

## СЕНСОР ТЕМПЕРАТУРИ НА БАЗІ CMOS

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*Дана робота пропонує оглянути сучасні досягнення у сфері CMOS-сенсорів температури, включаючи їх технічні характеристики, методи роботи та перспективи подальшого розвитку та сфери їх застосування. Розуміння цих аспектів дозволить краще оцінити потенціал CMOS-сенсорів температури в майбутніх застосуваннях IoT та вбудованих систем. Зростаюче значення вбудованих систем породжує попит на сенсори температури, які були б енергоефективними, точними та мали низьку вартість виробництва. Технологія CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) являється однією з найбільш обіцяючих для реалізації таких сенсорів, завдяки своїй мініатюрності, високій інтеграції та низькій вартості виробництва.*

**Ключові слова:** CMOS, температура, сенсор, перетворювач, потужність.

### *Abstract*

*This paper offers an overview of contemporary achievements in the field of CMOS temperature sensors, including their technical specifications, operating methods, and prospects for further development and application areas. Understanding these aspects will enable a better assessment of the potential of CMOS temperature sensors in future IoT (Internet of Things) and embedded systems applications. The growing importance of embedded systems has generated demand for temperature sensors that are energy-efficient, accurate, and have low manufacturing costs. CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) technology is one of the most promising for realizing such sensors due to its compactness, high integration, and low manufacturing cost.*

**Keywords:** CMOS, temperature, sensor, converter, power.

### **Вступ**

В останні десятиліття спостерігається стрімке зростання зацікавленості у вбудованих системах та інтернеті речей (IoT), що відкриває безліч можливостей для розвитку та застосування сенсорів температури. Сучасні умови вимагають енергоефективних, точних та надійних сенсорів, які здатні функціонувати в широкому діапазоні температурних умов.

Контроль температури є обов'язковим у системах холодового ланцюга для виробництва, зберігання, розподілу та транспортування швидкопсувних, але життєво важливих продуктів, таких як харчові продукти, продукти крові та вакцини [1,2,3,4]. Температурний діапазон для харчового холодового ланцюга зазвичай становить від  $-20$  до  $+15$  °C [1,2]. Для продуктів крові, таких як свіжозаморожена плазма, холодовий ланцюг повинен підтримувати низьку температуру нижче  $-25$  °C. Температурний контроль холодового ланцюга вакцини ще суворіший [3], а деякі спеціальні вакцини, такі як вакцина проти лихоманки Ебола, можуть потребувати низької температури  $-60$  °C [4]. Основною вимогою до моніторингу температури в холодкових ланцюгах є висока точність. Низьке енергоспоживання є ще однією ключовою вимогою, оскільки в багатьох програмах холодового ланцюга функція моніторингу температури включена в надзвичайно обмежену по потужності бездротову телеметричну схему, що живиться від мініатюрної батареї або мітки радіочастотної ідентифікації (RFID) на основі бездротової передачі енергії [5]. Крім того, застосування холодового ланцюга потребує моніторингу температури для кожної вантажівки та навіть для кожної невеликої упаковки продукту, і такі програми зазвичай чутливі до вартості [5,6,7,8]. Загалом існує велика потреба у дослідженні недорогих, малопотужних, широкодіапазонних та високоточних датчиків температури для застосування в холодовому ланцюзі [9]. Метою цієї роботи є огляд розробленої

технології створення такого датчика температури з використанням комплементарної технології метал–оксид–напівпровідник (CMOS).

### Результати дослідження

Ця робота презентує мікросхему сенсора температури з використанням CMOS технології для застосувань у ланцюгах постачання з низьким енергоспоживанням при температурах до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Блок-схема представленого температурного сенсора показана на рисунку 1. Вона включає три основні функціональні блоки. Конвертер температури в струм генерує температурно залежний струм. Ідеально, вихідний струм є PTAT струмом. Потім струмово-контрольований осцилятор перетворює струм в частотний сигнал. Частота осциляції пропорційна PTAT струму, а отже, пропорційна абсолютній температурі. Лічильник служить конвертером частоти в цифровий сигнал, який цифрує частоту вихідного сигналу осцилятора. У цій роботі розроблений сенсор є одним з функціональних блоків системи-на-кристалі (SoC), і його живить вбудований 1,1 В стабілізатор напруги з низьким спадом напруги (LDO) в SoC або зовнішнє джерело живлення.

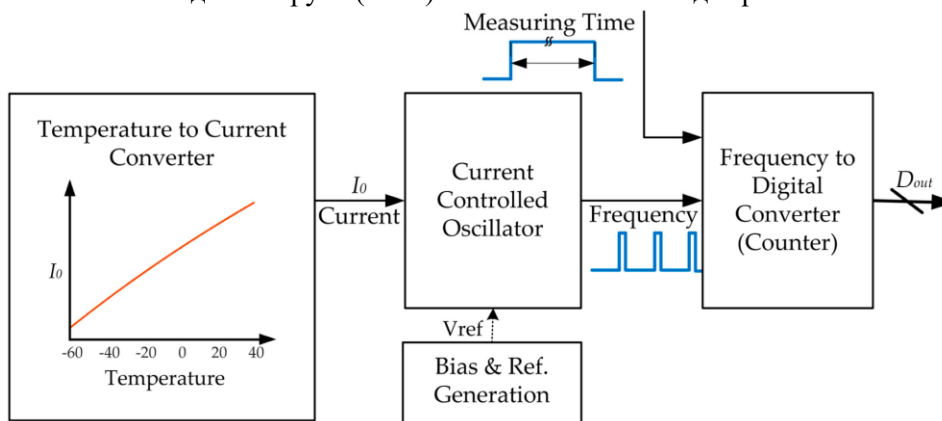


Рисунок 1. Блок-схема температурного сенсора [10]

Перетворювач температури в струм є ключем цього сенсора. На Рисунку 2 показана схема реалізації перетворювача температури в струм. Транзистори M1 та M2 працюють у підпороговій області.

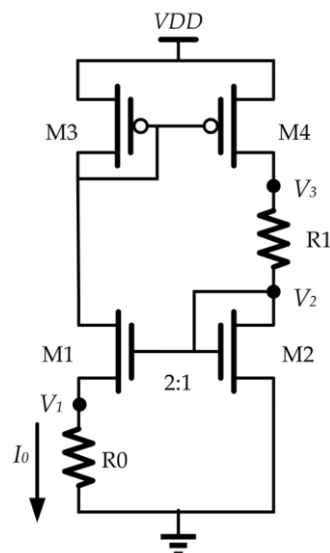


Рисунок 2. Схемна реалізація перетворення температури в струм

Запропонований чіп температурного сенсора був розроблений та виготовлений як функціональна частина SoC у процесі CMOS з розміром  $0,13\text{ }\mu\text{m}$ , а мікрофотографія кристала SoC показана на рисунку 3а. Зверніть увагу, що конвертер температури в струм та схема формування зсуву/посилки є загальними для цього температурного сенсора та деяких інших функціональних частин в SoC, і вони розташовані окремо від поточно-керованого осцилятора та частотно-цифрового

перетворювача, як показано на схемі розміщення сенсора на рисунку 3б. Загальна активна площа звітуючого температурного сенсора, включаючи всі функціональні блоки, показані на Рисунку 4.1, становить 0,0014 мм<sup>2</sup>.

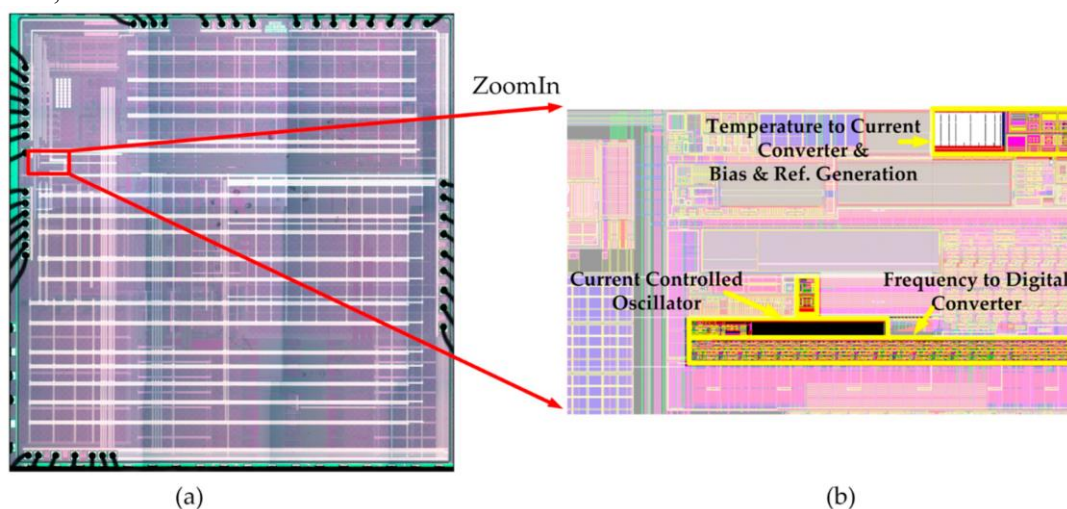


Рисунок 4.4. Чіп SoC, який містить представлений температурний датчик: (а) мікрофотографія чіпа SoC; (б) макет представленого температурного датчика.

У даному розділі було представлено CMOS температурний сенсор для моніторингу температури до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вперше було охарактеризовано нелінійну похибку в звичайному схемотехнічному сенсорі на основі РТАТ струму, і було запропоновано двоточковий метод калібрування для компенсації нелінійної похибки, крім традиційної лінійної калібровки похибок. За допомогою запропонованої нелінійної калібровки, похибка вимірювання зменшилася до  $-0.9$  до  $+1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  для діапазону температур від  $-60$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чіп температурного датчика займав площу мікросхеми  $0.0014\text{ мм}^2$ , а типове споживання енергії складало лише  $0.15\text{ мкВт}$  від джерела живлення  $1.1\text{ В}$ , що перевершує аналогічні розробки.

### Висновки

У цій статті було представлено CMOS температурний сенсор для моніторингу температури до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вперше було охарактеризовано нелінійну похибку в звичайному схемотехнічному сенсорі на основі РТАТ струму, і було запропоновано двоточковий метод калібрування для компенсації нелінійної похибки, крім традиційної лінійної калібровки похибок. За допомогою запропонованої нелінійної калібровки, похибка вимірювання зменшилася до  $-0.9$  до  $+1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  для діапазону температур від  $-60$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чіп температурного датчика займав площу мікросхеми  $0.0014\text{ мм}^2$ , а типове споживання енергії складало лише  $0.15\text{ мкВт}$  від джерела живлення  $1.1\text{ В}$ , що перевершує аналогічні розробки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. FAO. *Food Wastage Footprint: Impacts on Natural Resources*; FAO: Rome, Italy, 2013. [Google Scholar]
2. Ndraha, N.; Hsiao, H.I.; Vlajic, J.; Yang, M.F.; Lin, H.T.V. Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. *Food Control* **2018**, *89*, 12–21. [Google Scholar] [CrossRef]
3. Cao, L.; Zheng, J.; Cao, L.; Cui, J.; Xiao, Q. Evaluation of the Impact of Shandong Illegal Vaccine Sales Incident on Immunizations in China. *Hum. Vaccines Immunother.* **2018**, *14*, 1672–1678. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
4. Jusu, M.O.; Geoffrey, G.; Seward, J.F.; Bawoh, M.; Tempel, J.; Friend, M.; Littlefield, D.; Lahai, M.; Jalloh, H.M.; Sesay, A.B.; et al. Rapid Establishment of a Cold Chain Capacity of  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  or Colder for the STRIVE Ebola Vaccine Trial During the Ebola Outbreak in Sierra Leone. *J. Infect. Dis.* **2018**, *217*, S48–S55. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

5. Óskarsdóttir, K.; Oddsson, G.V. Towards a decision support framework for technologies used in cold supply chain traceability. *J. Food Eng.* **2019**, *240*, 153–159. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
6. Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L.; Barreiro, P.; Robla, I. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors* **2009**, *9*, 4728–4750. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Wang, X.; Matetić, M.; Zhou, H.; Zhang, X.; Jemrić, T. Postharvest quality monitoring and variance analysis of peach and nectarine cold chain with multi-sensors technology. *Appl. Sci.* **2017**, *7*, 133. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Badia-Melis, R.; Ruiz-Garcia, L.; Garcia-Hierro, J.; Villalba, J. Refrigerated fruit storage monitoring combining two different wireless sensing technologies: RFID and WSN. *Sensors* **2015**, *15*, 4781–4795. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
9. Lin, Y.S.; Sylvester, D.; Blaauw, D. An ultra low power 1V, 220nW temperature sensor for passive wireless applications. In Proceedings of the 2008 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, San Jose, CA, USA, 21–24 September 2008. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Yang, W., Jiang, H., & Wang, Z. (2019). A 0.0014 mm<sup>2</sup> 150 nW CMOS Temperature Sensor with Nonlinearity Characterization and Calibration for the –60 to +40 °C Measurement Range. In *Sensors* (Vol. 19, Issue 8, p. 1777). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s19081777>

**Олександр Сергійович Малу́к** — аспірант, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [sashamalyuk8@gmail.com](mailto:sashamalyuk8@gmail.com)

**Галина Іванівна Мартинюк** — аспірантка, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [martunyukg@vntu.edu.ua](mailto:martunyukg@vntu.edu.ua)

**Володимир Валерійович Мартинюк** — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [gyravl6@gmail.com](mailto:gyravl6@gmail.com)

**Oleksandr S. Malyuk** — graduate student, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [sashamalyuk8@gmail.com](mailto:sashamalyuk8@gmail.com)

**Halyna I. Martynyuk** — graduate student, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [martunyukg@vntu.edu.ua](mailto:martunyukg@vntu.edu.ua)

**Volodymyr V. Martyniuk** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [gyravl6@gmail.com](mailto:gyravl6@gmail.com)