

УДК: 621.382

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

I.T. Kogut, O.E. Samarchuk, A.Yu. Prystayko, T.I. Komariшин
**Порівняльний аналіз КМОН- і КНІ КМОН аналогово-
цифрових комутаторів для мікросистем-на-кристалі в
екстремальних умовах**

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна, igor.kohut@cnu.edu.ua

У статті досліджується конструкція та продуктивність інтегрованих АЦК для сенсорних МнК. Оскільки сучасні сенсорні системи вимагають високої точності та енергоефективності, вибір напівпровідникової технології стає критичним. Сучасні сенсорні МнК вимагають високоточних та енергоефективних АЦК, здатних функціонувати в екстремальних умовах навколишнього середовища.

Проведено комп'ютерне моделювання з використанням конструкторсько-технологічних норм 120 нм, що враховує паразитні ефекти топології, інжекцію заряду та вплив підкладки. Для забезпечення достовірності порівняння розроблено ідентичні топології для КМОН- та КНІ КМОН-версій пристроїв. Результати моделювання демонструють, що КНІ КМОН-комутатори забезпечують значно вищу лінійність та нижчі струми витoku (пікоампери проти наноампер). Встановлено, що енергоспоживання комутатора на основі КНІ в середньому в 4,5 рази нижче за стандартний КМОН-аналог в інтервалі температур від -50 °C до $+200$ °C. Крім того, стандартний КМОН-комутатор втрачає працездатність при температурах понад 175 °C, тоді як КНІ-пристрій зберігає повну функціональність до 200 °C.

Отримані дані підтверджують, що КНІ КМОН-структури є оптимальним вибором для МнК, які експлуатуються в екстремальних умовах. Запропонована конструкція три вихідного комутатора ефективно перетворює малі синусоїдальні сигнали в імпульсні, що дозволяє використовувати її у біомедичних сенсорах та схемах переносу заряду.

Ключові слова: КНІ КМОН технологія, аналого-цифровий комутатор, мікросистема-на-кристалі, ін'єкція заряду, споживана потужність, високотемпературна електроніка, 120-нм техпроцес.

Подано до редакції 12.05.2026; прийнято до друку 17.06.2026, опубліковано 30.06.2026.

Вступ

У сучасних сенсорних мікросистемах-на-кристалі (МнК) аналогові комутатори є критичними елементами для перемикання слабких сигналів від первинних перетворювачів до схем обробки, напр., (аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), операційних підсилювачів (ОП), підсилювачів та ін.). АЦК як правило не містять у своєму складі сенсорних елементів, а містять традиційні КМОН-транзисторні структури, тому для їх виготовлення використовується стандартна класична КМОН-технологія інтегральних схем (ІС), проте функціонування АЦК вимагає підвищеної точності,

відповідати вимогам екстремальних умов функціонування та покращення енергоефективності сенсорної МнК в цілому. Тому більш перспективною технологією для цієї мети можуть бути КНІ (кремній-на-ізоляторі) КМОН-транзисторні структури [1,2,4]. Важливими є наявність в АЦК кількох рівнів вихідних сигналів для керування інтерфейсними виходами. Для їх формування в АЦК можуть бути введені додаткові елементи, напр., інверторні підсилювачі з окремими джерелами живлення, що забезпечить комутацію слабких аналогових сигналів в імпульси різної полярності із різними величинами рівнів сигналів. Тому робота присвячена порівняльному аналізу і комп'ютерному моделюванню АЦК з КМОН- і КНІ КМОН - структурами для мікросистемних

застосувань.

Метою роботи є порівняльний аналіз та комп'ютерне моделювання АЦК на основі стандартної 120-нм КМОН-технології та технології «кремній-на-ізоляторі» (КНІ КМОН) з акцентом на їхню роботу в умовах високих температур.

I. Особливості КМОН і КНІ КМОН інтегральних комутаторів.

Традиційні КМОН-структури базуються на парі комплементарних *n*- і *p*-канального МОН-транзисторів. Їх переваги – це стандартна, промислова КМОН-технологія інтегральних схем (ІС), що добре інтегрується з цифровими схемами керування на одному кристалі ІС чи сенсорної МнК. Недоліками для сенсорних мікросистем є наявність ефекту підкладки, що проявляється у впливі зміни порогової напруги при зміні потенціалу стоку на нелінійність опору відкритого каналу МОН-транзистора. Окрім того, через *p-n*-переходи МОН-транзисторів виникають паразитні струми втрат, паразитні ефекти «защипки» КМОН-транзисторів, що критично для прецизійних сенсорних МнК.

Технологія «кремній-на-ізоляторі» (КНІ) КМОН-структур передбачає формування КМОН-транзисторів у кремнієвій плівці створеній на тонкому шарі ізолятора, як правило, із окислу кремнію SiO₂, відділеного від кремнієвої підкладки. Такі структури суттєво стабільніші в екстремальних умовах експлуатації, в умовах радіації та високих температур, що важливо для екстремальних та спеціальних умов експлуатації [9,11]. У КНІ КМОН-елементах завдяки діелектричній ізоляції і як наслідок мінімальним паразитним ємностям *p-n* переходів, значно збільшується можливість комутації високочастотних сигналів без спотворень [13].

У КНІ КМОН - елементах відсутній ефект «защипки», що пов'язано з діелектричною ізоляцією елементів, яка унеможливує формування паразитних тиристорних структур, і опір відкритого КНІ МОН-транзистора є суттєво стабільнішим у широкому діапазоні входних напруг.

Фізичні процеси в АЦК визначають точність передачі сигналу від сенсора. Коли транзистор переходить зі стану «ввімкнено» у стан «вимкнено», виникають два основні паразитні ефекти: ін'єкція заряду та проходження тактового сигналу.

Ін'єкція заряду - найбільш критичний процес для сенсорних МнК. Коли на затвор подається напруга для закриття каналу, мобільні носії заряду (електрони в *n*-каналі або дірки в *p*-каналі), що формували цей канал, мають якомось розсмоктатися. Особливість механізму

ін'єкції заряду у КМОН-структурах – заряд розподіляється між стоком і витоком, а частина заряду попадає в аналогову лінію, що зумовлює стрибок (викид імпульсу) на ємності навантаження. У стандартних КМОН-структурах цей ефект компенсують комплементарною парою (*n*- і *p*-каналами одночасно), для взаємної анігіляції носіїв зарядів, проте через різну рухливість електронів і дірок повна компенсація неможлива. Для КНІ КМОН-структур, завдяки тонкому активному шару кремнію-на-ізоляторі, об'єм тіла транзистора порівняно із КМОН суттєво менший, що у свою чергу, зменшує кількість носіїв заряду у каналі, та обмежує шляхи їх відтоку, що є перевагою КНІ КМОН-структур і суттєво знижує похибку від ін'єкції зарядів.

Особливості проходження тактового сигналу. Цей процес зумовлений паразитними ємностями між затвором і витоком, та затвором і стоком. Для стандартних КМОН-транзисторів затвор і канал розділені підзатворним діелектриком і утворюють конденсатор. Стрибок напруги на затворі через цей конденсатор може безпосередньо передаватися в аналогове коло, що приводить до виникнення короткочасної завади [3,5].

У КНІ КМОН-структурах відсутня ємність «канал-підкладка», а геометричні розміри переходів суттєво менші, оскільки переходи утворені вертикальними стінками КНІ-шару, а до ємності «канал-підкладка» послідовно під'єднано ємність через ізоляційний товстий окисел до основної підкладки. Сумарно це дозволяє суттєво зменшити загальну паразитну ємність, роблячи «прохід» тактового сигналу мінімальним.

Вплив ефекту підкладки та лінійність. У КМОН-транзисторах потенціал підкладки впливає на порогову напругу. Під час проходження сигналу змінної амплітуди він постійно «плаває», що модулює опір каналу і створює гармонійні спотворення. У КНІ КМОН-транзисторах вони можуть мати «плаваючу» підкладку або індивідуальне підключення контакту до тіла підканальної області. Це дозволяє стабілізувати відносно джерела, забезпечуючи ідеальну лінійність передачі сигналу від сенсора. Отже, хоча стандартна КМОН-технологія залишається економічно вигідною для споживчої електроніки, КНІ КМОН-технологія є безальтернативним вибором для високоточних сенсорних МнК. Вона забезпечує мінімальний рівень шумів, відсутність взаємних завад між каналами та стабільну роботу в складних умовах експлуатації [6,7].

Таблиця 1.

Базовий порівняльний аналіз для сенсорних МнК.

Характеристика	Стандартні КМОН- структури	КНІ КМОН - структури
Ізоляція каналів	Середня (через <i>p</i> -, <i>n</i> -переходи у підкладці)	Висока (діелектрична)
Струм витоку	Наноампери	Пікоампери
Лінійність	Залежить від напруги	Висока стабільність
Ступінь інтеграції	Висока	Дуже висока

Таким чином, на виході комутатора отримуємо три сигнали управління- DATA OUT, s11 та інверсний s12. Величина віртуальної ємності C1 впливає на процес перетворення синусоїдального сигналу в імпульсний, але напр., вже при величинах C1=0,05 пФ і більше- синусоїда в межах тривалості сигналу дозволу – суттєво спотворюється. Ця особливість може бути використана для побудови чутливих пікоємнісних сенсорних елементів, напр., при послідовному з'єднанні інтегральних пікоконденсаторів, які реагуватимуть на закорочення одного або більше послідовно з'єднаних.

КМОН і КНІ КМОН топології АЦК відповідно до схеми рис. 1 зображено на рис. 2. Особливостями КМОН і КНІ КМОН топологій є те, що з метою порівняння результатів моделювання, вони спроектовані фактично ідентичними з точки зору геометричних розмірів транзисторів, їх розташування і конфігурацій.

У КНІ КМОН варіанті, аналогічно КМОН, технологічно введено аналог кишень n-типу провідності для КНІ-плівки і подачею на них напруги зміщення від напруги живлення Vdd, що забезпечує оптимальне функціонування р-канальних КНІ МОН-транзисторів АЦК. N-канальні МОН- транзистори реалізовані безпосередньо у нелегованій КНІ- плівці на ізоляторі. Для порівняння результатів температурного впливу розташування та розміри кишень є аналогічними порівняно із КМОН і

максимально ідентичними. Проте оптимізація цього параметра дозволила б суттєво зменшити площу топології у КНІ КМОН варіанті [8,13].

Топології виконано за конструктивно-технологічними нормами технології 0, 12 мкм (120нм), довжини каналів транзисторів становлять 0,12 мкм, ширини каналів n-канальних транзисторів 0,30 мкм, р- канальних транзисторів – 0, 6 мкм. Таке співвідношення розмірів забезпечує симетрію струмів обох типів транзисторів. Результати комп'ютерного моделювання АЦК подано на рис. 3, а порівняльний аналіз споживання потужностей подано в табл. 2. та рис. 4.

Як видно з таблиці результатів моделювання і графіка споживання потужності в діапазоні температур від мінус 50 °С до 200 °С з кроком 25 °С, потужність споживання змінюється відповідно для КМОН елемента від 10,74 мкВт до 42,76 мкВт, спостерігається спотворення форми вихідних сигналів при температурах вище 175 °С. Для КНІ КМОН елемента споживана потужність при моделюванні за однакових умов відповідно змінюється від 2,54 мкВт (-50 °С) до 8,47 мкВт (200 °С). Тобто потужність споживання аналого-цифрового мультикомутатора зі структурами КНІ КМОН в середньому у 4,2 рази є меншою порівняно зі стандартними КМОН при низьких температурах, і у 5,05 рази при високих температурах (200 °С).

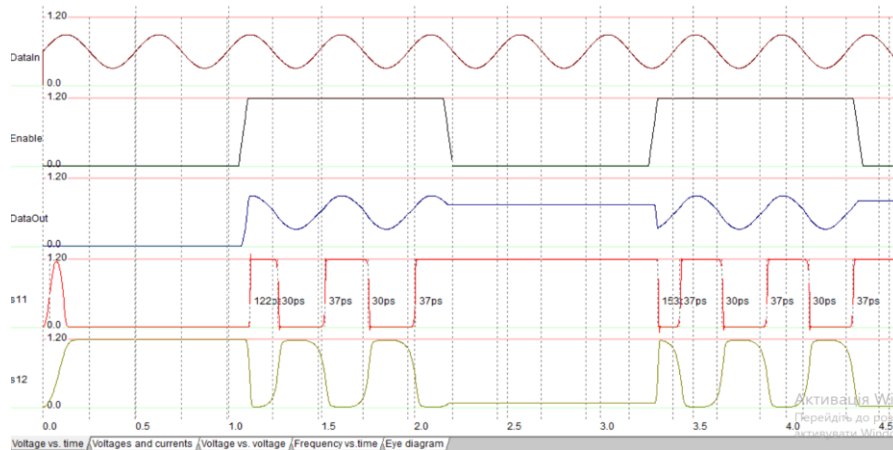


Рис. 3. Осцилограми моделювання інтегрального КНІ КМОН-комутатора безпосередньо із топології (згідно з рис. 2., зверху-донизу): часові залежності вхідного синусоїдального сигналу (InData-Sin), сигналу дозволу (Enable) та вихідних імпульсних сигналів (DataOut, s11, s12).

Таблиця 2.

Порівняльні результати моделювання споживання потужності залежно від температури для КМОН – і КНІ КМОН інтегрального АЦК.

T, °C	-50	-25	0	25	50	75	100	125	150	175	200
P, мкВт, КМОН	10,74	13,33	16,27	19,41	22,55	25,58	28,47	31,31	34,33	37,98	42,76
Температурний діапазон стабільної роботи	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Спотворення форми вихідних сигналів	Спотворення форми вихідних сигналів
P, мкВт, КНІ КМОН	2,54	2,85	3,25	3,74	4,31	4,49	5,61	6,31	7,02	7,74	8,47
Температурний діапазон стабільної роботи	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

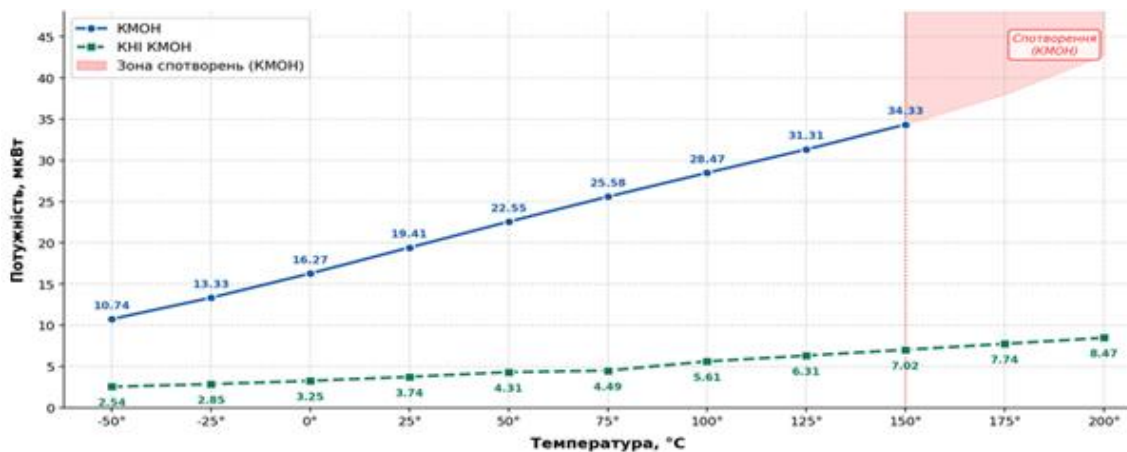


Рис. 4. Порівняння споживання потужностей залежно від температури для КМОН і КНІ КМОН АЦК.

Завдяки мінімальним струмам втрат, мінімальним паразитним ємностям, температурній стійкості [15] і КНІ КМОН АЦК можуть знайти застосування в сенсорних МнК, включаючи із тривимірними елементами [15], як комутатори в колах перенесення зарядів, в матрицях зображень, біомедичних сенсорах [16] і при дослідженні сигналів амплітудою в мілівольти.

Висновки

1. Порівняльний аналіз технологій: Проведено порівняльний аналіз аналого-цифрових комутаторів (АЦК), реалізованих за стандартною КМОН та КНІ КМОН технологіями (120 нм). Доведено, що використання КНІ-структур дозволяє повністю усунути ефект «защипки» та мінімізувати вплив підкладки, що забезпечує стабільну лінійність передачі слабких сигналів (мілівольтового діапазону) при амплітуді живлення 1,2 В.

2. Енергоефективність: Результати комп'ютерного моделювання безпосередньо із топологій показали, що КНІ КМОН-комутатор споживає в середньому в 4,5 рази менше потужності порівняно зі стандартним КМОН аналогом. Зокрема, при температурі 25 °C споживання становить 3,74 мкВт проти 19,41 мкВт відповідно.

3. Температурна стійкість: Встановлено критичну межу працездатності: стандартні КМОН-схеми

втрачають функціональність при температурах понад 175 °C через різке зростання струмів витоку (наноамперний діапазон). Натомість КНІ КМОН-пристрої зберігають повну працездатність при температурах 200 °C та вище, демонструючи струми витоку в пікоамперному діапазоні.

4. Практичне значення: Запропонована схемотехніка тривихідного мультирівневого комутатора з використанням віртуальної ємності 0,01 пФ є оптимальною для інтеграції у сучасні прецизійні МнК). Це робить її перспективною для застосування у біомедичних сенсорах, матрицях зображень та системах збору даних, що працюють в екстремальних умовах.

Робота виконана в рамках проекту МОНУ «Багатофункціональна сенсорна мікросистема неінвазійного неперервного моніторингу та аналізу біосигналів людини» Державний реєстраційний номер: 0124U000384.

Козут І.Т. - доктор технічних наук, професор;
Самарчук О.Є. – аспірант;
Пристайко А.Ю. – аспірант;
Комаришин Т.І. – аспірант.

- [1] R. Jacob Baker CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation, 4th Edition. Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, (2019).
- [2] J-P. Colinge Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI , Springer Science+Business Media New York, (2004 1997); <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9106-5>.
- [3] Simon M. Sze, Kwok K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley. (2006); <https://doi.org/10.1002/0470068329>.
- [4] D. Flandre et al. Fully depleted SOI CMOS technology for heterogeneous micropower, high-temperature or RF microsystems, (2001) [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00084-3](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00084-3).
- [5] M. Pasotti et al. Design Criteria of High-Temperature Integrated Circuits Using Standard SOI CMOS Process Up to 300°C, IEEE Access, 12, 58641 (2024); <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394521>.
- [6] M.J.M. Pelgrom, Analog-to-Digital Conversion, 3rd ed. Cham, Switzerland: Springer. (2017).
- [7] B. Razavi, Design of Analog CMOS Integrated Circuits, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education. (2016).

- [8] G. Wegmann, E.A. Vittoz, and F. Rahali, *Charge injection in analog MOS switches*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 22(6), 1091 (1987); <https://doi.org/10.1109/JSSC.1987.1052862>.
- [9] A. Shrivastava and A. Kumar, *On Minimizing Charge Injection Error Using Multi- Dummy Switches in MOS Transistors*, Microelectronics Journal, 145, 106038 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2024.106038>.
- [10] K. Iniewski, Ed. CMOS Time-Mode Circuits and Architectures. Boca Raton, FL, USA: CRC Press. (2018).
- [11] A. Hastings, The Art of Analog Layout, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall (2005).
- [12] H. Kappert et al. *High temperature SOI CMOS technology and circuit up to 300 °C*, in Proc. Thermal Measurement, Modeling & Management, 1 (2017); <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2015.7168845>.
- [13] J. Chen et al. *Optimized High-Voltage Analog Switch and Its Control Circuit Based on Silicon-on-Insulator Technology*, Electronics, 13(23), 4601 (2024); <https://doi.org/10.3390/electronics13234601>.
- [14] IEEE Xplore Digital Library. Accessed: May 4, 2026. (Online). Available: <https://ieeexplore.ieee.org>.
- [15] I.T. Kogut, A.A. Druzhinin, and V.I. Holota, *3D SOI elements for system-on-chip applications*, Advanced Materials Research, 276, 137 (2011); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.276.137>.
- [16] Б.С. Дзундза, І.Т. Когут, В.І. Голога, Л.В. Туровська, М.В. Дейчаківський, *Принципи побудови гібридних мікросистем для біомедичних застосувань*, Фізика і хімія твердого тіла, 23(4), 776 (2022); <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.776-784>.

I. Kohut, O. Samarchuk, A. Prystayko, T. Komaryshyn

Comparative Analysis of CMOS and SOI CMOS Analog-Digital Switches For SoC Under Extreme Conditions

Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ihor.kohut@cnu.edu.ua

The paper investigates the design and performance of integrated analog-digital switches (ADS) targeted for sensor micro-systems-on-a-chip (MSoC). As modern sensor systems require high accuracy and energy efficiency, the choice of appropriate semiconductor technology becomes highly critical. Modern sensor micro-systems-on-a-chip (MSoC) require high-precision and energy-efficient analog-digital switches (ADS) capable of operating under extreme environmental conditions.

Computer simulations were conducted using 120 nm design rules, accounting for parasitic layout effects, charge injection, and substrate influence. Identical physical layouts for both bulk CMOS and SOI CMOS versions of the devices were developed to ensure a consistent and valid comparison.

The simulation results demonstrate that SOI CMOS switches provide significantly higher linearity and lower leakage currents (in the picoampere range versus nanoamperes). It was established that the power consumption of the SOI-based switch is, on average, 4.5 times lower than its bulk CMOS counterpart across the temperature range from -50 °C to $+200\text{ °C}$. Furthermore, while the bulk CMOS switch fails at temperatures exceeding 175 °C , the SOI CMOS device maintains full functionality up to 200 °C . The results confirm that SOI CMOS structures are the optimal choice for MSoC operating in extreme environments. The proposed three-output switch design effectively converts sinusoidal signals into pulses, making it suitable for biomedical sensors and charge-transfer circuits.

Keywords: SOI CMOS technology, analog-digital switch, micro-system-on-chip (MSoC), charge injection, power consumption, high-temperature electronics, 120 nm process.