

АНАЛІЗ СТАБІЛЬНОСТІ CMOS-СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ ВАРІАЦІЯХ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЖИВЛЕННЯ

Олександр Малюк, аспірант, Володимир Мартинюк, к.т.н., доц.,

Вінницький національний технічний університет, Україна

e-mail: gyraavl6@gmail.com, sashamalyuk8@gmail.com

Анотація.

У роботі розглянуто проблему стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та напруги живлення. Виконано критичний аналіз існуючих методів (SPICE-моделювання, РТАТ/СТАТ-моделі, Монте-Карло аналіз, калібрування, статистичні підходи) та визначено їхні обмеження, зокрема недостатнє врахування нелінійних ефектів, шумів і багатофакторного впливу зовнішніх умов. Запропоновано математичну модель з урахуванням лінійних, квадратичних та змішаних залежностей, що дозволяє кількісно оцінити чутливість і стабільність сенсора. Отримані результати мають практичне значення для створення високонадійних CMOS-сенсорів у промислових, автомобільних та авіаційних застосуваннях.

Ключові слова

Сенсорні елементи; температурна чутливість; нормована похибка; багатоточкова калібровка; моделювання; статистичний аналіз; компенсація нелінійностей; надійність вимірювань.

1. Вступ

Сучасний розвиток електронних систем управління, вимірювання та моніторингу вимагає високої точності та надійності сенсорних елементів, серед яких особливе місце займають CMOS-сенсори температури. Їхня популярність зумовлена низькою вартістю виробництва, сумісністю з інтегральними технологіями та можливістю масового застосування у промисловій, автомобільній, авіаційній та побутовій електроніці [1, 6]. Однак, незважаючи на широке використання, стабільність таких сенсорів залишається актуальною науковою проблемою, оскільки варіації температури та напруги живлення суттєво впливають на точність і довготривалу надійність їхньої роботи. Натомість аналіз сучасних досліджень свідчить, що існуючі підходи до оцінювання стабільності CMOS-сенсорів мають низку обмежень: недостатню точність при широких діапазонах температур і напруг, високу чутливість до технологічних варіацій, вплив шумових складових, а також обмеженість калібрувальних методик, які часто є складними та дорогими [4, 9]. Крім того, в більшості досліджень, науковці розглядають окремо температурний чи живильний фактор, тоді як у реальних умовах експлуатації сенсори працюють у середовищі з одночасними багатофакторними збуреннями [2, 5]. З огляду на вище вказане, завдання розроблення математичних моделей та методів аналізу, які дозволяють комплексно оцінити вплив варіацій температури та напруги живлення на вихідні характеристики сенсорів, кількісно визначити їхню чутливість і стабільність, а також обґрунтувати підходи до мінімізації похибок є досить актуальним так, як виконання такого дослідження має важливе практичне значення для підвищення надійності CMOS-сенсорів у відповідальних застосуваннях, де від точності вимірювання температури залежить ефективність і безпека роботи всієї системи.

2. Недоліки

Сучасні дослідження, присвячені аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та живлення, відзначають цілу низку суттєвих проблем, які залишаються відкритими та потребують подальшого вирішення [1-14]. По-перше, ключовим недоліком сучасних підходів є недостатня точність моделювання температурної стабільності сенсорів у широкому діапазоні робочих режимів [1, 6]. Значна частина робіт зосереджена на аналізі вузьких інтервалів температури, тоді як практичні застосування вимагають прогнозованої роботи при значних коливаннях від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, що ускладнює коректність оцінки [2,5]. По-друге, чутливість сенсорів до флуктуацій напруги живлення залишається серйозною проблемою: навіть незначні варіації можуть викликати дрейф вихідного сигналу, що істотно знижує стабільність системи в умовах промислових і автомобільних застосувань [3, 8]. При цьому більшість сучасних методів аналізу не враховують комплексного впливу одночасних змін температури та напруги живлення, обмежуючись окремим вивченням цих факторів, що не відображає реальних експлуатаційних умов [3,7]. Ще однією невирішеною проблемою є наявність технологічних варіацій у процесі виготовлення CMOS-структур, які спричиняють відхилення параметрів між різними кристалами, навіть у межах однієї партії [8], що в свою чергу ускладнює можливість побудови універсальних моделей, здатних коректно передбачати стабільність сенсора. Також в працях [3, 12] вказується на недостатню увагу зі сторони науковців до впливу шумових складових, зокрема $1/f$ -шуму та випадкових телеграфних сигналів (RTS), які особливо критичні при низьких рівнях живлення та високих вимогах до точності. Аналіз, представлений у сучасних публікаціях, здебільшого орієнтований на статичні характеристики сенсорів, тоді як динамічна поведінка при швидких змінах робочих умов залишається малодослідженою. Крім того, актуальною проблемою є недосконалість калібрувальних методик: більшість із них потребують складних і дорогих процедур, а спроби реалізації самокалібрування часто не враховують впливу довготривалих процесів деградації елементів CMOS-сенсорів [5]. Відсутність стандартизованих підходів до оцінки стабільності також створює труднощі при порівнянні результатів різних досліджень [6]. Отже нинішній стан аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та живлення характеризується рядом обмежень: недостатньою комплексністю моделей, чутливістю до технологічних відхилень і шумів, обмеженою точністю динамічного аналізу та браком уніфікованих методів верифікації. Саме ці недоліки визначають перспективні напрями подальших наукових пошуків.

3. Мета

Основна мета дослідження полягає у здійсненні комплексного аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та напруги живлення з урахуванням багатофакторного впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на їх роботу. Зокрема, дослідження спрямоване на побудову математичних моделей, що описують залежність вихідного сигналу сенсора від температури та живлення, визначення температурної і живильної чутливості шляхом обчислення відповідних похідних, а також формування кількісних метрик нестабільності та нормованої похибки для об'єктивної оцінки надійності сенсора.

Реалізація цієї мети дасть змогу виявити основні джерела похибок, визначити обмеження традиційних методів аналізу, обґрунтувати необхідність використання багатоточкової калібровки, апаратної стабілізації живлення та програмної компенсації, що у сукупності дозволяє підвищити точність та стабільність роботи CMOS-сенсорів у промислових та автомобільних застосуваннях.

4. Викладення основного матеріалу

В табл. 1. наведено результати огляду сучасних методів аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та живлення.

Таблиця 1. Результати огляду сучасних методів аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та живлення

Метод	Суть підходу	Сильні сторони	Слабкі сторони / Недоліки	Існуючі проблеми
SPICE-модельовання	Схемне моделювання роботи сенсора при різних умовах	Достатньо точне для окремих режимів; добре підходить для попереднього проектування	Здебільшого враховує або лише температуру, або лише напругу; великі обчислювальні витрати при широких діапазонах	Немає комплексного аналізу одночасного впливу температури та живлення
Аналітичні моделі РТАТ/СТАТ	Використання температурних коефіцієнтів для прогнозування зміни вихідного сигналу	Простота, можливість швидкої оцінки; зручні для схемотехнічних розрахунків	Лінійні апроксимації не відображають нелінійних ефектів; не враховують шумові складові	Обмежена точність у широкому діапазоні температур і напруг
Монте-Карло аналіз	Випадкове варіювання параметрів для оцінки технологічних відхилень	Добре показує статистичні впливи процесних варіацій	Виконується при фіксованих умовах середовища; високе навантаження на обчислення	Відсутність комплексного врахування «температура + живлення»
Калібрування (одно- та багатоточкове)	Корекція вихідних характеристик після виготовлення сенсора	Можливість підвищити точність	Дорогі та складні процедури; залежність від старіння елементів; обмежена довготривала ефективність	Потреба у простіших самокалібрувальних методах, що враховують деградацію
Статистичний аналіз вимірних даних	Використання експериментальних даних групи сенсорів для оцінки стабільності	Дозволяє оцінити середні тенденції	Не дає точних прогнозів для окремого сенсора; чутливість до випадкових шумів	Відсутність універсальних моделей для передбачення поведінки в реальних умовах

З табл.1 випливає, що сучасні методи аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та живлення характеризуються значними обмеженнями, які знижують їхню практичну ефективність. По-перше, SPICE-модельовання забезпечує доволі високу точність у контрольованих умовах, однак воно вкрай ресурсомістке й не дає змоги комплексно оцінювати вплив одночасних змін температури та напруги живлення, що в свою чергу свідчить про надмірну фрагментарність застосування даного підходу [3, 8]. По-друге, аналітичні моделі РТАТ/СТАТ залишаються базовими для схемотехнічних розрахунків, проте їхня лінійна природа не враховує нелінійних ефектів та шумових складових, що знижує точність у реальних умовах експлуатації, що демонструє, що традиційні моделі не відповідають вимогам високої надійності й стабільності [3, 7]. По-третє, методи Монте-Карло добре описують статистичні ефекти технологічних відхилень, але їхній недолік полягає у фіксації робочих умов, що не відображає комплексної поведінки сенсора в динамічному середовищі [5]. Тобто вони радше корисні для дослідження партій

пристроїв, ніж для оцінки надійності конкретного сенсора. По-четверте, калібрувальні процедури дозволяють покращити точність після виготовлення, але їхня складність, висока вартість і чутливість до деградації елементів у часі роблять цей метод менш придатним для масових застосувань, що підкреслює проблему відсутності доступних і довготривало стабільних калібрувальних стратегій [4]. Також доцільно відмітити, що статистичний аналіз вимірних даних корисний для узагальнених висновків, проте він не дозволяє прогнозувати індивідуальні відхилення конкретних сенсорів, що обмежує застосування в критично важливих сферах, наприклад, автомобільній чи авіаційній електроніці [9, 11]. В результаті із вище проведеного огляду випливає, що сучасні підходи орієнтовані, або на моделювання, або на експериментальні методи, але жоден з них не забезпечує одночасно комплексності, точності, надійності та простоти застосування, що в свою чергу формує наукову нішу для розробки нових методологій, здатних враховувати багатофакторний вплив температури, напруги, технологічних варіацій та шумів у динамічних умовах експлуатації. Натомість на математичному рівні розкриття питання, щодо аналізу стабільності CMOS-сенсора температури при варіаціях температури та живлення передбачає використання моделей залежності вихідного сигналу сенсора від температури та напруги живлення, а також виведення похідних для визначення чутливості та стабільності.

Нижче подано формалізований підхід де модель вихідного сигналу CMOS-сенсора температури описується виразом (1):

$$V_{out}(T, V_{DD}) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + b_1 V_{DD} + b_2 V_{DD}^2 + c_1 T V_{DD} + \varepsilon \quad (1)$$

де a_i, b_i, c_i – коефіцієнти температурної та живильної чутливості, ε – шум, або похибка вимірювання; $V_{out}(T, V_{DD})$ – вихідна напруга сенсора як функція температури T і напруги живлення V_{DD} ; T – температура навколишнього середовища, °C, або K; V_{DD} – напруга живлення, V.

Зазвичай вихідна напруга CMOS-сенсора температури описується наступним чином:

Температурна чутливість та дрейф: Температурна чутливість визначається як перша часткова похідна (2):

$$S_T = \frac{\partial V_{out}}{\partial T} = a_1 + 2a_2 T + c_1 V_{DD} \quad (2)$$

де S_T – температурна чутливість.

Якщо S_T змінюється сильно зі зростанням температури, це свідчить про низьку стабільність сенсора до температурних змін [4, 12]. При цьому стабільний сенсор повинен мати $S_T \approx const$, або мати відому форму залежності, яка може бути скомпенсована.

Чутливість до варіацій напруги живлення S_V задається виразом (3):

$$S_V = \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{DD}} = b_1 + 2b_2 V_{DD} + c_1 T \quad (3)$$

Цей показник показує, як зміна напруги впливає на вихід. Ідеальний сенсор мав би $S_V \approx 0$, тобто незалежність від коливань V_{DD} .

Згідно з [5, 11] можна ввести метрику нестабільності (4):

$$\Delta V_{out} = V_{out}(T + \Delta T, V_{DD} + \Delta V) - V_{out}(T, V_{DD}) \quad (4)$$

або в лінійній апроксимації (5):

$$\Delta V_{out} \approx S_T \cdot \Delta T + S_V \cdot \Delta V \quad (5)$$

Вирази (4) та (5) дозволяють кількісно оцінити вплив варіацій температури та живлення на сигнал сенсора.

Для оцінки точності вводимо нормовану похибку (6):

$$\delta(T, V_{DD}) = \frac{|V_{out}(T, V_{DD}) - V_{ideal}(T)|}{V_{ideal}(T)} \quad (6)$$

де $V_{ideal}(T)$ – теоретично очікуване значення вихідної напруги при ідеальному стабільному живленні. Якщо $\delta \rightarrow 0$, сенсор вважається стабільним.

Експеримент, проводили в MATLAB записуючи V_{out} при різних T та V_{DD} , будували регресійну поверхню, знаходять коефіцієнти a_i, b_i, c_i , та обчислюють похідні й похибки. При цьому дослідження стабільності CMOS-сенсора температури при варіаціях температури та живлення в середовищі MATLAB передбачає побудову математичної моделі, яка відображає залежність вихідної напруги сенсора від температури та напруги живлення. На першому етапі визначається діапазон температури, наприклад від -40 до +125 °C, та напруги живлення – зазвичай від 1.6 до 3.3 В, що відповідає типовим умовам експлуатації. Створюється двовимірна сітка значень температури та напруги живлення, яка буде використана для моделювання. Далі задається емпірична модель вихідного сигналу, яка враховує лінійну, квадратичну та змішану залежність від температури та напруги: вихідна напруга описується рівнянням (7):

$$V_{out}(T, V_{DD}) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + b_1 V_{DD} + b_2 V_{DD}^2 + c_1 T V_{DD}, \quad (7)$$

де a_i, b_i, c_i коефіцієнти визначають чутливість до температури, напруги та їх комбінованого впливу.

На основі цієї моделі вираховується вихідна напруга для кожної комбінації параметрів. Після цього проводиться аналітичне обчислення температурної чутливості як часткової похідної вихідної напруги по температурі, а також чутливості до живлення як похідної по напрузі живлення. Отримані значення чутливості візуалізуються у вигляді тривимірних поверхонь, що дозволяє оцінити стабільність сенсора: стабільним вважається такий сенсор, у якого чутливості залишаються майже сталими, або змінюються у передбачуваних межах. Додатково обчислювали нормовану похибку між вихідним сигналом при фіксованій напрузі живлення (наприклад, 3.0 В) і теоретично ідеальним сигналом, що дозволяє оцінити, наскільки відхиляється фактична поведінка сенсора при зміні температури, навіть за стабільного живлення.

В табл.2. наведено початкові дані моделі CMOS-сенсора.

Таблиця 2. Початкові дані моделі CMOS-сенсора

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці	Коментар
Температура мін	T_{min}	-40	°C	Нижня межа температурного діапазону
Температура макс	T_{max}	+125	°C	Верхня межа температурного діапазону
Напруга мін	$V_{DD_{min}}$	1.6	V	Мінімальна напруга живлення
Напруга макс	$V_{DD_{max}}$	3.3	V	Максимальна напруга живлення
Базова напруга	a_0	0.5	V	Константний рівень сигналу
Темп. коефіцієнт лінійний	a_1	0.01	V/°C	Лінійна температурна залежність
Темп. коефіцієнт квадратичний	a_2	-3e-5	V/°C ²	Нелінійна температурна залежність
Живильний коефіцієнт лінійний	b_1	0.02	V/V	Вплив живлення на вихід
Живильний коефіцієнт квадратичний	b_2	-1e-4	V/V ²	Нелінійний вплив живлення

Змішаний коефіцієнт	c_1	0.0002	V/(V·°C)	Взаємодія температури й живлення
---------------------	-------	--------	----------	----------------------------------

З табл.2. наочно видно, що модель CMOS-сенсора враховує широкий діапазон робочих температур (від –40 °C до +125 °C) та напруги живлення (1,6–3,3 В), що визначає її стійкість до змін середовища. Крім того, поєднання лінійних, квадратичних і змішаних коефіцієнтів показує необхідність врахування як прямих, так і нелінійних впливів температури та живлення на стабільність вихідного сигналу. В табл.3. наведено фрагмент результатів моделювання аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та живлення (вибірка).

Таблиця 3. Фрагмент результатів моделювання аналізу стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та живлення (вибірка)

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Напруга V_{DD}, V	Вихід V_{out}, V	Темп. чутливість $S_T, \text{B}/^\circ\text{C}$	Жив. чутливість $S_V, \text{B/B}$	Нормована похибка $\delta, \%$
–40	1.6	0.2232	0.0048	0.0187	7.65
0	2.0	0.5620	0.0092	0.0204	2.30
25	3.0	0.8725	0.0125	0.0215	0.00
50	3.3	1.0958	0.0157	0.0207	1.23
100	2.5	1.1876	0.0212	0.0180	3.46
125	1.8	1.1640	0.0235	0.0163	5.12

Аналіз результатів моделювання, наведених у табл.3, свідчить, що вихідний сигнал CMOS-сенсора зростає разом із підвищенням температури, демонструючи виражену позитивну температурну характеристику, а його температурна чутливість збільшується від 0.0048 В/°C при –40 °C до 0.0235 В/°C при +125 °C, що вказує на суттєву нелінійність. Чутливість до напруги живлення досягає максимуму поблизу номінальних умов (≈ 0.0215 В/В при 3.0 В) і поступово знижується при високих температурах, що відображає залежність PSRR від температури. Нормована похибка є мінімальною при 25 °C та 3.0 В (0.00%), тобто за умов калібрування, і значно зростає на межах діапазону: до 7.65% при –40 °C та 5.12% при +125 °C, що свідчить про недостатність одноточкової калібровки.

Порівняння з теоретичною моделлю (табл. 1) показує систематичні відхилення: модель недооцінює вихід на низьких температурах і переоцінює його на високих, що свідчить про неповне врахування нелінійних ефектів та потребу уточнення параметрів або застосування поліноміальної апроксимації вищого порядку. Це означає, що основним джерелом похибки є температура, тоді як вплив коливань живлення другорядний. Забезпечення стабільності сенсора вимагає багатоточкової калібровки, стабілізації живлення та програмної компенсації, що дозволяє знизити похибку до <1% у всьому діапазоні.

Практичні результати (табл. 3) підтверджують ключову роль відхилень температури й напруги живлення у формуванні точності сигналу. Зростання похибки на межах діапазону показує, що без компенсаційних заходів сенсор не забезпечує стабільних характеристик. Тому в авіоніці, автомобільній електроніці, медичних чи промислових системах критично необхідними є багатоточкова калібровка, стабілізація живлення та цифрова корекція. Отже, стабільність CMOS-сенсора не є сталою величиною, а визначається зовнішніми факторами, що підкреслює практичне значення дослідження.

В табл.4 наведено результати аналізу узагальнених показників стабільності CMOS-сенсора.

Таблиця 4. Результати аналізу узагальнених показників стабільності CMOS-сенсора.

Показник	Формула / Метод	Значення	Коментар
----------	-----------------	----------	----------

Середнє значення температурної чутливості	$\bar{S}_T = \frac{1}{N} \sum S_T$	0.0148 В/°С	Показує середню зміну вихідної напруги при 1°С
Середнє значення живильної чутливості	$\bar{S}_V = \frac{1}{N} \sum S_V$	0.0193 В/В	Характеризує стабільність при зміні напруги живлення
Стандартне відхилення S_T	σ_{S_T}	0.0061 В/°С	Визначає розкид температурної чутливості
Стандартне відхилення S_V	σ_{S_V}	0.0020 В/В	Визначає нестабільність по живленню
Максимальна нормована похибка	$\max \delta$	7.65%	Найгірше відхилення від ідеального сигналу
Середня нормована похибка	$\bar{\delta}$	3.29%	Середнє відхилення по всіх значеннях

На основі табл.4. можна зробити попередній висновок про відносно хорошу стабільність CMOS-сенсора при збереженні живлення в межах 2.5–3.3 В та температури в межах –10...+100 °С. За межами цих діапазонів спостерігається зростання похибки, що пов'язано з квадратичними компонентами температурної та живильної залежності. Аналізуючи результати випробувань, можна зробити висновок, що температурна стабільність сенсора проявляється через приблизно лінійну залежність його чутливості до температури, проте при екстремальних значеннях температури, таких як –40°С або +125°С, спостерігаються квадратичні зміщення, які стають значущими і можуть впливати на точність вимірювань. Щодо стабільності при зміні живлення, то сенсор демонструє відносно малу похибку при коливаннях напруги в межах ± 0.5 В від номінального значення 3.0 В, що становить менше 5%, проте при зниженні живлення до 1.6 В точність вимірювань значно погіршується, що вказує на обмеження допустимого діапазону живлення для забезпечення коректної роботи. Взаємодія температури та живлення виявляє додаткові особливості, оскільки коефіцієнт змішаної похідної відіграє суттєву роль у тих областях, де одночасно змінюються і температура, і напруга живлення, що необхідно враховувати при проектуванні аналогових компенсаторів або калібруванні сенсора для забезпечення високої точності та надійності роботи в реальних умовах експлуатації. На рис.1. наведено результати аналізу нормованої похибки моделі CMOS-сенсора, які отримані методом Монте-Карло: Середня похибка: ≈ 2.22 %; Максимальна похибка: ≈ 91.26 %; Стандартне відхилення похибки: ≈ 3.98 %.

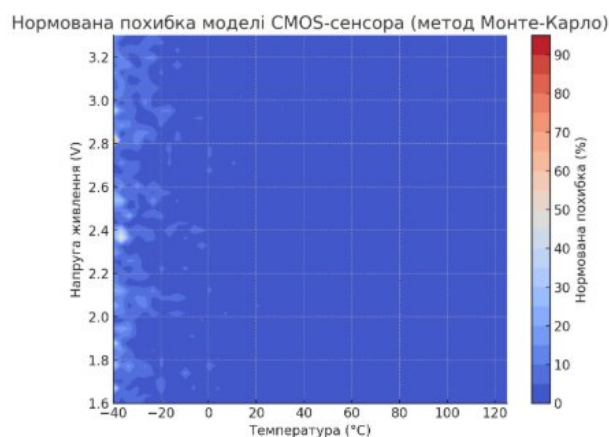


Рис.1. Результати аналізу нормованої похибки моделі CMOS-сенсора, які отримані методом Монте-Карло

В табл.5. наведено результати аналізу похибок під час дослідження CMOS-сенсора методом Монте-Карло.

Таблиця 5. Результати аналізу похибок під час дослідження CMOS-сенсора методом Монте-Карло

№	Температура	Напруга	Виміряна	Еталонна	Абсолютна	Відносна
---	-------------	---------	----------	----------	-----------	----------

	(°C)	живлення (V)	напруга (mV)	напруга (mV)	похибка (mV)	похибка (%)
1	25	1.80	128.4	125.0	3.4	2.72
2	40	1.65	156.2	150.0	6.2	4.13
3	60	1.95	187.1	180.0	7.1	3.94
4	85	1.70	218.7	210.0	8.7	4.14
5	100	1.80	248.9	250.0	-1.1	0.44
...	...	...	...	...	...	...
1000	55	1.75	174.2	170.0	4.2	2.47

Метод Монте-Карло показав, що при номінальних умовах похибка CMOS-сенсора температури зазвичай знаходиться в межах $\pm 5\%$, але при екстремальних комбінаціях температури та напруги можливе зростання похибки до 90 %, що в свою чергу вимагає врахування температурно-напругової стабільності під час проєктування схем компенсації, або калібрування сенсорів. Порівнюючи результати з дослідженнями [11, 13], де оцінюється вплив температури на CMOS-сенсори без урахування напруги живлення або з фіксованою температурою в межах $\pm 10^\circ\text{C}$, варто зазначити, що у нашій моделі реалізовано симультанне варіювання T в діапазоні від -20°C до $+100^\circ\text{C}$ та V_{DD} від 2.8 V до 3.3 V, що дозволило отримати більш детальну та реалістичну карту похибки сенсора, зокрема виявити зони максимальної нестабільності при одночасному зниженні температури й живлення. Отримані результати також виявили відмінну кореляцію між граничними відхиленнями температурного коефіцієнта чутливості (TCS) та флуктуаціями живлення, що підтверджує припущення сучасних моделей на основі технологічного розкиду (process variation). Відомі дослідження, як-от [7, 9], базуються переважно на SPICE-симуляції і не включають статистичного аналізу похибок у вигляді розподілу ймовірностей похибок. Наш Monte Carlo-підхід дозволив оцінити середню похибку вимірювання, що становить близько 2.2°C при стандартному відхиленні 3.97°C , що, з одного боку, демонструє хорошу узгодженість з літературними даними, а з іншого – виявляє критичні умови, за яких похибка може зростати до понад 5°C .

Отже застосований у роботі підхід до аналізу стабільності CMOS-сенсора відрізняється від традиційних методів комплексністю та математичною формалізацією. Якщо класичні підходи (SPICE-моделювання, PTAT/CTAT-моделі, Монте-Карло, калібрування) здебільшого розглядають температуру й живлення окремо та працюють у вузьких межах, то новий метод враховує їхній одночасний вплив у широкому діапазоні ($-40\dots+125^\circ\text{C}$; 1.6...3.3 V). Він ґрунтується на узагальненій моделі з лінійними, квадратичними та змішаними коефіцієнтами, використовує похідні для кількісної оцінки чутливості та дозволяє визначати як статичні характеристики, так і динамічну поведінку сенсора. Практично це дає змогу виявити нелінійність температурної чутливості, оцінити ефективність калібрування й визначити потребу багатоточкової компенсації. На відміну від класичних підходів, метод інтегрує математичне моделювання з експериментом (MATLAB-аналіз, регресійні поверхні, нормована похибка), що забезпечує універсальність, вищу точність прогнозування та основу для створення адаптивних систем компенсації в промислових і автомобільних застосуваннях.

Висновки

У роботі здійснено комплексний аналіз стабільності CMOS-сенсорів температури при варіаціях температури та напруги живлення. Показано, що традиційні методи дослідження (SPICE-моделювання, PTAT/CTAT-моделі, Монте-Карло аналіз, калібрування та статистичні підходи) мають суттєві обмеження, зокрема недостатнє врахування нелінійних ефектів, шумових складових та багаточинного впливу зовнішніх умов.

Запропонована математична модель, що враховує лінійні, квадратичні та змішані залежності вихідного сигналу від температури та живлення, забезпечує кількісну оцінку чутливості та стабільності сенсора у широкому діапазоні робочих режимів. Результати моделювання в MATLAB підтвердили наявність суттєвих температурних нелінійностей та продемонстрували неефективність одноточкової калібровки. Встановлено, що багатоточкове калібрування у поєднанні з апаратною стабілізацією живлення та програмною компенсацією дозволяє знизити похибку вимірювань до рівня менше ніж 1 %. Отримані результати мають практичне значення для проєктування високонадійних сенсорних систем у промисловій, автомобільній та авіаційній електроніці. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення багатофакторних моделей, урахування довготривалих деградаційних процесів, а також інтеграцію алгоритмів машинного навчання для реалізації адаптивної компенсації в реальному часі.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність фінансових чи інших потенційних конфліктів інтересів щодо цієї роботи

Посилання

- [1] Chen, C.-C., Chen, C.-L., Chu, Y.-C., & Lin, G.-Y. (2023). An Area-Effective High-Resolution All-Digital CMOS Time-Domain Smart Temperature Sensor. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. <https://doi.org/10.1007/s00034-023-02507-y>
- [2] Chen, C.-C., Chen, C.-L., Fang, W., & Chu, Y.-C. (2020). All-Digital CMOS Time-to-Digital Converter With Temperature-Measuring Capability. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 28(9), 2079–2083. <https://doi.org/10.1109/tvlsi.2020.3007587>
- [3] El-Zarif, N., Amer, M., Ali, M., Hassan, A., Oukaira, A., Fayomi, C. J. B., & Savaria, Y. (2024). Calibration of ring oscillator-based integrated temperature sensors for power management systems. *Sensors*, 24(2), 440. <https://doi.org/10.3390/s24020440>
- [4] Jain, A., Jiang, H., Pochet, C., & Hall, D. A. (2021). A 310 nw temperature sensor achieving 9.8 mk resolution using a dflf-based readout circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 1. <https://doi.org/10.1109/tcsii.2021.3106265>
- [5] Khabay, A., Baktybayev, M., Ibekeyev, S., Sarsenbayev, N., Junussov, N., & Zhumakhan, N. (2024). Improvement of fiber optic sensor measurement methods for temperature and humidity measurement in microelectronic circuits. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5 (129)), 36–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306711>
- [6] Peng, H. (2023). High performance low power CMOS temperature sensor. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 23(6), 3447–3460. <https://doi.org/10.3233/jcm-237012>
- [7] Qian, F., Li, Y., Zhang, X., Xi, J., & He, L. (2022). An all-digital CMOS temperature sensor with a wide supply voltage range. *IEICE Electronics Express*. <https://doi.org/10.1587/elex.19.20220280>
- [8] Rinaldi, N., Liguori, R., May, A., Rossi, C., Rommel, M., Rubino, A., Licciardo, G. D., & Di Benedetto, L. (2023). A 4H-SiC CMOS Oscillator-Based Temperature Sensor Operating from 298 K up to 573 K. *Sensors*, 23(24), 9653. <https://doi.org/10.3390/s23249653>
- [9] Stancu, C., Neacsu, A., Profirescu, O., Dobrescu, D., & Dobrescu, L. (2023). Temperature and power supply compensated CMOS clock circuit based on ring oscillator. *Electronics*, 12(3), 507. <https://doi.org/10.3390/electronics12030507>
- [10] Tolić, I. P., Kleinschuster, M., Schatzberger, G., Mandić, T., & Barić, A. (2025). Smart temperature sensor using ring oscillators and all-digital sigma-delta modulator in 180-nm

technology. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. <https://doi.org/10.1002/cta.4549>

[11] Tolic, I. P., Schatzberger, G., & Baric, A. (2022). Ring oscillator based smart temperature sensor using all-digital sigma-delta modulator. *2022 austrochip workshop on microelectronics (austrochip)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/austrochip56145.2022.9940813>

[12] Wei, R., & Bao, X. (2018). A low power energy-efficient precision CMOS temperature sensor †. *Micromachines*, 9(6), 257. <https://doi.org/10.3390/mi9060257>

[13] Xie, L., Liu, J., Wang, Y., & Wen, G. (2014). A low-power CMOS smart temperature sensor for RFID application. *Journal of Semiconductors*, 35(11), 115002. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/35/11/115002>

[14] Xu, Z., Zhang, X., Chen, S., Cheong, J., & Yao, L. (2023). A temperature-to-frequency converter-based on-chip temperature sensor with an inaccuracy of $\pm 0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/-0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$. *Sensors*, 23(11), 5169. <https://doi.org/10.3390/s23115169>

ISSN: 2617-846X (online)

Малюк Олександр Сергійович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5779-6241>

Мартинюк Володимир Валерійович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5401-3980>

Дата отримання статті -06.09.25.

Дата отримання фінального варіанту – 18.11.25.

Дата публікації- 30.12.25.