

Ю. В. Яцук, асп.;

Г. І. Барило

## ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЮ РОБОЧИХ ЕТАЛОНІВ ВОЛЬТА

*Запропоновано використовувати напівпровідникові кремнієві сенсори з модуляцією вимірювальних струмів в системі контролю температури робочого еталону Вольта. Проаналізовано метрологічні властивості цього каналу температурного контролю. Подано основні особливості практичної реалізації та результати експериментальних досліджень макету прецизійного цифрового термометра з напівпровідниковими сенсорами.*

### Вступ

Незважаючи на ряд суттєвих переваг прецизійних мір напруги на базі напівпровідникових елементів — стабілітронів або мір на основі ширини забороненої зони напівпровідника, — вони не змогли повністю замінити нормальні елементи (НЕ) в робочих еталонах (РЕ) одиниці напруги постійного струму. Через більший рівень вихідної шумової напруги, значний часовий дрейф, зумовлений як забрудненнями поверхні р-п переходів, так і наявністю на ній зарядів, які можуть змінюватись при дії різноманітних факторів, у тому числі і зовнішніх електромагнітних збурень, при однаковій точності міри напруги на основі напівпровідникових елементів потрібно частіше повіряти порівняно з НЕ (найточніші міри приблизно один раз на три місяці) [1]. Найточніші міри напруги на основі ефекту Джозефсона дуже складні в реалізації та потребують достатньо великих коштів в експлуатації і, тому, використовуються зазвичай періодично для відтворення, зберігання та передавання розміру Вольта робочим еталонам РЕ [2—4]. Тому актуальною на сьогодні є задача виготовлення транспортбельних РЕ напруги на основі НЕ.

### Постановка задачі досліджень

Відомо, що одним із найбільших недоліків найстабільніших насичених НЕ є великий температурний коефіцієнт напруги (ТКН). Тому цілком природною є традиційна пропозиція термостатування НЕ з похибкою у декілька разів меншою, порівняно із межею допустимих значень їх річної нестабільності. При допустимих значеннях нестабільності РЕ напруги [3, 4] та ТКН насичених НЕ, температуру в їх термостатах слід підтримувати з похибкою (0,003...0,005) К для РЕ 1-го розряду [3—5].

Побудова температурного каналу на основі платинових термоперетворювачів опору (ПТО) приводить до суттєвого зростання вимог до порогу чутливості за напругою (до декількох десятків часток мікрівольта). Окрім цього, чутливий елемент ПТО саморозігрівається, що створює зміни градієнта температури в зоні розташування НЕ, що, як відомо, на порядок сильніше впливає на е. р. с. НЕ порівняно із відносно повільними змінами власне його температури [5]. Використання для цієї мети термісторів достатньо трудомістко через їх можливий суттєвий часовий дрейф та, з огляду на це, необхідність їх щотижневої перевірки та застосування прогностичних пристроїв із значними обчислювальними можливостями [5]. Окрім стандартних сенсорів температури (СТ), щораз ширше застосовуються напівпровідникові сенсори, що зазвичай використовуються в діапазоні середніх температур  $-60...+150$  °С [6, 7]. Завдяки малим масогабаритним показникам, вартості, високій швидкодії та точності (за умови уніфікації характеристик [8]) вони знаходять застосування в багатьох галузях господарства. Діодні температурні сенсори забезпечують задовільну чутливість, але мають недостатню часову стабільність — соті частки Кельвіна за рік в околі кімнатних температур [9]. При використанні транзисторних сенсорів в режимі модуляції їх вимірювального струму вимоги до їх часової стабільності суттєво зменшуються, оскільки чутливість залежить від фундаментальних фізичних констант та логарифму відношення значень вимірювальних струмів (струмозадавальних елементів) [8].

Важливою, але практично невирішеною задачею є контроль значень температури в термостатованому об'ємі НЕ, яка на сьогодні базується на «інженерній інтуїції» з припущенням про якість

використаного термостату та практичній відсутності методичної похибки між взірцевими ПТО та контрольними сенсорами температури.

### Побудова системи контролю температури в термостаті робочого еталону Вольта

Очевидно, що однією із центральних проблем побудови системи контролю температури в термостаті РЕ Вольта є питання забезпечення необхідного значення градієнта температури всередині термостатованого об'єму. Вимоги до градієнта температури є дуже жорсткими, в [5] показано, що його значення не повинно перевищувати  $\Delta_{\text{грд}} \leq 0,0003$  К. Такі малі значення градієнта вимагають наявності в системі температурного контролю температурних сенсорів для «точкових» вимірювань температури. Досягнути цього можна з використанням безкорпусних сенсорів на основі прямо зміщеного  $p$ - $n$  переходу. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що мінімального значення похибки  $\Delta_{\text{грд}} \leq 0,01$  К від само розігрівання діодних сенсорів можна досягнути в кремнієвих  $p$ - $n$  переходах, за умови, що прямий струм  $I$  не перевищує значення  $I_d \leq 15,3$  мА [10]. Оскільки пряма напруга  $p$ - $n$  переходу  $U$  слабо залежить від значення прямого струму в області середніх температур [10], то потужність, що виділяється в  $p$ - $n$  переході, лінійно залежатиме від струму. Тоді, при заданому значенні градієнта температури, значення вимірювального струму не повинно перевищувати  $I \leq 459$  мкА. Такі значення забезпечують практичну зручність в генерації, комутації та перетворенні вимірювальних струмів.

Важливою проблемою побудови прецизійних та метрологічно надійних термометрів з напівпровідниковими сенсорами є забезпечення взаємозамінності їх характеристик. Встановлено, що для кремнієвих СТ при струмах не більших 0,1 мА з методичною похибкою в соті частки Кельвіна може бути використаний метод уніфікації з модуляцією струмів в діапазоні вимірювання ( $-50 \dots +150$ ) °С [8]. Проте доволі великі значення спаду напруги на прямо зміщених  $p$ - $n$  переходах (до декількох Вольт для  $m$  послідовно сполучених діодів) та його температурних змін ( $-2m$  мВ/К) ускладнюють практичну реалізацію цього методу уніфікації, оскільки інформативним сигналом при цьому є відносно невелика різниця (сотні мВ) спадів напруги на  $p$ - $n$  переході при різних значеннях струмів. Аналіз шляхів побудови показав, що при використанні подільників напруги, значення результатів перетворення не залежатиме від абсолютних значень вимірювальних струмів через  $p$ - $n$  перехід, а тільки від їх відношення, що забезпечує інваріантність результатів вимірювання до значення напруги живлення генератора струму. Не менш важливим є забезпечення часової та температурної стабільності розрахункових співвідношень між значеннями всіх трьох струмів. Аналіз показує, що за умови використання інтегральної технології побудови мікроелектронних ЦАП, температурні та часові зміни відношення опорів резисторів набагато менші від зміни значень їх опорів. При використанні КМДН-технології з ємнісними подільниками температурний дрейф коефіцієнта поділу можна зменшити ще в декілька десятків разів при одночасному зменшенні і нелінійності опорів резисторів подільника при зміні значень поділюваних напруг. Для побудови термометрів, вихідний сигнал яких пропорційний температурі за шкалою Цельсія, необхідно використовувати прецизійне джерело опорної напруги з подільником напруги, оскільки при модуляції вимірювального струму вихідний сигнал пропорційний абсолютній температурі [8].

При трьох значеннях вимірювального струму  $I_1, I_2, I_3$ , що протікає через сенсори СТ1, ..., СТМ результат вимірювання  $\Delta U_{123}$  знаходиться як [8]

$$\Delta U_{123} = (U_1 - U_2) - (U_1 - U_3) = (2I_1 - I_2 - I_3) R_B + m\varphi_T \ln \left( I_1^2 / I_2 I_3 \right), \quad (1)$$

де  $U_i = \sum_{j=1}^m (I_j R_B + \varphi_T \ln (I_j / I_S))$  — спад напруги на  $m$   $p$ - $n$  переходах при вимірювальному стру-

мі  $I_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $R_B$  — опір пасивної частини бази, виводів областей бази та емітера усіх діодів сенсорів СТ1, ..., СТМ, з'єднувальних дротів;  $\varphi_T = kT_x/q$  — температурний потенціал;  $k, q$  — відповідно стала Больцмана та заряд електрона;  $T_x$  — температура  $p$ - $n$  переходу (вимірювана температура);  $I_S$  — тепловий струм  $p$ - $n$  переходу при температурі  $T_x$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$  — кількість діодів у кожному із сенсорів СТ.

Для забезпечення інваріантності результату вимірювання до опору  $R_B$  повинна виконуватись умова  $2I_1 - I_2 - I_3 = 0$ , при цьому

$$\Delta U_{123} = 2U_1 - U_2 - U_3. \quad (2)$$

Співвідношення (2) може бути покладене в основу алгоритму визначення результату вимірювання. В цьому співвідношенні значення напруг  $U_1, U_2, U_3$  принципово отримуються в різні моменти часу і для його реалізації слід використовувати пристрої вибірки/зберігання та збільшувати вдвічі коефіцієнт передачі напруги  $U_1$ , що ускладнює структуру пристрою. З метою спрощення реалізації пропонується пристрій вибірки/зберігання виконати на основі інтегратора, причому додатну напругу  $U_1$  інтегрувати вдвічі довше від часу інтегрування від'ємних напруг  $U_2$  та  $U_3$ . При цьому для розширення динамічного діапазону пристрою від напруг  $U_i$  слід віднімати напругу  $U_{D0}$ , значення якої приблизно рівне спаду напруги на  $p$ - $n$  переході при кімнатній температурі [11].

Якщо позначити  $I_1/I_2 = a$ ,  $I_3/I_2 = 2a - 1$ , то вирази (1), (2) подамо у вигляді

$$\Delta U_{123} = m\varphi_T \ln \left[ a^2 / (2a - 1) \right], \quad (3)$$

де  $a$  — сталий коефіцієнт.

Аналіз показує, що зростання значення коефіцієнта  $a$  від 10 до 100 приводить до слабого зростання значення різниці напруг  $\Delta U_{123}$  приблизно лише у два рази. Тобто, немає практичної необхідності для суттєвого збільшення відношення струмів, оскільки це тільки ускладнює практичну реалізацію блока модуляції вимірювальних струмів та не дає суттєвого підвищення чутливості перетворення. Для збільшення чутливості перетворення найдоцільніше використовувати послідовне з'єднання напівпровідникових СТ, враховуючи їх малі масо-габаритні показники (див. (3)).

Пропонуємо розміщувати малогабаритні діодні безкорпусні сенсори температури вздовж зовнішньої поверхні кожного НЕ з метою вимірювання усередненого значення температур  $T_p, T_l$  в місцях розташування їх у термостаті. Це також дає можливість оцінити значення градієнта температури між окремими НЕ. Дійсно, із виразу (3) можна подати градієнт температури  $\Delta T_{pl}$  між парою  $p$  та  $l$  будь-яких НЕ

$$\Delta T_{pl} = T_p - T_l = \frac{\Delta U_{123p} - \Delta U_{123l}}{(k/q) \ln \left[ a^2 / (2a - 1) \right]}, \quad (4)$$

де  $\Delta U_{123p}, T_p$  — відповідно, різниця напруг та усереднена температура  $p$ -го НЕ;  $\Delta U_{123l}, T_l$  — відповідно, різниця напруг та усереднена температура  $l$ -го НЕ.

Особливо такий підхід привабливо використовувати при калібруванні температурних сенсорів за зразковими ПТО. Для цього доцільно розмістити діодні сенсори на поверхні приймальної камери, в яку поміщається ПТО. Якщо усереднена температура цих діодних СТ перевищуватиме допустиме значення, то слід зробити перерву у вимірюваннях з ПТО для того, щоб він вистиг. Значення часових співвідношень доцільно встановлювати експериментальним шляхом. У результаті в термостатованому об'ємі буде зменшене виділення тепла та зменшиться градієнт температури.

У виготовленому та дослідженому макеті цифрового напівпровідникового термометра чутливість була задовільною і становила 300 мкВ/К (1,5 мкВ/0,005 К), що є достатньо для системи температурного контролю РЕ Вольта. Експериментально встановлено, що показання макета термометра практично не змінювались при зміні опору двопровідної лінії зв'язку до 200 Ом. Окрім цього, завдяки модуляції вимірювального струму забезпечується інваріантність до контактних е. р. с., що можуть виникати в лініях зв'язку, що дає суттєву перевагу порівняно з іншими способами температурного контролю. Розкид показань цифрового термометра (дискретність 0,1 °С) для десяти довільним чином вибраних серійних кремнієвих транзисторів не перевищував значень  $\pm 0,2$  °С. Макет цифрового термометра виконаний з використанням сучасної схмотехніки комутованих конденсаторів, що дає підстави для його реалізації в базисі технології інтегральних мікросхем або «програмованих систем на чіпі», наприклад, PsoC фірми Cypress Microsystems.

### Висновки

Показано, що в системах температурного контролю доцільним є використання малогабаритних напівпровідникових СТ, які розташовані на внутрішніх поверхнях кожного НЕ.

Запропоновано також алгоритм та пристрій для вимірювання температури, що дає можливість підвищення точності й стабільності, забезпечує взаємозамінність напівпровідникових сенсорів за рахунок виключення впливу нестабільних параметрів на результат вимірювання, інваріантність до впливу опорів бази і виводів бази та емітера вимірювальних діодів, а також опорів двопровідної з'єднувальної лінії зв'язку.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соколов С. Д., Рождественская Т. Б. Высокостабильные меры напряжения постоянного тока для применения в нестационарных условиях // Измерения, контроль, автоматизация. — М.: ЦНИИТЭИприборостроения. — 1986. — Вып. 3(59). — С. 3—10.
2. J. Niemeyer, R. Behr, F. Müller. Electrical Quantum Metrology // Report on the European-American Summerschool on Superconducting Electronics. — Chicago: USA. — 2005. — 57 p.
3. Анікін В. В., Колбасін О. І., Огар В. О., Соляник А. С., Словінський С.І. Деякі особливості побудови еталона одиниці електрорушійної сили і постійної напруги // Пр. міжнародної конференції. «Метрологія та вимірювальна техніка» МВТ-99. — 1999. — Т. 1. — С. 195—197.
4. ДСТУ 3834-98. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електрорушійної сили і постійної напруги.
5. Кочан Р. В., Бойко О. В. Система контролю температури робочого еталону Вольты // Вимірювальна техніка та метрологія. — Вип. 64. — Львів. — 2003. — С. 93—99.
6. Microsensors. Principles and Application. Gardner J. W., J. Willey and Jons. — Chichester, England, 1993. — P. 530.
7. Василюк В., Ленюченко А., Малахівський П. Проектування цифрових термометрів з термодіодними сенсорами // Вимірювальна техніка та метрологія. — Вип. 56. — 2000. — С. 55—59.
8. Яцук В., Яцук Ю. Метод покращання характеристик температурних сенсорів на основі р-п переходу // Вимірювальна техніка та метрологія. — Вип. 59. — 2002. — С. 90—96.
9. Фогельсон И. Б., Шихов В. И. Стабильность транзисторных преобразователей // Метрология. — 1988. — № 10. — С. 38—45.
10. Shwarts Yu. M., Borblik V. L., Kulish N. R., Venger E. R., Sokolov V. N. Limiting characteristics of diodes temperature sensors. — Sensors and Actuators. — 86 (2000). — P. 197—205.
11. Яцук В. О., Яцук Ю. В. Підвищення точності та метрологічної надійності засобів вимірювання температури з напівпровідниковими сенсорами // Вісник НУ «ЛП» «Автоматика, вимірювання та керування». — Вип. 439. — 2003. — С. 90—95.

**Яцук Юрій Васильович** — аспірант.

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Львівська політехніка»;

**Барилло Григорій Іванович** — голова правління ВАТ «Мікроприлад», м. Львів