1.

Запропонована схема включає сенсорні резистор R та конденсатори С1, С2 у колі зворотного зв'язку, що утворює гібридну топологію між кільцевим і релаксаційним генератором. Резистор R переводить інвертор у режим лінійного підсилювача з self-biasing. Конденсатор С1 є сенсорним елементом — зміна його ємності безпосередньо модулює фазовий зсув і частоту генерації. Конденсатор С2 формує додатковий полюс передавальної функції, підвищуючи ефективну добротність схеми та стабільність частоти. Чутливість сенсора S визначається як зміна вихідної частоти на одиницю зміни ємності. Через фундаментальну залежність f ~ 1/C чутливість падає квадратично зі збільшенням базової ємності. Для детекції змін порядку фемтофарад необхідно мінімізувати паразитні ємності і працювати на високій базовій частоті [5]. Наприклад, при f = 500 МГц та C = 1 пФ зміна на 1 аФ зміщує частоту на ~100 Гц, що досліджено сучасними цифровими лічильниками.

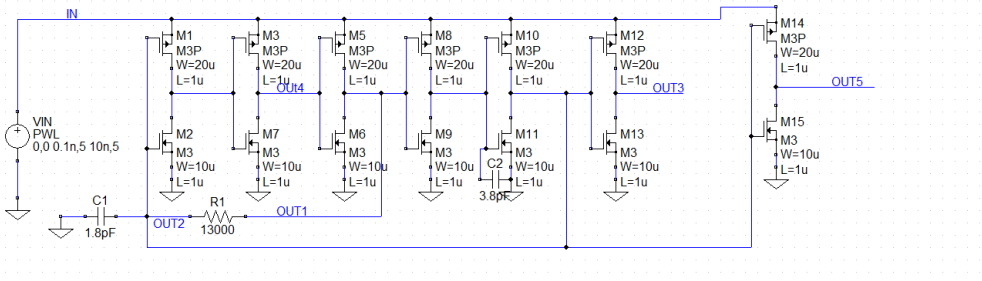
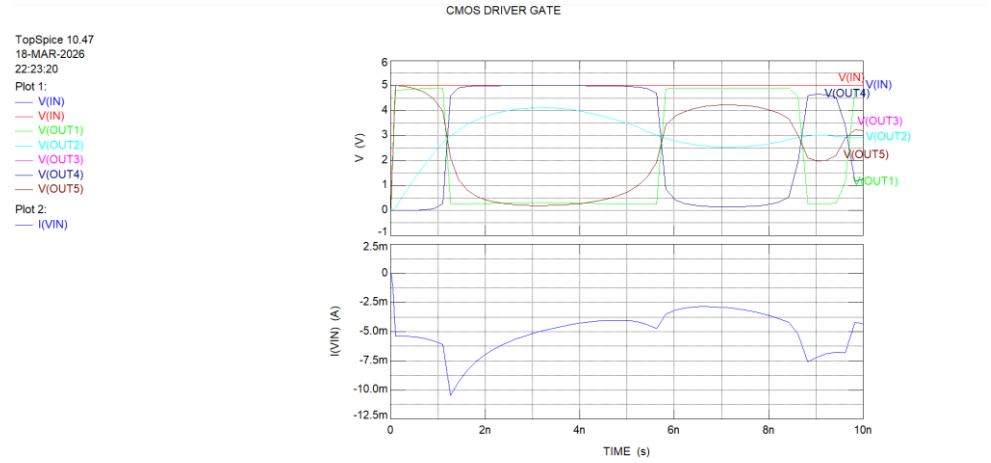


Рис.1. Схема електрична сенсорного елемента

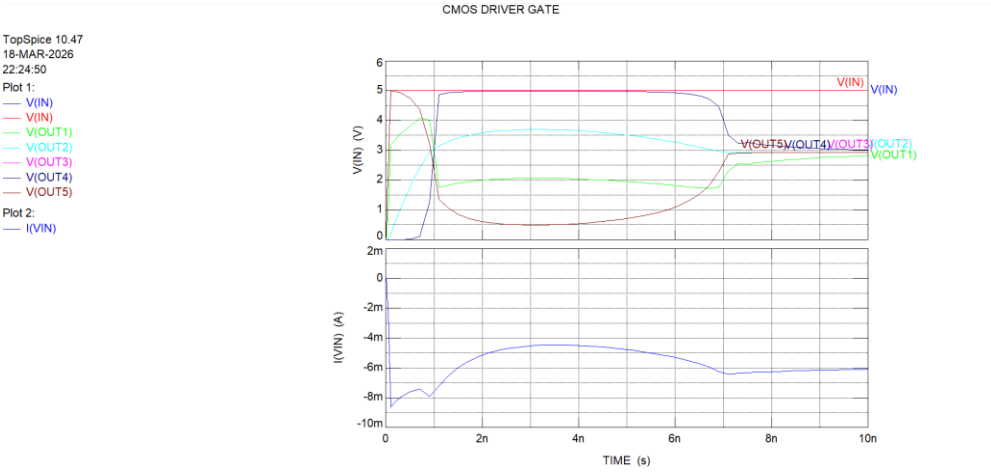
ISSN 3083-7618 *Information Technologies and Engineering Electronics No. 4 (2026)*
eISSN 3083-7626

Таблиця 1. Параметри режимів моделювання.

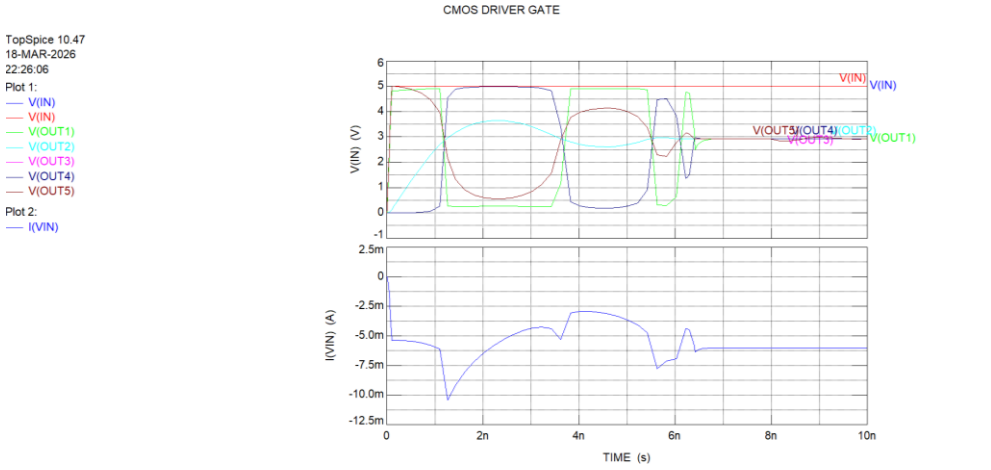
Графік	R1, Ом	C2, пФ
Рис. 2, а	13000	3.8
Рис. 2,б	1000	3.8
Рис. 2,в	13000	1.9



а)



б)



в)

Рис. 2. Приклади часових діаграм а) при R1 = 13000 Ом, C2 = 3,8 пФ; б) при R1 = 1000 Ом, C2 = 3.8 пФ; в) при R1 = 13000 Ом, C2 = 1.9 пФ

Отож, зміни параметрів імпульсів, (тривалість, частота) при різних значеннях R1, C1 і C2 є інформативними параметрами, які можуть бути використані, напр., для фіксації моменту включення в інтегральних аналогових перемикачах для мікросистем-на-кристалі та ін.

Особливості створення багатоканальних складних архітектур, схем зчитування і обробки сигналів

Реалізація масиву сенсорів на основі КГ може викликати проблеми електромагнітної сумісності на кристалі, зокрема, загрозою є явище- взаємної синхронізації генераторів через паразитний зв'язок по підкладці або шинах живлення. Оскільки КГ мають низьку добротність (Q < 1), смуга захоплення є широкою, і сенсорний генератор може "захопитися" сусіднім, що означає зниження чутливості до нуля. Для запобігання цього ефекту застосовуються: (1) часове розділення — активація лише одного каналу через Enable/NAND; (2) частотне планування — різні номінальні частоти каналів (різниця 10–20%); (3) окремі LDO-стабілізатори для груп генераторів і охоронні кільця навколо кожного КГ.

Частотний сигнал перетворюється у цифровий код трьома основними методами: (1) лічильник частоти — підрахунок імпульсів за фіксований інтервал часу; (2) TDC (Time-to-Digital Converter) — вимірювання періоду за опорним синхроімпульсом [6]. 7-каскадний КГ забезпечує доступ до 7 фаз сигналу, що дозволяє інтерполяцію всередині періоду і підвищує роздільну здатність без збільшення тактової частоти лічильника [7]; (3) диференціальне зчитування — вимірювання різниці частот f_sens і f_ref [8]. Це забезпечує високий CMRR і компенсацію PVT-варіацій. Конденсатори C1, C2 збільшують заряд Q на вузлі — це покращує фазовий шум, хоча і знижує абсолютну чутливість [4, 9]. Калібрування через матрицю конденсаторів-перемикачів, дозволяє вирівняти початкові частоти всіх каналів перед початком вимірювань.

Система, спроєктована з урахуванням викладених принципів, здатна досягти роздільної здатності на рівні одиниць аттофарад, що відкриває широкі перспективи для використання у прецизійній біомедичній діагностиці [10, 11], мікрофлюїдиці та системах моніторингу навколишнього середовища.

Висновки

Розроблено і промодельовано багатофункціональний інтегральний сенсорний елемент на базі кільцевих генераторів з чутливими R і двома C-елементами в колах зворотнього зв’язку для побудови сенсорних мікросистем-на-кристалі, що є ефективним рішенням для детекції мікрозмін ємності. Запропонована схема включення чутливих R_1, C_1, C_2 дозволяє реалізувати гібридний режим роботи, поєднуючи високу чутливість фазового зсуву зі стабільністю релаксаційних схем.

Ключовими перевагами запропонованого елемента є можливість розміщення великої кількості сенсорів на одному кристалі, відсутність потреби у складних АЦП, пряме підключення до цифрової логіки, можливість налаштування чутливості та частотного діапазону через параметри R_1, C_1, C_2.

Аналіз літературних даних показує, що мінімізацію перехресних завад у складних сенсорних системах-на-кристалі можна досягти часовим розділенням, частотним рознесенням каналів, ретельною ізоляцією елементів і шин живлення, чому ідеально відповідають КНІ КМОН-структури. Оптимізацію шумів можна досягти параметричною оптимізацією топологічних розмірів і форм затворів КМОН-транзисторів.

Список літератури:

1. B. Razavi, “RF Microelectronics,” 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2012.
2. A. Koithyar, T. K. Ramesh, “Frequency equation for the submicron CMOS ring oscillator using the first order characterization,” Journal of Semiconductors, vol. 37, no. 6, p. 065003, 2016. doi: https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/5/055001
3. P. M. Farahabadi, H. Miar-Naimi, and A. Ebrahimzadeh, "Closed-form analytical equations for amplitude and frequency of high-frequency CMOS ring oscillators," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 56, no. 12, pp. 2669–2677, 2009. doi: https://doi.org/10.1109/TCSI.2009.2016179

4. A. A. Abidi, “Phase Noise and Jitter in CMOS Ring Oscillators,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 41, no. 8, pp. 1803–1816, Aug. 2006. doi: https://doi.org/10.1109/JSSC.2006.876206
5. U. Ferlito, A. D. Grasso, S. Pennisi, M. Vaiana, and G. Bruno, “Sub-Femto-Farad Resolution Electronic Interfaces for Integrated Capacitive Sensors: A Review,” IEEE Access, vol. 8, pp. 153969–153980, 2020. doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018130
6. “TDC7200 Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Applications,” Texas Instruments [Online]. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tdc7200.pdf
7. J. Chen, Y. Huang, and Z. Hong, “A multi-path gated ring oscillator based time-to-digital converter in 65 nm CMOS technology,” Journal of Semiconductors, vol. 34, no. 3, p. 035004, 2013. doi: https://doi.org/10.1088/1674-4926/34/3/035004
8. K. Mohammad and D. J. Thomson, “Differential Ring Oscillator Based Capacitance Sensor for Microfluidic Applications,” IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 11, no. 2, pp. 392–399, 2017. doi: https://doi.org/10.1109/TBCAS.2016.2616346
9. H. Wang, C.-C. Weng, and A. Hajimiri, "Phase noise and fundamental sensitivity of oscillator-based reactance sensors," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, no. 5, pp. 2215–2229, 2013. https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2256142
10. S. B. Prakash and P. Abshire, "On-chip capacitance sensing for cell monitoring applications," IEEE Sensors Journal, vol. 7, no. 3, pp. 440–447, 2007. doi: https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.889213
11. R. Abdelbaset et al. "On-Chip Flow Cytometry Utilizing the Di-Electrophoresis and Ring Oscillator-Based Capacitive Sensor," IEEE Access, vol. 13, pp. 143127–143137, Aug. 2025. doi: https://doi.org/10.1109/access.2025.3598510
12. І.Т. Когут, Б.С. Дзундза, В.І. Голота, В.М. Грига, А.В. Моргун, М.В. Штунь, В.М. Півненко, “Особливості схемо-топологічного проектування і моделювання топології операційного підсилювача на КМОН-структурах для біомедичних застосувань”, Фізика і хімія твердого тіла. 2024. Т. 25, № 3. С. 553–559. doi: https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.553-559

Надійшла до редколегії 01.04.2026

Відомості про авторів:

Когут Ігор Тимофійович — доктор технічних наук, професор, кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, Україна; email: ihor.kohut@cnu.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5524-1790 .

Пристайко Андрій Юрійович — аспірант кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, Україна; email: andrii.prystaiko.19@pnu.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1099-1288 .