

МАРТИНЮК Володимир

Вінницький національний технічний університет

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

e-mail: gyrav16@gmail.com

МАЛЮК Олександр

Вінницький національний технічний університет

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

e-mail: sashamalyuk8@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

У статті розглянуто різні типи температурних сенсорів, заснованих на різних принципах роботи, таких як фазове замикання петлі (PLL), пропорційне до абсолютної температури (PTAT), біполярні транзистори, лінії затримки, температурно-залежні осцилятори, двійкові лічильники та періодичні осцилятори. Описано їхні основні характеристики, переваги та недоліки.

Сенсори на основі PLL мають високу точність і стабільність, але складну конструкцію. PTAT-сенсори відрізняються лінійністю і низьким енергоспоживанням. Сенсори на основі біполярних транзисторів забезпечують високу точність і широкі діапазони вимірювань. Лінії затримки забезпечують швидкий час відгуку, але вимагають точного налаштування. Температурно-залежні осцилятори і двійкові лічильники мають високу точність і низьке енергоспоживання, але можуть бути чутливими до електромагнітних завад. Сенсори, що вимірюють період сигналу, забезпечують високу точність і підходять для енергоефективних застосувань.

Стаття надає детальний огляд кожного типу сенсорів, підкреслюючи їхню актуальність і застосування в різних галузях електроніки.

Ключові слова: архітектура сенсорів, температурні сенсори, фазова автопідстройка частоти (PLL), біполярні транзистори, динамічне узгодження джерел струму, програмований конденсатор, джерело струму PTAT, споживана потужність, ефективне число розрядів (ENOB), Zoom ADC (Zoom ADC), технологія CMOS, точність вимірювань, розмір мікросхеми, енергоефективність, порівняння архітектур.

MARTYNIUK Volodymyr, MALIUK Oleksandr

Vinnitsia National Technical University

COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE SENSORS

The article discusses different types of temperature sensors based on different operating principles, such as phase-locked loop (PLL), proportional-to-absolute-temperature (PTAT), bipolar transistors, delay lines, temperature-dependent oscillators, binary counters, and periodic oscillators. Their main characteristics, advantages and disadvantages are described. PLL-based sensors have high accuracy and stability, but complex construction. PTAT sensors are characterized by linearity and low power consumption. Sensors based on bipolar transistors provide high accuracy and wide measurement ranges. Delay lines provide fast response times but require fine tuning. Temperature-dependent oscillators and binary counters have high accuracy and low power consumption, but can be sensitive to electromagnetic interference. Sensors that measure the period of the signal provide high accuracy and are suitable for energy-efficient applications.

The article provides a detailed overview of each type of sensor, emphasizing their relevance and application in various fields of electronics.

Keywords: architecture of sensors, principle of operation, temperature sensors, phase locked loop (PLL), bipolar transistors, dynamic matching of current sources, programmable capacitor, PTAT current source, power consumption, effective number of bits (ENOB), Zoom ADC (Zoom ADC), CMOS technology, measurement accuracy, chip size, energy efficiency, comparison of architectures.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

В сучасних електронних системах точність вимірювання температури є одним із ключових факторів для забезпечення надійної роботи різноманітних пристроїв і систем. Різні типи сенсорів, що використовуються для цієї роботи, мають свої унікальні характеристики, переваги та недоліки. Серед них можна виділити сенсори на основі фазового замикання петлі (PLL), PTAT, біполярних транзисторів, ліній затримки, а також сенсори, які використовують осцилятори і двійкові лічильники або зовнішні тактові сигнали для вимірювання періоду. У кожного з цих підходів є свої унікальні технічні особливості та характеристики, які роблять їх оптимальними для певних застосувань.

У даній статті розглядаються основні типи температурних сенсорів, їх характеристики, а також плюси та мінуси, що дозволяє зрозуміти, як вибрати найбільш підходящий сенсор для конкретних потреб.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Сенсор температури на основі фазового замикання петлі (PLL)

Осцилятор, який має залежність від температури, генерує сигнал, частота якого змінюється залежно від температури [1]. PLL порівнює фазу цього сигналу з фазою опорного сигналу і автоматично корегує частоту осцилятора, щоб забезпечити синхронізацію, його схема продемонстрована на рисунку 1.

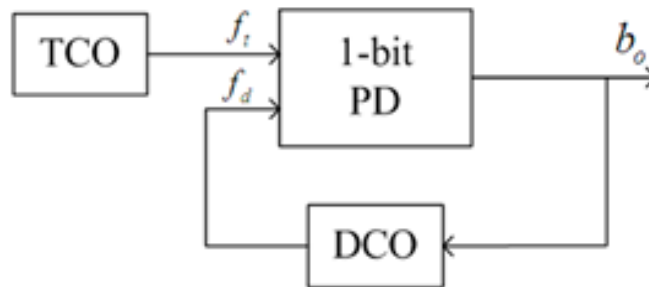


Рис. 1. Сенсор температури на основі PLL

Чутливість до температури, яка виражається в зміні частоти осцилятора на кілька кілогерців на градус Цельсія. Даний тип сенсора підходить для використання в сфері, де важливо контролювати частоту, але потребує складної електроніки для стабільної роботи при зміні температури [2].

Сенсори з двома лініями затримки з різними часовими коефіцієнтами мають схожий діапазон вимірювань, що становить від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$, вони мають широке застосування в звичайних промислових і побутових застосуваннях. Однак, сенсори з двома лініями затримки можуть мати розширений діапазон при використанні спеціалізованих матеріалів, що може підвищити їхню гнучкість у специфічних умовах. Сенсори PLL залежать від стабільності фазового замикання, що впливає на їх точність при високих температурах. PLL сенсор забезпечує високу точність завдяки використанню фазового зворотного зв'язку. Це дозволяє зменшити похибку вимірювання до $0,1^{\circ}\text{C}$ - $0,5^{\circ}\text{C}$, що робить його надійним у критичних застосуваннях, де стабільність і точність є важливими.

Час відгуку від декількох мікросекунд до мілісекунд, що обумовлено частотою осцилятора. Подібний час відгуку мають сенсори на основі температурно-залежного осцилятора з двійковим лічильником, а також сенсори на основі періоду осцилятора або зовнішнього тактового сигналу. Це пов'язано з тим, що всі ці сенсори залежать від частоти осциляцій або тактового сигналу, яка визначає швидкість їхньої реакції на зміну температури. Дуже стабільний, оскільки PLL забезпечує постійну корекцію частоти навіть при коливаннях напруги або температури.

Цей сенсор забезпечує дуже високу стабільність завдяки постійній корекції частоти, яка компенсує коливання напруги або температури. Це робить його особливо ефективним у середовищах з нестабільними умовами.

Має невелике енергоспоживання, але воно залежить від частоти осцилятора та конструкції мікросхеми. Залежно від частоти осцилятора та особливостей мікросхеми, сенсор може споживати більше енергії в порівнянні з іншими типами. Це пов'язано з тим, що PLL вимагає активного електронного компонування для утримання стабільності частоти.

Підсумуємо плюси та мінуси даного сенсору:

Плюси:

- Висока точність завдяки зворотному зв'язку, що компенсує коливання температури.
- PLL стабілізує вихідний сигнал, що робить вимірювання надійним.
- Широкий діапазон вимірювань дозволяє використовувати сенсор у різних умовах.
- Можливість швидкого реагування на зміну температури.

Мінуси:

- Складність конструкції, необхідність у додаткових компонентах для PLL, що може ускладнити розробку.
- Більш складна система може бути дорожчою у виробництві.
- Вищий рівень споживання енергії порівняно з простішими сенсорами.

Сенсор температури на основі РТАТ

Даний сенсор використовує різницю напруги між двома біполярними транзисторами, працюючими при різних струмах, що створює сигнал, пропорційний абсолютній температурі, його схема зображена на рисунку 2 [3].

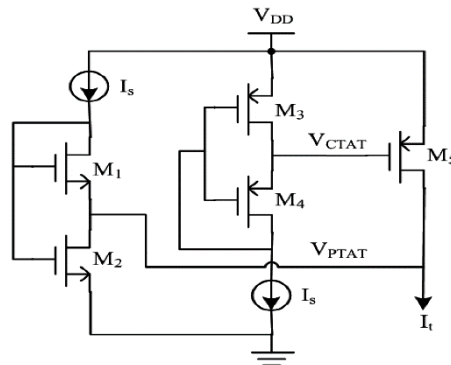


Рис. 2. Схема сенсора температури на основі РТАТ

Він має чутливість близько 1 мВ/К. Це означає, що напруга лінійно змінюється з температурою, що забезпечує просту калібровку і високу точність у вимірюваннях. Важливо відзначити, що цей тип сенсора зазвичай використовується в аналогових схемах і забезпечує стабільний вихідний сигнал [4].

Сенсори на основі РТАТ і сенсори на основі біполярних транзисторів відрізняються тим, що РТАТ мають діапазон вимірювань від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$, який може бути розширений до -55°C або $+150^{\circ}\text{C}$. Це робить їх універсальними для різних середовищ. Біполярні транзистори, з іншого боку, мають діапазон від -55°C до $+150^{\circ}\text{C}$ і можуть працювати на ширшому діапазоні температур завдяки використанню різних матеріалів, таких як кремій або арсенід галію, що забезпечує кращу точність і стабільність.

Цей сенсор характеризується високою лінійністю, що дозволяє забезпечити точність у межах від $0,1^{\circ}\text{C}$ до 2°C . Однак ця точність може варіюватися в залежності від температурного діапазону та стабільності калібрування.

Його час відгуку від кількох мілісекунд до десятків мілісекунд, що робить його дещо повільнішим. Це зумовлено тим, що РТАТ-структури базуються на температурній залежності напруги бази-емітера біполярних транзисторів, що потребує більше часу для стабільного вимірювання температури. Стабільність висока, особливо в інтегральних схемах, завдяки контролю зсуву.

Отже такий сенсор має високу стабільність, особливо коли використовується в інтегральних схемах. Це досягається завдяки контролю зсуву, що допомагає компенсувати можливі зміни параметрів. Завдяки цьому даний сенсор має дуже низьке енергоспоживання, оскільки в ньому використовуються тільки пасивні елементи та базові транзистори. Цей підхід дозволяє мінімізувати споживання енергії, оскільки не потребує складних активних схем, які могли б збільшити енергоспоживання.

Підсумуємо плюси та мінуси даного сенсору:

Плюси:

- Легко впроваджується в різні електронні системи.
- Висока лінійність вихідного сигналу, що спрощує калібрування.
- Дуже ефективні в плані споживання енергії.
- Забезпечує високу точність при вимірюванні температури.

Мінуси:

- Може бути недостатньо широким для деяких спеціалізованих застосувань.
- Як і всі електронні компоненти, РТАТ може бути чутливим до електромагнітних завад.
- Зміщення напруги може впливати на точність вимірювань, якщо не враховане правильно.

Сенсор температури на основі біполярних транзисторів

В сенсорі температури на основі біполярних транзисторів вимірюється напруга переходу база-емітер транзистора, яка змінюється з температурою [5]. Використання двох транзисторів дозволяє усунути вплив зміни напруги живлення та інших зовнішніх факторів, схему цього сенсора зображено на рисунку 3.

Цей сенсор демонструє зміну напруги приблизно на $-2 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ для кремнієвих транзисторів. Це дозволяє отримати точний температурний сигнал, проте через негативний коефіцієнт він потребує врахування цієї особливості в обробці сигналу [6].

Він також забезпечує високу точність ($0,1^{\circ}\text{C}$ - 1°C), проте вона залежить від типу транзистора та схеми. Це означає, що точність може варіюватися залежно від умов експлуатації та якості виготовлення самого транзистора.

Сенсор на основі біполярних транзисторів має час відгуку подібний до сенсора PLL — від кількох мікрсекунд до мілісекунд. Швидкий час відгуку досягається завдяки високій чутливості біполярних транзисторів до змін температури, що дозволяє швидко фіксувати зміни.

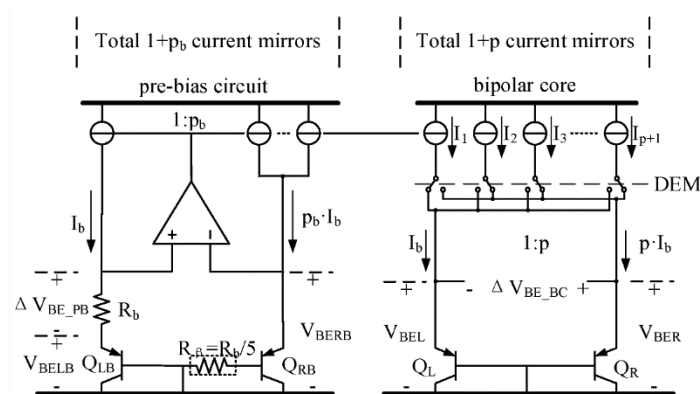


Рис. 3. Передня частина схеми сенсору температури на основі біполярного транзистора (BJT)

Цей сенсор демонструє стабільність через здатність компенсувати вплив коливань напруги живлення, що робить його надійним у варіативних електричних середовищах. Також він характеризується дуже низьким енергоспоживанням, оскільки транзистори працюють при низькому струмі. Це знижує загальні витрати енергії, що робить його ефективним для використання в системах з обмеженим енергоспоживанням.

Наведемо плюси на мінуси даного сенсору.

Плюси:

- Висока точність завдяки використанню бази-емітерного переходу транзистора.
- Дуже ефективний в умовах, де потрібно економити енергію.
- Може охоплювати великий діапазон температур, від -55°C до $+150^{\circ}\text{C}$.
- Використання стандартних компонентів, таких як біполярні транзистори.

Мінуси:

- Зміни в напрузі живлення можуть вплинути на точність вимірювання, якщо не здійснено належну компенсацію.
- Може знадобитися додаткова калібровка для зниження похибок.
- Умови високих температур можуть прискорити деградацію транзистора.

Сенсори з двома лініями затримки з різними часовими коефіцієнтами залежно від температури

В основі роботи даного сенсора лежить порівняння часу затримки сигналу в двох різних ланцюгах, які мають різні часові коефіцієнти залежно від температури, схема цього сенсора зображена на рисунку 4 [7].

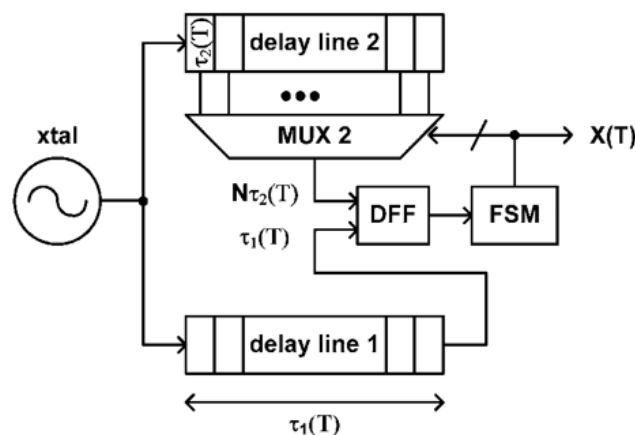


Рис. 4. Сенсор з двома лініями затримки з різними часовими коефіцієнтами залежно від температури

Дані сенсори мають чутливість, яка значно залежить від матеріалу і конфігурації ланцюгів. Для кремнієвих ліній затримки ця чутливість може становити від 10 до 100 пс/°C. Такий підхід дозволяє використовувати сенсори в високочастотних колах, але потребує ретельного вибору матеріалу для досягнення бажаної чутливості [8].

Вони забезпечують точність у межах 0,1°C - 0,5°C. Це досягається завдяки різниці в часових затримках, які чутливо реагують на зміну температури, що робить ці сенсори стабільними при зміні температурних умов.

Найшвидший час відгуку спостерігається у сенсора з двома лініями затримки, який має час відгуку від кількох пікосекунд до мікросекунд. Це обумовлено тим, що він використовує різницю у швидкості сигналу на різних затримувальних лініях, що дозволяє швидко реагувати на зміни температури.

Даний сенсор досягає високої стабільності завдяки точному контролю характеристик ланцюгів затримки, що залежить від температури. Це забезпечує точність вимірювань у різних температурних умовах.

Енергоспоживання низьке, але це залежить від типу електроніки, яка використовується для обробки сигналу. Якщо використовується проста та ефективна електроніка, енергоспоживання буде низьким, але складніші схеми можуть збільшити енергоспоживання.

Наведемо плюси та мінуси даного сенсору.

Плюси:

- Здатність точно вимірювати невеликі зміни температури.
- Дуже швидка реакція на зміни температури.
- Завдяки використанню двох різних ланцюгів затримки.
- Мала похибка за умови правильної калібровки.

Мінуси:

- Вимагає точного налаштування і контролю, що ускладнює виробництво.
- Більш дорогі у виробництві через складність конструкції.
- Не завжди підходить для застосувань, де потрібно довготривале вимірювання температури.

Сенсори на основі температурно-залежного осцилятора і двійкового лічильника для підрахунку імпульсів

Даний сенсор працює таким чином, що осцилятор генерує імпульси з частотою, яка залежить від температури [9]. Двійковий лічильник рахує кількість імпульсів за фіксований час, а потім використовується для визначення температури, його схема зображена на рисунку 5.

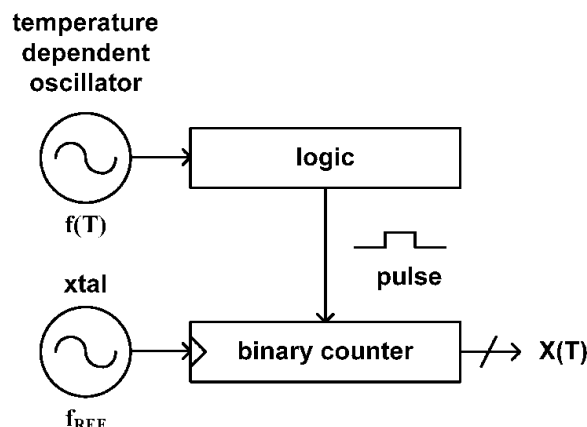


Рис. 5. Сенсор на основі температурно-залежного осцилятора і двійкового лічильника для підрахунку імпульсів

Дані сенсори мають чутливість, що виражається в зміні частоти осцилятора від кількох сотень герців до декількох кілогерців на градус Цельсія. Вони підходять для цифрових застосувань, де важливо отримати безпосередньо цифровий сигнал, однак для точного вимірювання потрібна висока стабільність частоти [10].

Сенсори на основі температурно-залежного осцилятора і двійкового лічильника для підрахунку імпульсів, а також сенсори на основі періоду (осцилятори або зовнішній тактовий сигнал) також мають схожі діапазони вимірювань, але можуть досягати більш високих температур (до +150°C) залежно від частоти осцилятора або сигналу. Це робить їх ефективними для високотемпературних застосувань, де потрібна висока точність вимірювань.

Ці сенсори мають високу точність, яка може варіюватися від $0,1^{\circ}\text{C}$ до 1°C . Це досягається завдяки точному вимірюванню частоти осцилятора, що залежить від температури. Вони мають високу стабільність, якщо осцилятор добре калібрований і стабільний. Це залежить від якості та налаштувань осцилятора.

В них низьке енергоспоживання, оскільки як двійкові лічильники, так і осцилятори зазвичай споживають мало енергії. Цей підхід дозволяє зберігати низький рівень енергоспоживання, роблячи їх придатними для тривалих автономних застосувань.

Плюси:

- Використання стандартних компонентів, таких як осцилятор і лічильник.
- Дозволяє точно визначати зміни температури.
- Швидкий відгук на зміну температури.
- Енергоефективність завдяки простоті компонентів.

Мінуси:

- Будь-які нестабільності в роботі осцилятора можуть призвести до похибок у вимірюваннях.
- Може не покривати дуже високі або низькі температури.
- Може бути чутливим до електромагнітних завад.

Сенсори на основі періоду (осцилятори або зовнішній тактовий сигнал)

Сенсори на основі періоду працюють таким чином, що вимірювання періоду осцилятора або зовнішнього тактового сигналу, що змінюється залежно від температури, його схема зображена на рисунку 6 [11]. Використовуються методи перетворення часу на частоту для оцінки температури.

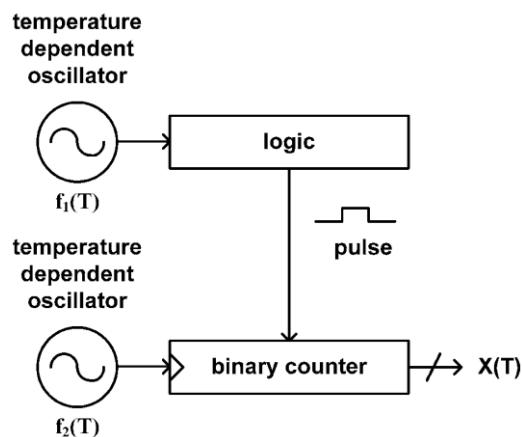


Рис. 6. Сенсор на основі періоду

Сенсори на основі періоду мають чутливість, при якій період змінюється в межах від кількох наносекунд до мікросекунд на градус Цельсія. Цей тип сенсора є корисним в часових інтервалах або для точних синхронізаційних задач, де навіть незначні зміни температури можуть суттєво вплинути на результати вимірювань [12].

Вони також забезпечують високу точність ($0,1^{\circ}\text{C}$ - $0,5^{\circ}\text{C}$) завдяки точному вимірюванню періоду сигналу. Вони можуть бути ефективними у випадках, коли потрібен точний контроль частоти з мінімальною похибкою.

Ці сенсори також демонструють високу стабільність, зокрема, при використанні високоякісних осциляторів. Точність осцилятора визначає загальну стабільність таких сенсорів.

Також вони відрізняються дуже низьким енергоспоживанням, що робить їх ідеальними для енергоефективних застосувань, особливо в умовах, де важливо зберегти тривалий термін служби батареї.

Плюси:

- Завдяки точному вимірюванню періоду сигналу.
- Використання зовнішнього тактового сигналу або осцилятора, що спрощує інтеграцію.
- Можливість швидкого вимірювання температури в реальному часі.
- Підходить для застосувань з обмеженим живленням.

Мінуси:

- Будь-які коливання або нестабільність тактового сигналу можуть призвести до неточностей.
- Залежить від робочого діапазону використовуваних осциляторів або сигналів.

- Осцилятори можуть бути чутливими до електромагнітних завад, що може вплинути на точність.

Підсумуємо всі ключові характеристики розглянутих сенсорів у таблиці 1.

Таблиця 1.

Детальне порівняння характеристик розглянутих сенсорів

Тип сенсора	Точність	Час відгуку	Складність конструкції	Енергоспоживання	Діапазон вимірювань	Стабільність
Сенсор на основі PLL (фазового замикання петлі)	Висока (0,1°C - 0,5°C)	Від мікросекунд до мс	Висока	Невелике	Широкий (-40°C до +125°C)	Дуже висока
Сенсор на основі РТАТ	Висока (0,1°C - 2°C)	Від мс до десятків мс	Середня	Дуже низьке	Відносно широкий	Висока
Тип сенсора	Точність	Час відгуку	Складність конструкції	Енергоспоживання	Діапазон вимірювань	Стабільність
Сенсор на основі біполярних транзисторів	Висока (0,1°C - 1°C)	Дуже швидкий (мкс до мс)	Низька	Дуже низьке	Широкий (-55°C до +150°C)	Висока
Сенсори з двома лініями затримки з різними часовими коефіцієнтами	Висока (0,1°C - 0,5°C)	Дуже швидкий (пс до мкс)	Висока	Низьке	Широкий	Висока
Сенсори на основі температурно-залежного осцилятора і двійкового лічильника	Висока (0,1°C - 1°C)	Швидкий (мкс до мс)	Середня	Низьке	Відносно широкий	Середня
Сенсори на основі періоду (осцилятори або зовнішній тактовий сигнал)	Висока (0,1°C - 0,5°C)	Швидкий (мкс до мс)	Низька	Дуже низьке	Відносно широкий	Висока

Основні висновки на основі порівняння характеристик:

- Всі сенсори демонструють високу точність, але сенсори на основі PLL і двох ліній затримки мають найбільшу стабільність і мінімальну похибку.
- Сенсори з двома лініями затримки мають найшвидший відгук, що дозволяє їх використовувати для швидких змін температури. Інші сенсори, такі як РТАТ та біполярні транзистори, також швидкодіють, але можуть поступатися в деяких застосуваннях.
- Сенсори на основі PLL і з двома лініями затримки є більш складними в реалізації через необхідність точного налаштування і контролю. Біполярні транзистори і РТАТ є відносно простими в реалізації.
- РТАТ і біполярні транзистори виділяються низьким енергоспоживанням, що робить їх привабливими для використання в умовах обмеженого живлення, наприклад, в батарейних пристроях.
- Більшість сенсорів покривають широкий діапазон температур від -40°C до +125°C, але сенсори на основі біполярних транзисторів можуть забезпечити найширший діапазон вимірювань, включаючи екстремально низькі та високі температури.
- Сенсори на основі PLL і періодичних осциляторів показують високу стабільність, що робить їх надійними в умовах змінних навантажень і довготривалих вимірювань.

**ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ**

Ця стаття розглядає характеристики різних типів сенсорів температури за принципом роботи, діапазоном вимірювання, точністю, часом відгуку, стабільністю та енергоспоживанням та комплексно наводить порівняння даних сенсорів одного відносно іншого. Дане дослідження дозволяє чітко ідентифікувати найкращий сенсор по характеристикам, який відповідає вимогам при поставленій задачі, враховуючи всі необхідні характеристики.

Загалом, вибір відповідного сенсора залежить від конкретних потреб користувача, враховуючи такі фактори, як складність конструкції, вартість виробництва, енергоефективність та чутливість до зовнішніх

чинників. Саме комплексна оцінка та розуміння доцільність використання сенсора в потрібному середовищі дає змогу в правильному виборі потрібного сенсора температури.

References

1. Deng, F., He, Y., Li, B., Zhang, L., Wu, X., Fu, Z., & Zuo, L. (2015). Design of an Embedded CMOS Temperature Sensor for Passive RFID Tag Chips. In *Sensors* (Vol. 15, Issue 5, pp. 11442–11453). MDPI AG. [[CrossRef](#)]
2. Aita, A.L.; Pertijs, M.A.; Makinwa, K.A.; Huijsing, J.H. A CMOS smart temperature sensor with a batch-calibrated inaccuracy of ± 0.25 °C (3σ) from -70 °C to 130 °C. In *Proceedings of the 2009 IEEE Solid-State Circuits Conference-Digest (ISSCC)*, San Francisco, CA, USA, 8–12 February 2009; pp. 342–343.
3. Wei, R., & Bao, X. (2018). A Low Power Energy-Efficient Precision CMOS Temperature Sensor †. In *Micromachines* (Vol. 9, Issue 6, p. 257). MDPI AG. [[CrossRef](#)]
4. Zaliasl, S.; Salvia, J.C.; Hill, G.C.; Chen, L.; Joo, K.; Palwai, R.; Arumugam, N.; Phadke, M.; Mukherjee, S.; Lee, H.C.; et al. A 3 ppm 1.5×0.8 mm² 1.0 μ A 32.768 kHz MEMS-based oscillator. *IEEE J. Solid-State Circuits* 2015, 50, 291–302.
5. Chen, P.; Chen, C.-C.; Tsai, C.-C.; Lu, W.-F. A time-to-digital-converter-based CMOS smart temperature sensor. *IEEE J. Solid-State Circuits* 2005, 40, 1642–1648.
6. Testi, N.; Yang, X. A 0.2 nJ/sample 0.01 mm² ring oscillator based temperature sensor for on-chip thermal management. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Quality Electronic Design*, Santa Clara, CA, USA, 4–6 March 2013; pp. 696–702.
7. Ituero, P., López-Vallejo, M., & López-Barrio, C. (2013). A 0.0016 mm² 0.64 nJ Leakage-Based CMOS Temperature Sensor. In *Sensors* (Vol. 13, Issue 9, pp. 12648–12662). MDPI AG. [[CrossRef](#)]
8. Kim, K.; Lee, H.; Jung, S.; Kim, C. A 366 kS/s 400 μ W 0.0013 mm² Frequency-to-Digital Converter Based CMOS Temperature Sensor Utilizing Multiphase Clock. *Proceedings of The IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC 09)*, San Jose, CA, USA, 13–16 September 2009; pp. 203–206.
9. Law, M.; Bermak, A. A 405-nW CMOS temperature sensor based on linear MOS operation. *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs* 2009, 56, 891–895.
10. Datta, B.; Burleson, W. Low Power On-Chip Thermal Sensors Based on Wires. *Proceedings of IFIP International Conference on Very Large Scale Integration, 2007 (VLSI-SoC 2007)*, Atlanta, GA, USA, 15–17 October 2007; pp. 258–263.
11. 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](#)]
12. Byun S. (2020). Categorization and Characterization of Time Domain CMOS Temperature Sensors. (Vol. 15, Issue 5, pp. 11442–11453). MDPI AG. [[CrossRef](#)]