

ВОЛОДИМИР МАРТИНЮК

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5401-3980>e-mail: gyrav16@gmail.com

МАЛЮК ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-5779-6241>e-mail: sashamalyuk8@gmail.com

СУЧАСНІ CMOS СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ

У статті представлено огляд сучасних досягнень у сфері CMOS-сенсорів температури. Розглянуто різні типи CMOS-сенсорів, що використовують сигнали в часовій області для підвищення точності та енергоефективності вимірювань. Представлено інноваційні рішення, такі як сенсори з вбудованою компенсацією кривизни та алгоритмами калібрування, що забезпечують високу точність навіть у широкому діапазоні температур. Детально описано архітектуру, принципів схеми та результати досліджень запропонованих сенсорів. Показано, що CMOS-технології є перспективними для реалізації високоточних і компактних температурних сенсорів завдяки їх мініатюрності, інтеграції з цифровими системами та низькій вартості виробництва.

Ключові слова: CMOS сенсори, температурні сенсори, часова область, калібрування, енергоефективність, інтелектуальні сенсори, компенсація кривизни, висока точність, цифрові системи, мініатюрність.

VOLODYMYR MARTYNIUK, OLEKSANDR MALIUK

Vinnytsia National Technical University

MODERN CMOS TEMPERATURE SENSORS

The evolution of temperature sensing technologies has reached new heights with the integration of CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) technology. This article provides an in-depth review of the advancements in CMOS temperature sensors, focusing on their innovative design approaches and technological improvements. These sensors are crucial components in various applications such as automotive systems, healthcare devices, environmental monitoring, and consumer electronics, where precise temperature control is vital.

CMOS temperature sensors have emerged as a response to the limitations of traditional sensors like thermocouples and thermistors. These conventional sensors often fail to meet the high precision, low power consumption, and compactness requirements demanded by modern applications. CMOS technology offers significant advantages, including miniaturization, low power consumption, and seamless integration with digital systems, making it an ideal choice for developing next-generation temperature sensors.

This article explores the various architectural designs employed in CMOS temperature sensors, particularly emphasizing time-domain approaches. Unlike traditional voltage or current-based sensors, time-domain CMOS sensors operate by measuring parameters such as time delays or oscillation frequencies, which vary with temperature. This methodology not only enhances the accuracy of temperature measurements but also reduces the overall power consumption, making these sensors highly suitable for energy-constrained environments. The article classifies these sensors based on their temperature evaluation functions and discusses the various signal types used in time-domain sensing, such as frequency, period, and delay time.

Additionally, the article delves into the integration of curvature compensation techniques in CMOS sensors. These techniques are essential for addressing the non-linear temperature characteristics inherent in semiconductor devices. By incorporating curvature compensation, CMOS temperature sensors can maintain high accuracy across a broad temperature range, which is critical for applications requiring reliable thermal management. The article presents detailed architectural designs and circuit implementations that include curvature compensation mechanisms, supported by experimental data and comparative analyses to demonstrate their effectiveness.

Another critical aspect of CMOS temperature sensors covered in this article is the implementation of advanced calibration algorithms. Calibration is vital for ensuring the accuracy and reliability of temperature measurements over time. The article discusses multi-point calibration techniques and digital compensation strategies that help minimize measurement errors and improve sensor performance.

In conclusion, this article offers a comprehensive review of the state-of-the-art in CMOS temperature sensors, covering their innovative designs, operational principles, and potential applications. It underscores the importance of continuous research and development in this field to meet the growing demands for high-performance temperature sensing solutions in today's technologically advanced landscape. This review aims to provide valuable insights for researchers, engineers, and industry professionals engaged in the design and deployment of advanced temperature monitoring systems.

Keywords: CMOS sensors, temperature sensors, time domain, calibration, energy efficiency, intelligent sensors, curvature compensation, high accuracy, digital systems, miniaturization.

Вступ

Температурні сенсори є важливими компонентами систем вимірювання, керування та моніторингу, і широко застосовуються в промисловості, наукових дослідженнях, медицині, транспорті та інших галузях. З розвитком технологій та зростанням вимог до сучасних автоматизованих систем, традиційні сенсори, такі як термомпари, резистивні температурні пристрої (RTD) та термістори, не завжди задовольняють потреби ринку. У відповідь на це, з'явилися напівпровідникові сенсори температури, які пропонують низку переваг, включаючи кращу завадостійкість, інтеграцію з цифровими системами, менший розмір та підвищену продуктивність.

Сучасні температурні сенсори все частіше інтегрують аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що дозволяє створювати інтелектуальні сенсори з цифровими виходами, зручними для прямої інтерпретації в цифрових системах. Зокрема, інноваційні рішення на основі CMOS технологій дозволяють зменшити розмір та енергоспоживання таких сенсорів, а також підвищити їх точність та стабільність.

Один із напрямів розвитку – це перехід від використання аналогових сигналів напруги та струму до сигналів у часовій області, таких як частота та час затримки, що дозволяє більш ефективно використовувати

сенсори в умовах зменшення напруги живлення та масштабування процесу CMOS. Такі підходи, як використання інверторів у часовій області, пропонують економічно ефективні рішення з простою конструкцією, але водночас викликають питання щодо лінійності та точності вимірювань, що потребує застосування додаткових технік компенсації кривизни.

Для вирішення проблем з точністю вимірювань у широкому діапазоні температур, пропонуються різні підходи до калібрування, включаючи багатоточкове калібрування та цифрову компенсацію кривизни. Новітні рішення включають використання інтелектуальних сенсорів на основі транзисторів з інноваційними алгоритмами калібрування, що дозволяє значно покращити точність до рівня $\pm 0,11$ °C у діапазоні від -45 °C до 125 °C.

Мета цієї статті полягає у наданні огляду сучасних досягнень у розробці та впровадженні CMOS сенсорів температури, дослідженні їхніх технічних характеристик, архітектурних рішень

Результати дослідження

Для класифікації CMOS-сенсорів температури у часовій області [1] в цій статті визначено функцію оцінки температури як відношення двох вимірюваних сигналів у часовій області. CMOS-сенсори температури у часовій області можуть бути класифіковані на основі типів функцій оцінки температури. Серед сигналів часової області, які зазвичай використовуються в таких сенсорах, є частота, період і час затримки. Оскільки частота є оберненою величиною періоду, ми можемо розглядати період і час затримки як основні сигнали у часовій області [2]. Період пов'язаний з осцилятором або зовнішнім тактовим сигналом, тоді як час затримки відноситься до осередку затримки або лінії затримки. Якщо позначити залежний від температури період і незалежний від температури період як $1/f(T)$ і $1/f_{REF}$, відповідно, а залежний і незалежний від температури час затримки як $\tau(T)$ і τ_{REF} , відповідно, то з цих 4 типів сигналів можна отримати загалом 16 типів функцій оцінки температури, як показано на рисунку 1. Однак, якщо виключити 4 типи функцій оцінки, які не залежать від температури, залишається 12 типів функцій оцінки температури [3]. Було позначено їх, як тип 1, тип 2, ..., тип 12 і зображено їх концептуальні діаграми для полегшення розуміння на рисунку 2. Тут $X(T)$ – це функція оцінки температури.

	numerator			
	τ_{REF}	$\tau(T)$	$1/f_{REF}$	$1/f(T)$
denominator		τ_{REF}	type 1	type 2
$\tau(T)$	type 3	type 4	type 5	type 6
$1/f_{REF}$	type 7	type 8	type 11	type 12
$1/f(T)$	type 9	type 10	type 11	type 12

Рис. 1. Категоризація на основі функцій оцінки температури

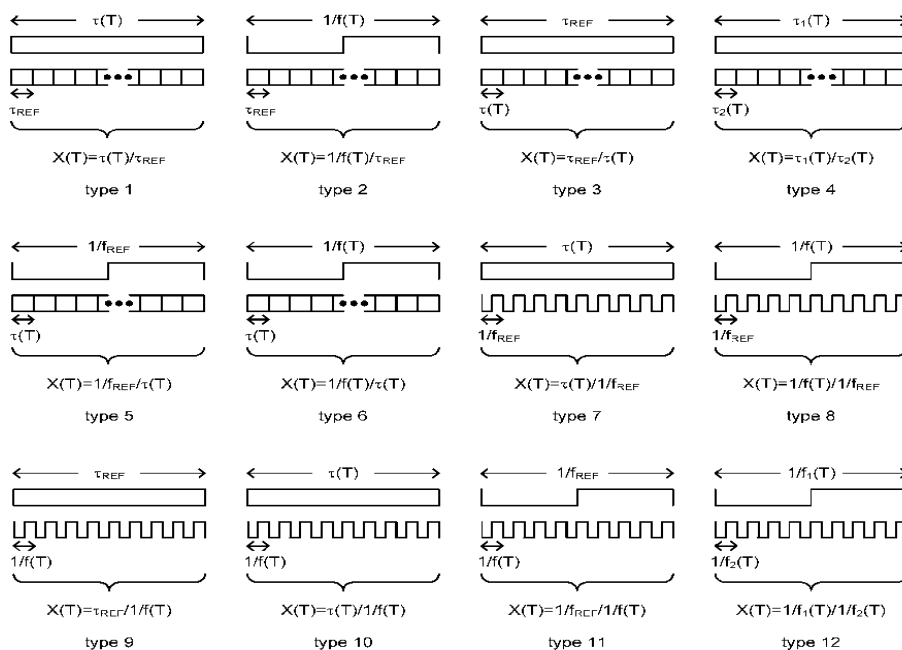


Рис. 2. Концептуальні діаграми кожного типу

З 2005 року було опубліковано кілька десятків робіт, присвячених CMOS-сенсорів температури у часовій області [4]. Усі вони можуть бути класифіковані на основі функцій оцінки температури. Як показано на

рисунку 3, деякі типи функцій використовуються частіше, тоді як інші типи досі не застосовувалися. Використовуючи цю класифікацію, показано, що CMOS- сенсори температури у часовій області мають різні характеристики з точки зору швидкості перетворення температури, площі матриці, компенсації змін процесу, температурної похибки, чутливості до напруги живлення тощо [5].

	numerator		denominator		
	τ_{REF}	$\tau(T)$	$1/f_{REF}$	$1/f(T)$	
τ_{REF}	X		X		} delay cell or delay line
$\tau(T)$	[40]	[33, 36, 38, 47]	[54]		
$1/f_{REF}$	X		X		} oscillator or external clock
$1/f(T)$		[35, 37, 51]		[43, 45, 48]	
			[34, 39, 41, 42, 46, 52, 55]	[44, 49, 50, 53]	
	} delay cell or delay line		} oscillator or external clock		

Рис. 3. Класифікація сенсорів температури CMOS у часовій області

На рисунку 4 зображена блок-схема запропонованого інтелектуального сенсора температури, який включає вбудований генератор компенсації кривизни [6]. Ця схема є інноваційним рішенням, яке спрямоване на підвищення точності вимірювання температури та розширення діапазону робочих температур. В основі схеми лежить генератор імпульсів, ширина яких пропорційна температурі (PTAT), що дозволяє значно зменшити похибки вимірювання [7].

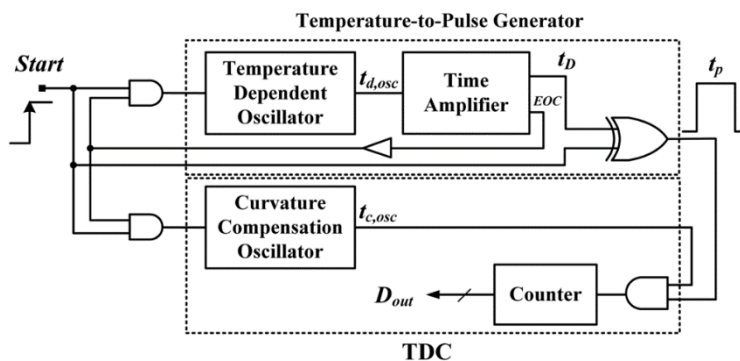


Рис. 4. Блок-схема запропонованого інтелектуального сенсора температури

Крім того, видається сигнал закінчення перетворення (EOC), щоб вимкнути два осцилятори для економії енергії за допомогою двох вентилів І. Для забезпечення правильного підрахунку вставляється буфер затримки для затримки EOC. Підсилювач часу, показаний на рисунку 5, використовується для посилення часу, щоб отримати достатню температурну роздільну здатність. Фіксоване значення $n = 1,024$ (коефіцієнт посилення) у підсилювачі часу було прийнято для посилення ширини періоду. Додатковий DFF був вставлений для усунення глюків. Більше попередньо встановлене вхідне значення призводить до більшого часу циркуляції вихідного періоду коливального періоду та довшої теплової затримки t_D .

Генератор імпульсів складається з кільцевого генератора з можливістю повторного запуску, підсилювача часу та вентиля XOR. Після генерації імпульсу з шириною PTAT, він подається на вихідний лічильник, який здійснює одночасне квантування цього імпульсу в цифровий вихід, що значно полегшує подальшу обробку сигналу. Важливо зазначити, що для економії енергії генератор вимикається після завершення перетворення за допомогою сигналу закінчення перетворення (EOC).

Для досягнення високої роздільної здатності температури використовується підсилювач часу, який посилює тривалість імпульсу. Фіксоване значення коефіцієнта посилення ($n = 1,024$) забезпечує достатню роздільну здатність без необхідності значного збільшення площі мікросхеми. Додатковий D-тригер використовується для усунення можливих глюків у системі, що сприяє підвищенню надійності роботи сенсора [8].

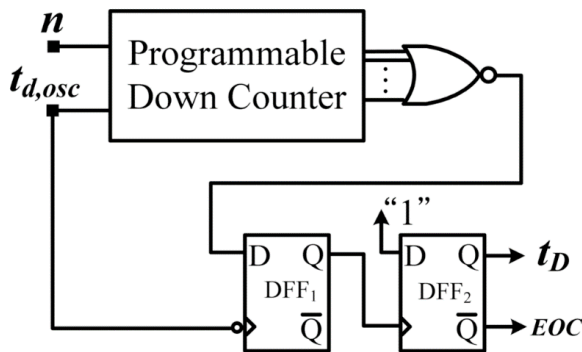


Рис. 5. Структура прийнятого підсилювача часу

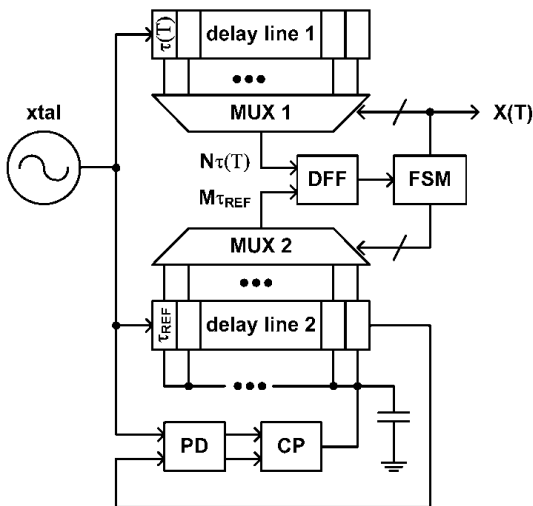
Як було зазначено t_d , створений генератором на основі інвертора, демонструє кривизну, яка може спричинити похибки в процесі вимірювання температури. Для вирішення цієї проблеми використовується вбудований генератор компенсації кривизни, який компенсує ці похибки та забезпечує точніше вимірювання.

Запропонований сенсор має кілька переваг порівняно з попередніми рішеннями. Зокрема, використання структури на основі осциляторів дозволяє зменшити вимоги до довжини лінії затримки, що, в свою чергу, зменшує складність схеми та площу мікросхеми. Крім того, відсутність необхідності у великій кількості логічних елементів сприяє підвищенню роздільної здатності температури без значного збільшення розміру пристрою.

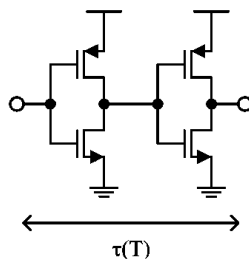
Раніше опубліковані CMOS-сенсори температури у часовій області, представлені в літературі, можна віднести до кількох типів, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Відповідно до наведених схем, функції оцінки температури базуються на різних підходах до використання часу затримки, який залежить або не залежить від температури. Наприклад, деякі сенсори використовують дві лінії затримки для генерації залежних і незалежних від температури імпульсів, що дозволяє отримати високоточне вимірювання.

Сенсори температури в часовій області, які використовуються у CMOS-технології, можуть бути класифіковані на кілька типів залежно від принципів їх роботи, схемних рішень та методу обробки сигналів.

Третій тип сенсорів температури використовує дві лінії затримки. Одна з ліній генерує залежний від температури час затримки, тоді як інша лінія затримки незалежна від температури, як показано на рисунку 6. Це дозволяє отримати високу температурну роздільну здатність за рахунок великої площі матриці, але виникають проблеми з температурною похибкою через невідповідність між затримками на великій площі [9].



(a)



(b)

Рис. 6. Архітектура сенсора температури CMOS у часовій області типу 3 та комірки затримки інвертора

Четвертий тип сенсора також використовує дві лінії затримки, але обидві вони є залежними від температури. В одній лінії затримки використовуються інвертори, чутливі до температури, а в іншій – менш чутливі комірки затримки, як показано на рисунку 7. Це дозволяє отримати швидке перетворення температури, але проблема не відповідностей між комірками затримки залишається [10].

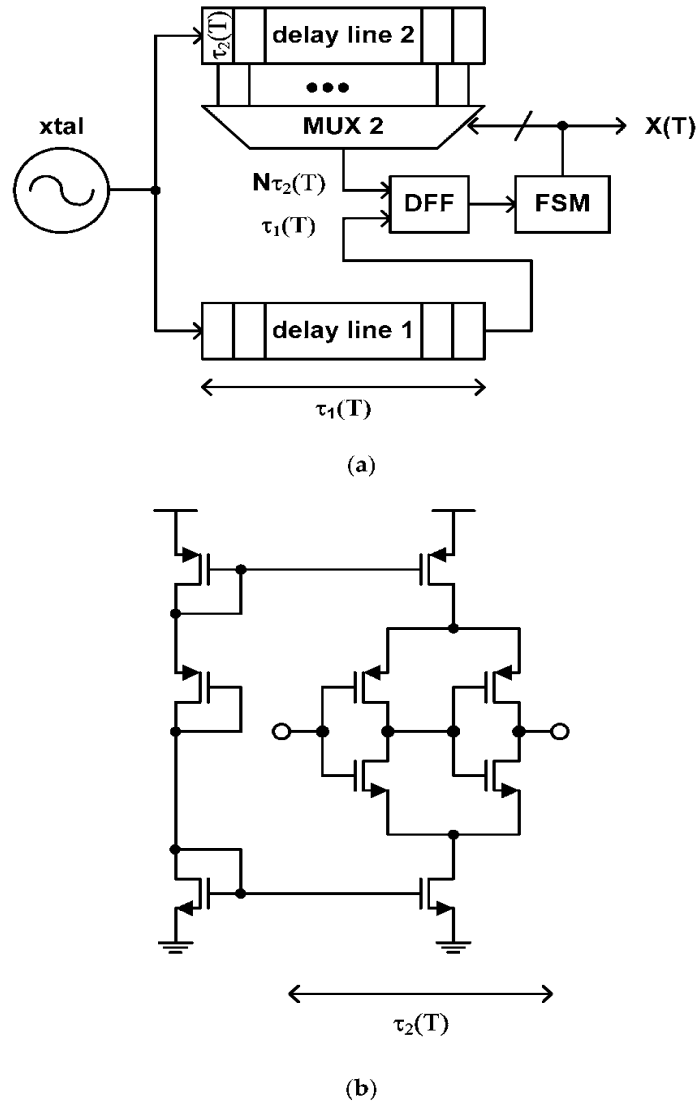


Рис. 7. Типова структура сенсора температури типу 4 і комірка затримки інвертора, яка відносно не чутлива до температури

П'ятий тип відрізняється від попередніх типів тим, що використовує лише одну лінію затримки, що зменшує площу матриці, як показано на рисунку 8. Проте, для досягнення високої роздільної здатності все одно потрібна велика кількість комірок затримки, що може спричинити температурні похибки [11].

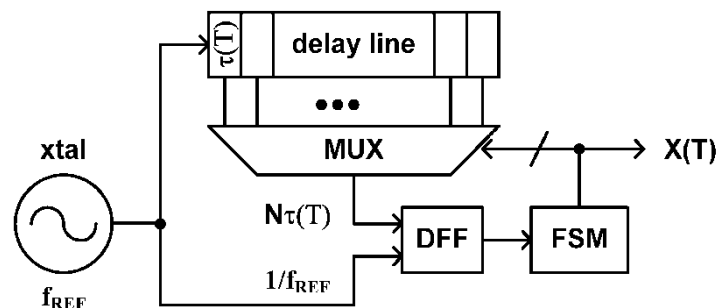


Рис. 8. Архітектура CMOS-сенсори температури типу 5 у часовій області

Шостий тип сенсора використовує дві лінії затримки з різними часовими коефіцієнтами залежно від температури, як показано на рисунку 9. Завдяки цьому можна отримати високу роздільну здатність при меншій площі матриці, проте швидкість перетворення є відносно низькою [12].

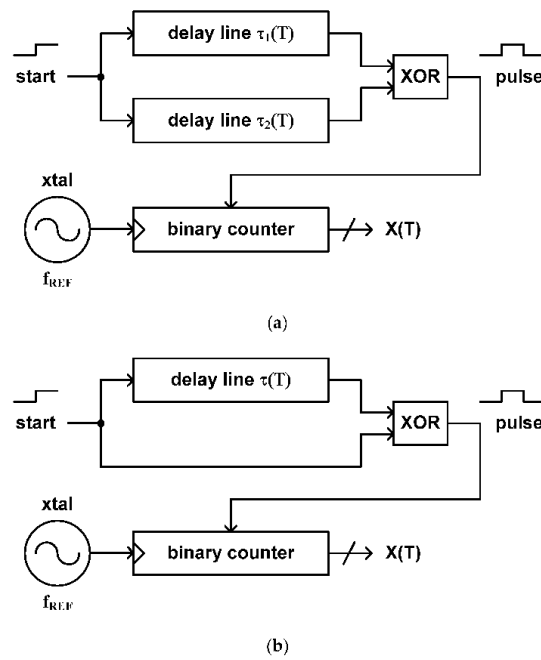


Рис. 9. Архітектура CMOS- сенсора температури у часовій області типу 7, що містить дві лінії затримки та одну лінію затримки

Архітектура цього сенсора включає температурно-залежний осцилятор і двійковий лічильник для підрахунку кількості імпульсів, як показано на рисунку 10. Це дозволяє зменшити площу матриці, але призводить до низької швидкості перетворення.

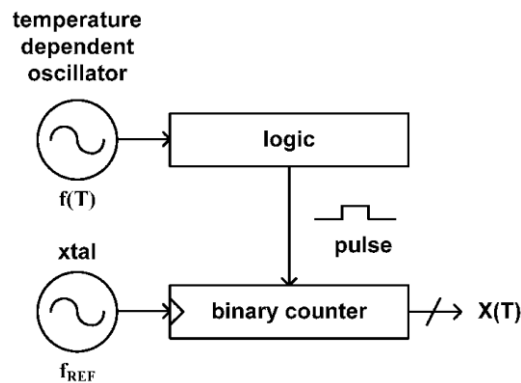


Рис. 10. Архітектура CMOS-сенсора температури типу 8 у часовій області

Сьомий тип відрізняється тим, що функція оцінки температури залежить від відношення кількості імпульсів, згенерованих залежним від температури осцилятором, до опорного тактового сигналу, як показано на рисунку 11. Це дозволяє реалізувати сенсор у дуже малій площі матриці, але зі зниженою швидкістю перетворення [13].

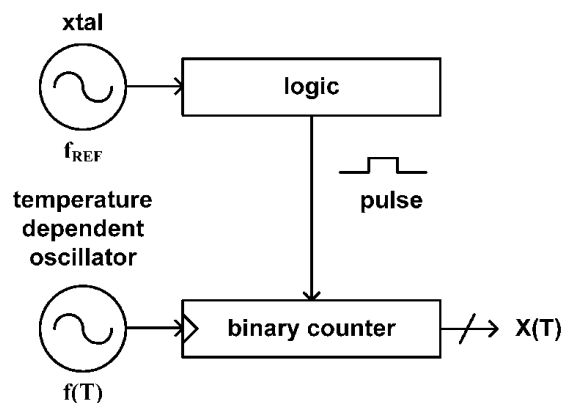


Рис. 11. Архітектура CMOS-сенсора температури типу 11 у часовій області

Восьмий тип використовує два різні генератори, чутливі до температури, для оцінки температури, як показано на рисунку 12. Відношення періодів цих генераторів використовується для визначення температури. Ця схема також дозволяє досягти високої роздільної здатності при малій площі матриці, але потребує складнішого калібрування [14].

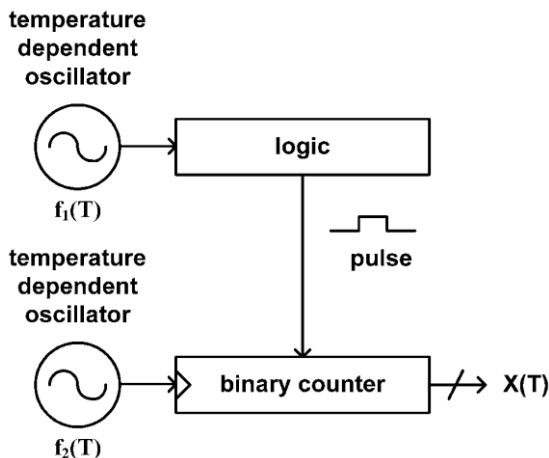


Рис. 12. Архітектура CMOS-сенсора температури типу 12 у часовій області

Кожен з цих типів сенсорів має свої переваги та недоліки, що впливає на вибір залежно від конкретних вимог до точності, роздільної здатності, швидкості перетворення та розмірів мікросхеми.

Проте існують і певні обмеження. Наприклад, великі масиви комірок затримки можуть займати значну площу мікросхеми, що ускладнює інтеграцію таких сенсорів у малі пристрої. Крім того, невідповідності між комірками можуть погіршити точність вимірювання температури, що вимагає додаткових заходів щодо компенсації.

В цілому, запропонований інтелектуальний сенсор температури з вбудованим генератором компенсації кривизни є перспективним рішенням для точного вимірювання температури в різних додатках. Його компактність, простота конструкції та висока точність роблять його привабливим варіантом для використання в сучасних технологіях.

Запропонований сенсор, продемонстрував значне покращення у зменшенні розміру мікросхеми до 0,07 мм², що є найменшим серед аналогічних сенсорів на основі інвертора, виготовлених за CMOS-технологією. Крім того, він показав відмінні результати при тестуванні в температурному діапазоні від -40 °C до 120 °C, що ілюструється на рисунках 13 і 14. Завдяки вдосконаленню методики компенсації кривизни вдалося досягти значного підвищення точності вимірювань, а також зниження похибки [15].

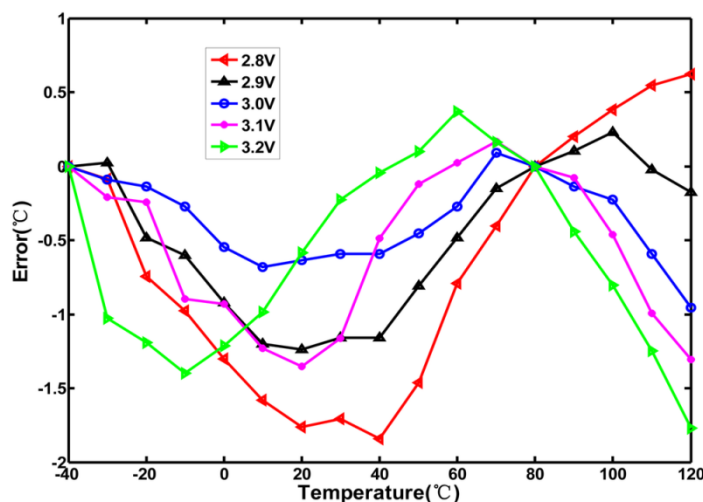


Рис. 13. Похибки вимірювання в діапазоні -40–120 °C для зміни напруги живлення

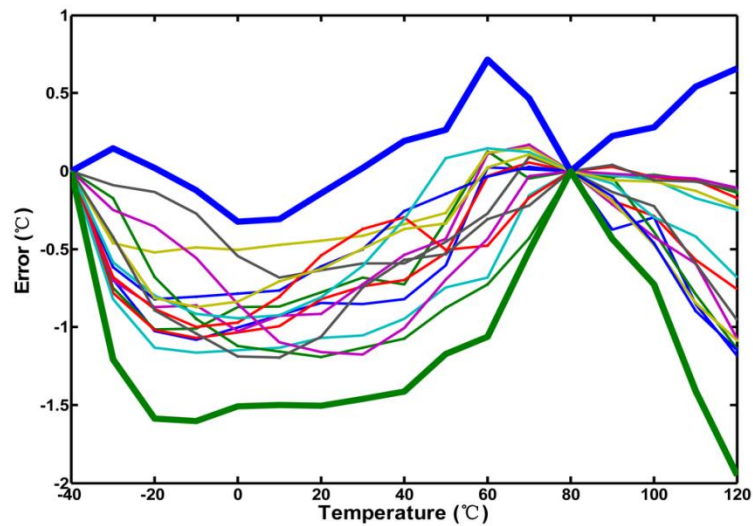


Рис. 14. Похибки вимірювання в діапазоні $-40-120$ °C для 14 тестових мікросхем; жирні лінії позначають значення $\pm 3\sigma$

Під час тестування також було враховано варіації процесу, що підтверджується гістограмою роздільної здатності на рисунку 15. Завдяки низькому рівню споживання енергії в 23 мкВт, даний сенсор забезпечує стабільну роботу без значного самонагрівання, що робить його надзвичайно ефективним і енергоощадним рішенням.

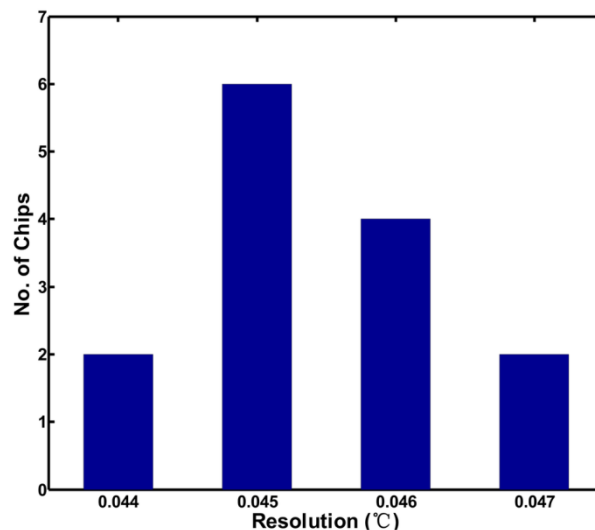


Рис. 15. Гістограма роздільної здатності 14 тестових мікросхем

Запропонований сенсор температури, реалізований за допомогою процесу CMOS 0,18 мкм із шістьма металевими шарами, демонструє високу ефективність у поєднанні з низьким енергоспоживанням і компактними розмірами. З площею активної області всього 0,422 мм², він забезпечує точні вимірювання температури в діапазоні від -45 °C до 125 °C [16]. Сенсор працює при напрузі живлення 1,8 В і тактовій частоті 25 кГц, споживаючи лише 201 мкА струму, що є значним досягненням для подібних пристроїв.

Однією з ключових особливостей цього сенсора є його здатність до точного калібрування завдяки використанню алгоритму нейронної мережі MLCP. Це дозволило знизити максимальну похибку з 0,23 °C (3σ) до 0,11 °C (3σ) після калібрування, з максимальною похибкою меншою за 0,06 °C у найпоширенішому діапазоні температур від 0 до 100 °C. Ці результати свідчать про високу ефективність алгоритму MLCP, який не лише покращує точність вимірювань, але й знижує кількість необхідних параметрів у порівнянні з іншими моделями, що робить його ефективним рішенням для комерційного застосування.

Крім того, сенсор пройшов тестування на предмет його температурної стабільності та впливу варіацій процесу виробництва. Результати показали, що розкид роздільної здатності між різними мікросхемами становить лише $\pm 3,3\%$, що є прийнятним показником для більшості застосувань. Гістограма демонструє низький рівень варіацій роздільної здатності серед 18 зразків, що додатково підкреслює надійність та стабільність запропонованого сенсора.

У порівнянні з іншими технологіями, запропонований сенсор виділяється своєю високою роздільною здатністю понад 0,01 °C і енергоспоживанням 275,4 мкВт при напрузі живлення 1,8 В. Це забезпечує роздільну

здатність ФОМ на рівні 661 с, що є видатним показником для подібних пристроїв. Попри те, що споживана потужність сенсора дещо вища, ніж у деяких інших аналогічних рішень, його висока точність і стабільність роблять його ідеальним для застосувань, що вимагають точного вимірювання температури в широкому діапазоні умов.

Таким чином, цей сенсор температури демонструє суттєві переваги у точності, стабільності та надійності, що робить його перспективним рішенням для широкого кола застосувань, включаючи промислові та побутові пристрої.

Висновок

У цьому документі розглянуто сучасні досягнення в галузі CMOS-сенсорів температури, акцентуючи увагу на інноваційних підходах до підвищення точності вимірювань. Запропоновані сенсори використовують компенсацію кривизни та алгоритми калібрування для досягнення високої точності у широкому діапазоні температур. Зокрема, сенсор на базі технології TSMC 0,35 мкм забезпечує максимальну похибку 1,4 °C і високу роздільну здатність 0,045 °C при низькому енергоспоживанні. Інший сенсор на основі VJT у процесі CMOS 0,18 мкм використовує алгоритм нейронної мережі MLCP, що дозволяє зменшити похибку до 0,11 °C, демонструючи відмінну точність у температурному діапазоні від -45 °C до 125 °C.

Огляд різних типів CMOS-сенсорів температури, класифікованих за функціями оцінки температури, показує їх різноманітність у швидкості перетворення, площі матриці, компенсації варіацій процесу та чутливості до напруги живлення. Ці інновації забезпечують високу точність, мале енергоспоживання і компактність, що робить ці сенсори перспективними для застосування в низькопотужних та високоточних інтеграціях у НВІС і інших галузях.

References

1. Chen C., Chen H. (2013). A Linearization Time-Domain CMOS Smart Temperature Sensor Using a Curvature Compensation Oscillator. (Vol. 15, Issue 5, pp. 11442–11453). MDPI AG. [\[CrossRef\]](#)
2. Byun S. (2020). Categorization and Characterization of Time Domain CMOS Temperature Sensors. (Vol. 15, Issue 5, pp. 11442–11453). MDPI AG. [\[CrossRef\]](#)
3. Wei R., Lin H. Chen Q., Huang G., Hu W. (2023). A CMOS Temperature Sensor with a Smart Calibrated Inaccuracy of ± 0.11 (3σ). (Vol. 15, Issue 5, pp. 11442–11453). MDPI AG. [\[CrossRef\]](#)
4. Krummenacher, P.; Oguey, H. Smart temperature sensor in CMOS technology. *Sens. Actuators A: Phys.* 1990, 22, 636–638.
5. Meijer, G.C.; Wang, M.G.; Fruett, F. Temperature sensors and voltage references implemented in CMOS technology. *IEEE Sens. J.* 2001, 1, 225–234.
6. Pertijs, M.A.P.; Makinwa, K.A.A.; Huijsing, J.H. A CMOS smart temperature sensor with a 3σ Inaccuracy of ± 0.1 °C From -55 °C to 125 °C. *IEEE J. Solid-State Circuit* 2005, 40, 2805–2815.
7. Chen, C.-C.; Chen, P.; Liu, A.-W.; Lu, We.-F.; Chang, Y.-C. An accurate CMOS delay-line-based smart temperature sensor for low-power low-cost systems. *Meas. Sci. Technol.* 2006, 17, 840–846.
8. Chen, P.; Shie, M.-C.; Zheng, Z.-Y.; Zheng, Z.-F.; Chu, C.-Y. A fully digital time-domain smart temperature sensor realized with 140 FPGA logic elements. *IEEE Trans. Circuit Syst. I* 2007, 54, 2661–2668.
9. Lin, Y.-S.; Sylvester, D.; Blaauw, D. An Ultra Low Power 1 V, 220 nW Temperature Sensor for Passive Wireless Applications. *Proceedings of 2008 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), San Jose, CA, USA, 21–24 September 2008*; pp. 507–510.
10. Law, M.K.; Bermak, A. A 405-nW CMOS temperature sensor based on linear MOS operation. *IEEE Trans. Circuit Syst. II* 2009, 56, 891–895.
11. Chung, C.-C.; Yang, C.-R. An autocalibrated all-digital temperature sensor for on-chip thermal monitoring. *IEEE Trans. Circuit Syst. II* 2011, 58, 105–109.
12. Chen, P.; Chen, S.-C.; Shen, Y.-S.; Peng, Y.-J. A all-digital time-domain smart temperature sensor realized with 48 FPGA logic elements with one-point calibration support. *IEEE Trans. Circuit Syst. I* 2011, 58, 913–920.
13. Kim, K.; Lee, H.; Kim, C. 366-Ks/s 1.09-nJ 0.0013-mm² frequency-to-digital converter based CMOS temperature sensor utilizing multiphase clock. *IEEE Trans. VLSI* 2012, 20, 1–5.
14. Chen, P.; Chen, C.-C.; Peng, Y.-H.; Wang, K.-M.; Wang, Y.-S. A time-domain SAR smart temperature sensor with curvature compensation and a 3σ Inaccuracy of 0.4 °C \sim $+ 0.6$ °C over a 0 °C to 90 °C Range. *IEEE J. Solid-State Circuit* 2010, 45, 600–609.
15. Saneyoshi, E.; Nose, K.; Kajita, M.; Mizuno, M. A 1.1 35 μ m \times 35 μ m Thermal Sensor with Supply Voltage Sensitivity of 2 °C/10%-Supply for Thermal Management on the SX-9 Supercomputer. *Proceedings of 2008 IEEE Symposium on VLSI Circuits, Honolulu, HI, USA, 18–20 June 2008*; pp. 152–153.
16. Filanovsky, I.M.; Allam, A. Mutual compensation of mobility and threshold voltage temperature effects with applications in CMOS circuits. *IEEE Trans. Circuit Syst. I* 2001, 48, 876–884.