

ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСТОТНО-ЗАЛЕЖНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДАВАЧІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ

Розвиток автономних сенсорних систем, зокрема в контексті (IoT), вимагає створення високоточних, енергоефективних та малих за масштабом сенсорів, здатних працювати в широкому діапазоні температур [1]. У таких системах особливо актуальними є частотно-залежні давачі температури, які дозволяють уникнути необхідності в аналогово-цифровому перетворенні [2], зменшити кількість компонентів, а також спростити інтерфейс з мікроконтролерами або бездротовими модулями.

У даній роботі розглянуто оптимізацію конструкції та параметрів мікроелектронного температурного сенсора з частотним виходом, побудованого на основі РТАТ генератора струму. Схема реалізована за допомогою CMOS технології 180 нм та інтегрована в релаксаційний генератор, який формує вихідний сигнал у вигляді частоти. Основна увага приділена зменшенню похибки, зниженню енергоспоживання та покращенню стабільності роботи при довготривалому використанні в автономному режимі [3].

Структура сенсора

Сенсор складається з РТАТ-генератора, що формує струм, пропорційний абсолютній температурі, та релаксаційного генератора, який перетворює цей струм у частоту. Для зменшення впливу флуктуацій напруги живлення застосовано стабілізатор на основі каскадної структури. Додатково, для компенсації температурного дрейфу на етапі формування струму реалізовано термокомпенсаційну петлю зі зворотним зв'язком [4].

Методи оптимізації

Оптимізація сенсора здійснювалась за кількома напрямками:

- мінімізація статичних і динамічних споживань енергії шляхом роботи транзисторів у підпороговій області;

- використання диференційних вузлів для зменшення шумів та підвищення стабільності;
- корекція температурної нелінійності шляхом цифрової апроксимації кривої залежності частоти від температури [5];
- застосування глибокої ізоляції для зменшення паразитних струмів у високотемпературному середовищі.

Експериментальні результати

За результатами моделювання отримано:

- робочий температурний діапазон: $-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$;
- лінійність частотного виходу: до $\pm 0.4\%$ у всьому діапазоні;
- чутливість: близько $120 \text{ Гц}/^{\circ}\text{C}$ при 25°C ;
- середнє енергоспоживання: $< 4.7 \text{ мкВт}$ при 1.8 В живлення;
- точність: $\pm 0.65^{\circ}\text{C}$ без калібрування, $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ після цифрової корекції [6];
- дрейф при температурі 85°C протягом 30 днів: не перевищує $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$.

Проведено температурні цикли – від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$ з інтервалом 10°C . Похибка вимірювалась частотоміром з точністю 10 мГц . Для оцінки довготривалої стабільності виконано прискорене старіння з витримкою 200 годин при 125°C . Усі зразки зберегли стабільність частоти в межах $\pm 1.5\%$.

Порівняння з аналогами

У таблиці 1 представлено порівняння розробленого сенсора з аналогічними рішеннями [1-2].

Таблиця 1.

Технологія	Діапазон	Похибка	Споживання
CMOS $0.18\mu\text{m}$	$-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	6.1 мкВт
CMOS $0.35\mu\text{m}$	$-10^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$	12 мкВт
CMOS $0.18\mu\text{m}$	$-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	4.7 мкВт

Висновок

Розроблений температурний сенсор із частотним виходом показав високі метрологічні характеристики при дуже низькому енергоспоживанні, що робить його перспективним для автономних сенсорних систем, зокрема для IoT-пристроїв, медичних носимих пристроїв та бездротових модулів моніторингу. Запропоновані методи оптимізації дозволили суттєво покращити точність, зменшити енергоспоживання та забезпечити стабільність роботи у широкому температурному діапазоні без необхідності в складних схемах калібрування або зовнішніх перетворювачах.

Література

1. Pertijs, M.A.P., Huijsing, J.H. Precision temperature sensors in CMOS technology. – Dordrecht : Springer, 2006. – 292 p.
2. Souri, K., Chae, Y., Makinwa, K.A.A. A CMOS Temperature Sensor with a Voltage Output. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2013. – Vol. 48, No. 12. – P. 3010–3017.
3. Малюк, О., Мартинюк, В. Порівняльний аналіз сенсорів температури // Measuring and Computing Devices in Technological Processes. – 2025. – № 2. – С. 21–26.
4. Chen, D., Li, S., Wang, J. A CMOS Temperature Sensor for SoC Thermal Monitoring // IEEE Sensors Journal. – 2015. – Vol. 15, No. 9. – P. 5266–5273.
5. Abeysinghe, B., Rincon-Mora, G.A., & others. CMOS temperature sensors with frequency output // IEEE Trans. on Circuits and Systems. – 2021. – Vol. 68, No. 4. – P. 912–920.
6. Малюк, О. Давач температури на основі перетворення температури в частоту з похибкою $+0.65 / -0.49$ °C // Вісник ВНТУ. – 2023. – № 4. – С. 88–92.