

ЕЛЕКТРОННИЙ ТЕРМОМЕТР З ЦИФРОВОЮ ІНДИКАЦІЄЮ ТЕМПЕРАТУРИ

© Столярчук П., Байцар Р., Рак В., 2003

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери 12, 79013, Львів, Україна

Описано функціональну схему малогабаритного портативного термометра з діодним термочутливим елементом. Наведено функцію перетворення термочутливого елемента та розглянуто методику визначення абсолютної похибки вимірювання температури.

Описано функциональную схему малогабаритного портативного термометра с диодным термочувствительным элементом. Наведено функцию преобразования термочувствительного элемента и рассмотрено методику определения его абсолютной погрешности измерения температуры.

Block diagram miniature portable thermometer with the thermal sensor are described. Response characteristic of thermal sensor are given and method of definition maximal absolute errors of thermometer considered in this paper.

Практично лінійна залежність напруги від температури на прямо зміщеному р-п-переході є заманливою з погляду використання діода як сенсора температури. Однак розкид параметрів таких перетворювачів створює проблему з їх індивідуальним градуюванням. Тому для підвищення технологічності, розробляючи електронний портативний термометр, велику увагу приділяють не тільки оптимізації схемотехнічних рішень, а й скороченню та спрощенню градуювання.

У [1] розглядають питання синтезу математичної моделі р-п-переходу на підставі глибокого аналізу фізичних процесів, які відбуваються у такому переході, дають рекомендації, які саме р-п-переходи слід застосовувати для вимірювання температури. Наводять теоретичні та експериментальні залежності напруги від температури на прямо зміщеному р-п-переході. Досліджують температурний коефіцієнт напруги як функцію температури.

Описаний у [2] термоелектричний перетворювач розглядають як електронний прилад, який можна використовувати для вимірювання таких фізичних величин, як швидкість потоку рідини або газу, ефективного значення напруги або струму і навіть як підсилювач потужності та подвоювач частоти у звуковому діапазоні. У цій роботі термоелектричний перетворювач розглядають як пристрій, який складається з трьох основних елементів: нагрівача, теплопередавального елемента та перетворювача температури. Як перетворювач температури використовують р-п-перехід.

У [1, 2] пропонують використовувати кремнієві р-п-переходи як термочутливі елементи (ТЧЕ) засобів вимірювання. У таких ТЧЕ функція перетворення

близька до лінійної [2, 3]. Вони є недорогими, доступними і мають порівняно високу часову стабільність [1]. Однак, крім цих незаперечних переваг, вони не позбавлені недоліків. В зв'язку з розкидом параметрів важко досягти повторюваності їх функцій перетворення.

Якщо термочутливим елементом служить р-п-перехід з малою тепловою інерційністю, градуювання не буде тривалим і тоді переваги такого ТЧЕ висувують його на перший план при застосуванні як первинного перетворювача у недорогому портативному термометрі.

Розробляючи термометр, враховували такі вимоги: невелика похибка; низька вартість; малі розміри; роздільна здатність 0,1°C; живлення від батареї типу "Крона"; здатність працювати при зменшенні напруги батареї живлення до 7 В; технологічність конструкції та простота градуювання.

Функціональна схема термометра показана на рис. 1. Він складається з прецизійного джерела струму, яким є мікросхема А2 для стабілітрона V1. Для того, щоб струм, який протікає через стабілітрон, залишався сталим незалежно від стану батареї живлення та зміни споживання електричної енергії під час вимірювань, опорну напругу від стабілітрона V1 подають на вхід повторювача напруги (мікросхема А1). Напруга на виході мікросхеми А1 задає рівень нуля для АЦП і використовується як аналогова "земля" для вимірювальної частини приладу. Мікросхема А3 працює як джерело струму термочутливого елемента. Для покращання співвідношення сигнал/шум та зменшення теплової інерційності ТЧЕ складається з п'яти з'єднаних послідовно безкорпусних діодів 2Д907Б. Діоди розміщені у металевому корпусі і заповнені теплопровідною пастою. Напругу з виходу мікросхеми А3 подають на вхід АЦП.

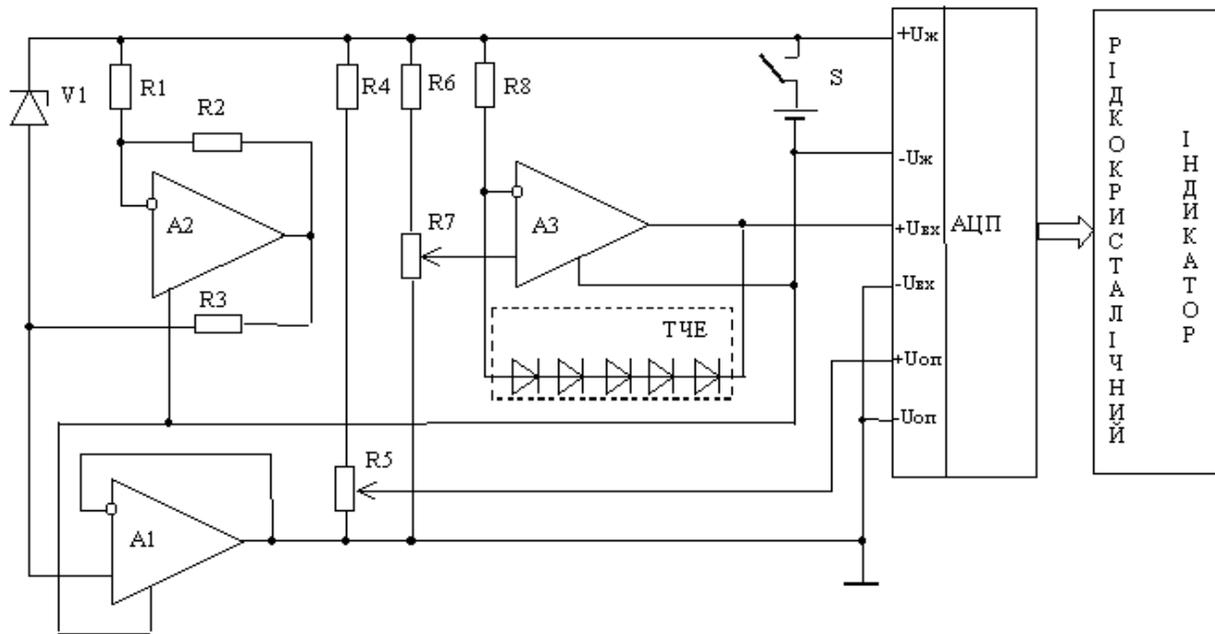


Рис. 1. Функціональна схема діодного термометра

Калібруючи термометр потенціометром R7, встановлюють таку напругу зміщення $U_{зм}$, щоб при розміщенні термочутливого елемента в середовищі з реперною температурою 0 °C на виході мікросхеми A3 напруга становила 0 В, тоді на рідкокристалічному індикаторі буде цифра 0. Потенціометром R5 встановлюють опорну напругу для АЦП так, щоб при розміщенні термочутливого елемента в середовищі із другою реперною температурою (100 °C) рідкокристалічний індикатор показував цифру 100. Якщо розміри і маса ТЧЕ невеликі і відповідно мала теплова інерційність, калібрування триває не більше ніж 5–7 хвилин.

Основним параметром, який застосовується при використанні діодів [2] як термочутливих елементів, є пряме падіння напруги на р-п-переході, яке можна записати:

$$U_{pp} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{pp}}{I_{zb}} + 1 \right), \quad (1)$$

де k – стала Больцмана, вона дорівнює $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура у кельвінах; q – елементарний заряд, $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$; I_{pp} – прямий струм через діод; I_{zb} – зворотний струм діода.

Зворотний струм реального діода є сумою декількох складових [3]: струму втікання, струму рекомбінації та теплового струму. Струм втікання від температури залежить слабо, тому ним можна

знехтувати. Тепловий струм I_o при високій температурі щодо 0 К зазвичай більший від інших складових зворотного струму. Тому можна сказати, що $I_{zb} \approx I_o$.

Якщо точність вимірювань, порівняно невисока, температурний коефіцієнт напруги (ТКН) діодного термоперетворювача вважають постійним [2], тоді функцію $U(T)$ можна вважати лінійною. Однак якщо вимоги до точності зростають, не можна нехтувати незначною залежністю ТКН від температури.

Позначимо $\frac{dU_{np}}{dT}$ як ТКН, тоді $\frac{d^2U_{np}}{dT^2}$ буде

визначати зміну ТКН із зміною температури. У [1] показано, що ТКН є функцією температури і в певних температурних межах змінюється лінійно. Тому

$\frac{d^2U_{np}}{dT^2} = const$, а напругу на виході мікросхеми визначають за формулою:

$$U_{KB} = U_{зм} - \left(U_{np0} + ТКН \cdot T + \frac{\Delta ТКН}{2} \cdot T^2 \right), \quad (2)$$

де U_{KB} – залежність напруги від температури на виході мікросхеми A3; $U_{зм}$ – напруга зміщення, що дорівнює прямій напрузі на термочутливому елементі U_{pp0} при температурі 0°C; $\Delta ТКН$ – друга похідна від напруги за температурою на ТЧЕ, $\Delta ТКН = \frac{dU^2_{np}}{dT^2}$; T – температура в градусах Цельсія.

Напругу U_L на виході мікросхеми АЗ можна апроксимувати прямою лінійною функцією за рівнянням:

$$U_L = U_{3M} - (U_{np0} + TKN_L \cdot T), \quad (3)$$

де TKN_L – температурний коефіцієнт напруги. Вважають, що при зміні температури він є сталим. Його легко визначити за взятою з протилежним знаком різницею напруг на виході мікросхеми АЗ при температурі 100°C і 0°C та діленням цієї різниці на 100.

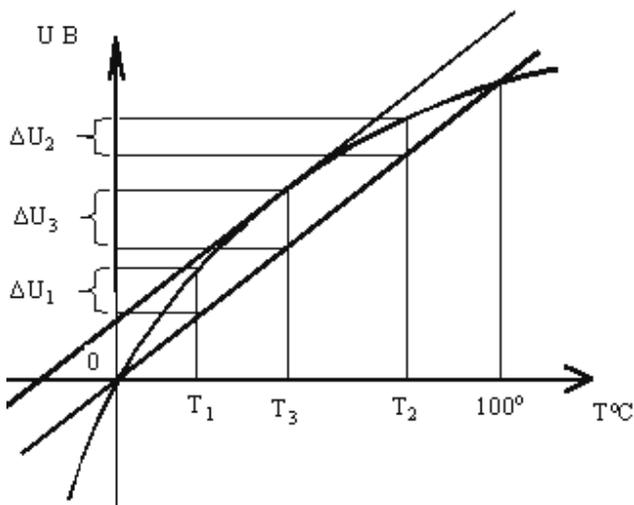


Рис. 2. Різниця між апроксимованою та дійсною напругою ЧЕ

Як видно з графічної залежності (рис. 2), різниці напруг ΔU_1 та ΔU_2 при температурах T_1 та T_2 будуть дорівнювати:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = U_{KB \cdot T_1} - U_{L \cdot T_1} \\ \Delta U_2 = U_{KB \cdot T_2} - U_{L \cdot T_2} \end{cases}, \quad (4)$$

де $U_{KB \cdot T_1}$, $U_{L \cdot T_1}$, $U_{KB \cdot T_2}$, $U_{L \cdot T_2}$ – значення функцій (2) та (3) при температурах T_1 та T_2

Або

$$\begin{cases} \Delta U_1 = TKN_L \cdot T_1 - TKN \cdot T_1 - \frac{\Delta TKN \cdot T_1^2}{2} \\ \Delta U_2 = TKN_L \cdot T_2 - TKN \cdot T_2 - \frac{\Delta TKN \cdot T_2^2}{2} \end{cases}. \quad (5)$$

З системи рівнянь (5) можна знайти TKN та ΔTKN і, підставивши їх у (2), одержати функцію перетворення для термочутливого елемента. Для наведеного термочутливого елемента при $T_1=30^\circ\text{C}$ та $T_2=80^\circ\text{C}$

було визначено: $TKN=-0,0102$ В; $\Delta TKN=5,25 \cdot 10^{-6}$. Оскільки $U_{3M}=U_{np0}=0,802$, то функція перетворення (2) матиме вигляд:

$$U_{KB} = 0,0102 \cdot T - \frac{5,25 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot T^2. \quad (6)$$

Взявши похідні за температурою від функцій (2) і (3) та прирівнюючи їх, можна визначити максимальну абсолютну похибку у температурному діапазоні $0 \div 100^\circ\text{C}$ без побудови функції перетворення:

$$\Delta TKN \cdot T_3 + TKN = TKN_L. \quad (7)$$

Температура T_3 (рис. 2), визначена з (7), буде абсцисою точки дотику дотичної до функції (2), яка проходить паралельно до функції (3). Саме при цій температурі ΔU_{T_3} буде максимальною. За описаною методикою визначено температуру T_3 , яка становить $49,5^\circ\text{C}$. Очевидно, що другою точкою, де абсолютна похибка буде мати максимальне значення, є точка, що розміщена ліворуч від початку координат. У такому разі це -40°C , яка є початком вимірювального діапазону. Абсолютна похибка на початку діапазону становить $0,0147$ В, що в перерахунку на градуси відповідає $1,5^\circ\text{C}$. Абсолютна похибка при температурі $49,5^\circ\text{C}$ становить $0,0066$ В, що в перерахунку на градуси відповідає $0,7^\circ\text{C}$.

Висновки. Розроблений термометр відповідає сучасним вимогам, які ставлять до портативних ЗВ температури. Запропонована методика його метрологічної оцінки дає змогу за значеннями напруги на ЧЕ, при чотирьох значеннях температур:

а) знайти значення TKN термочутливого елемента та встановити, чи є він функцією температури;

б) встановити температури, за яких абсолютні похибки у діапазоні вимірювань будуть максимальні, і визначити їх кількісні значення;

в) побудувати функцію перетворення термочутливого елемента.

1. Василюк В. М. Принцип побудови високоточних температурних сенсорів на основі р-п-переходу // Вимірювальна техніка та метрологія. 1998 – №53. – С. 70–76.

2. Зайцев Ю. В., Громов В. С., Григораши Т. С. Полупроводниковые термoeлектрические преобразователи. – М., 1985. 3. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – М., 1973.