

інформаційні технології». – Львів, 2011. – № 694. – С. 205–211. 3. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Металлургия, 1971. – 446 с. 4. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – С. 79. 5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. – М.: Мир, 1988. – 399 с. 6. Ранцевич В.Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения. – Минск: Наука

и техника, 1988. – 152 с. 7. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982. – 296 с. 8. Гоц Н., Пянтковски Т. Дослідження впливу приймача випромінювання на точність вимірювання температури за випромінюванням багатоспектральними методами // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка», «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів, 2010. – № 686. – С.290–296.

УДК 621.3; 536.53

КОРИГУВАННЯ ПОХИБОК ДІОДНИХ ЦИФРОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ

Яцук Юрій¹, Тимчук Олександр², 2011

Національний університет «Львівська політехніка»,

¹кафедра комп'ютеризованих систем автоматички, jürgen.jazuk@gmail.com,

²кафедра метрології, стандартизації та сертифікації, saigex.ua@gmail.com

Проаналізовано джерела похибок, змодельовано їх залежності від декількох найважливіших параметрів генератора струмів та запропоновано способи коригування похибок цифрових діодних термометрів із кодово змінюваними значеннями вимірювальних струмів.

Проанализированы факторы погрешностей, смоделированы их зависимости от нескольких наиболее важных параметров генератора токов и предложены пути коррекции погрешностей цифровых диодных термометров с изменяемыми кодом значениями измерительных токов.

The digital diode thermometer error factors and error modelling results as multiarguments function are provide in this paper. The some ways of digital diode thermometer errors correction are discussed also.

Аналіз останніх публікацій. Відомі переваги діодних сенсорів температури (ДСТ) щораз ширше використовують, зокрема в цифрових термометрах (ЦТ), які можуть бути вбудовуваними або ж автономними. Завдяки методу зміни вимірювальних струмів забезпечується їхня висока точність, взаємозамінність і стабільність, що відкриває перспективи для побудови прецизійних ЦТ [1–6]. Однак на практиці досягти взаємозамінності ДСТ, кращої від $\pm 0,5$ К, доволі складно через трудомістку процедуру адитивного та мультиплікативного підстроювання реальної функції перетворення вторинного приладу [2–7].

Завдання досліджень. Основною метою цієї статті є аналіз можливостей коригування похибок цифрових термометрів для роботи з діодними сенсорами.

Аналіз похибок діодних цифрових термометрів. Відомо, що з використанням трьох значень I_1, I_2, I_3

($I_1 < I_2 < I_3$) вимірювальних струмів, що протікають через ДСТ, код N_X результату вимірювання можна знайти як [1–3, 5]

$$N_x = N_1 - N_2 - N_3 = k_{ADC} \left[(2I_1 - I_2 - I_3) R_L + (kT_x / q) \ln(I_1^2 / I_2 I_3) \right], \quad (1)$$

де N_1, N_2, N_3 – коди проміжних результатів перетворення сигналів з ДСТ, отриманих під час пропускання через нього струмів I_1, I_2, I_3 відповідно; k_{ADC} – коефіцієнт перетворення спаду напруги на ДСТ на цифровий код; R_L – опори бази, виводів бази та емітера та з'єднувальних дротів; q – заряд електрона; k – стала Больцмана.

З метою незалежності результатів вимірювання від значення опору R_L треба виконати умову $2I_1 - I_2 - I_3 = 0$. Під час опрацювання цифрових кодів, пропорційних до спадів напруги U_i на ДСТ $N_X = k_{ADC} (2U_1 - U_2 - U_3)$, найдоцільніше вибрати час перетворення напруги U_1 удвічі більшим від часів

перетворення двох інших напруг U_2, U_3 , отриманих за значень струмів I_1, I_2, I_3 відповідно. Очевидно, що точність виконання співвідношень між струмами впливатиме як на адитивну (АСП), так і на мультиплікативну (МСП) складові похибки ЦТ. Враховуючи високі часову та температурну стабільність коефіцієнта перетворення, як схемотехнічний елемент для задання необхідних співвідношень між вимірвальними струмами у діодних ЦТ можна рекомендувати помножувальні ЦАП [8]. У такому разі, якщо власне генератор вимірвальних струмів (ГС) реалізувати на основі інвертувального підсилювача, то вираз для знаходження вимірвальних струмів визначимо зі співвідношення (рис. 1) [8, 9]

$$I_i = (1/R_C) [m_i E_0 G_P R_Z (1 + 1/k_{ПСН} + 1/k_{ГС}) + D_{ПСН} + D_{ГС}], \quad (2)$$

де R_C – опір струмозадавального резистора; E_0 – опорна напруга для ЦАП; $k_{ПСН}, k_{ГС}$ – коефіцієнти підсилення розімкнених підсилювачів перетворювача струм-напруга (ПСН) ЦАП та ГС; $D_{ПСН} = e_{ПСН} + I_{ПСН} R_Z$; $e_{ПСН}, I_{ПСН}$ – напруга зміщення та вхідний струм підсилювача ПСН; $D_{ГС} = e_{ГС} + I_{ГС} R_C$; $e_{ГС}, I_{ГС}$ – напруга зміщення та вхідний струм підсилювача ГС; G_P, R_Z – вхідна провідність та опір зворотного зв'язку резистивного помножувального ЦАП.

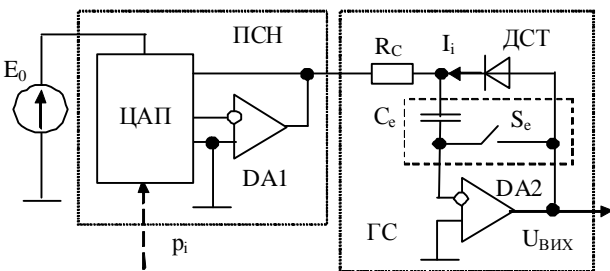


Рис. 1. Спрощена схема генератора вимірвальних струмів (з можливістю автоматичного коригування похибок)

Значення абсолютної похибки $\Delta\theta_i$ ЦТ, спричиненої неточністю задання струмів I_i і приведеної до входу термометра, знехтувавши складовими другого порядку малості, подамо виразом

$$Dq_i = \frac{R_L (b + D_{123})}{e_q} + \frac{kT_x}{qe_q} \left[(2d_{m1} - d_{m2} - d_{m3}) + \frac{D_{At}}{I_{1H} R_{CH}} \cdot \frac{1 - a^2}{a} \right], \quad (3)$$

де $b=2I_{1H}-I_{2H}-I_{3H}$ – неточність виконання ідеального співвідношення між струмами, зумовлена дискретністю встановлення їх значень; I_{1H}, I_{2H}, I_{3H} – номінальні значення струмів I_1, I_2, I_3 ; $\delta_{\mu1}, \delta_{\mu2}, \delta_{\mu3}$ – відносні похибки кодів керування ЦАП; $\Delta_{At}=\Delta_{ПНС}+\Delta_{ГС}$; R_{CH} – номінальне значення опору струмозадавального резистора; $a=I_{1H}/I_{2H}$ – вибране значення співвідношення між струмами; Δ_{123} – АСП ЦТ, спричинена похибками ГС; $e_q = \frac{k}{q} \ln \frac{I_{1H}^2}{I_{2H} I_{3H}}$ – чутливість ЦТ зі зміною вимірвальних струмів.

Значення АСП ЦТ Δ_{123} знайдемо із співвідношення (2) як

$$D_{123} = \frac{kT_x}{q} \left[(2D_{m1} - D_{m2} - D_{m3}) \frac{E_{0H} G_{PH} R_{ZH}}{R_{CH}} + b \frac{E_{0H} G_{PH} R_{ZH}}{R_{CH}} (d_{E0} + d_{GP} + d_{RZ} + d_{RC}) \right], \quad (4)$$

де $\Delta_{\mu1}, \Delta_{\mu2}, \Delta_{\mu3}$ – абсолютні похибки коефіцієнта поділу ЦАП під час задання значень струмів I_1, I_2, I_3 ; E_{0H}, G_{PH}, R_{ZH} – номінальні значення опорної напруги, вхідної провідності та опору зворотного зв'язку ЦАП; $\delta_{E0}, \delta_{GP}, \delta_{RZ}, \delta_{RC}$ – відносні похибки, відповідно, опорної напруги, вхідної провідності та опору зворотного зв'язку ЦАП і струмозадавального резистора.

Значення похибок ЦТ за виразом (3) оцінено за допомогою програмного пакета MathCAD. На рис. 2 подано температурну залежність похибки $\Delta\theta_i$, спричиненої зміною значення вимірвального струму в межах $I_1 = 10^{-6}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$ А, за умов, що значення інших впливних факторів призводять до значно менших похибок ($\kappa_{ГС} = 10^7$; $I_{ГС} = 2 \cdot 10^{-11}$ А, $D_{At} = 1$ мВ). З аналізу рис. 2 робимо висновок, що значення похибки ЦТ, зумовленої впливом напруги зміщення, зменшується зі зростанням вимірвального струму.

На рис. 3 подано температурну залежність похибки ЦТ $\Delta\theta_i$, спричиненої зміною еквівалентної напруги зміщення ГС, для фіксованого значення вимірвального струму (криві 1–3) та зміною вимірвального струму для фіксованого значення напруги зміщення (криві 3–5). Аналіз рис. 3 показує, що через зростання значень напруги зміщення значно збільшується значення похибки ЦТ. Це потребуватиме або вибору прецизійної елементної бази, або автоматичного коригування еквівалентної напруги зміщення ГС ЦТ.

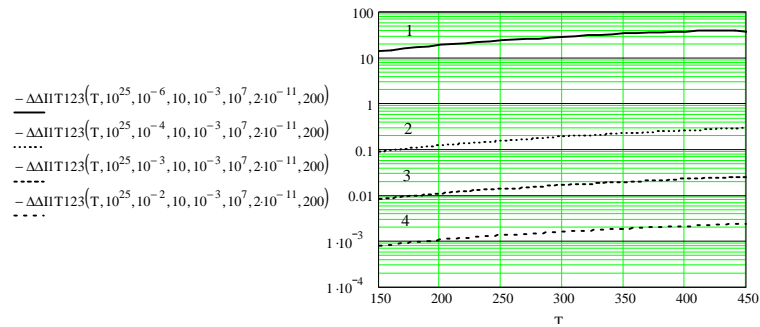


Рис. 2. Температурна залежність похибки цифрового термометра, спричиненої еквівалентною напругою зміщення генератора струму, для різних значень вимірювального струму

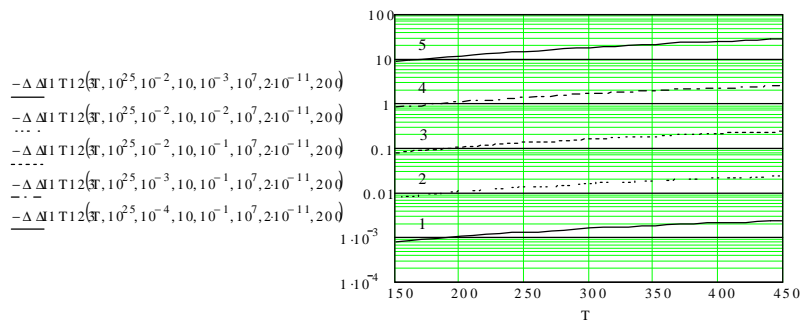


Рис. 3. Температурна залежність похибки цифрового термометра, спричиненої зміною еквівалентної напруги зміщення генератора струму, для фіксованого значення вимірювального струму (криві 1–3) та зміною вимірювального струму для фіксованого значення напруги зміщення (криві 3–5)

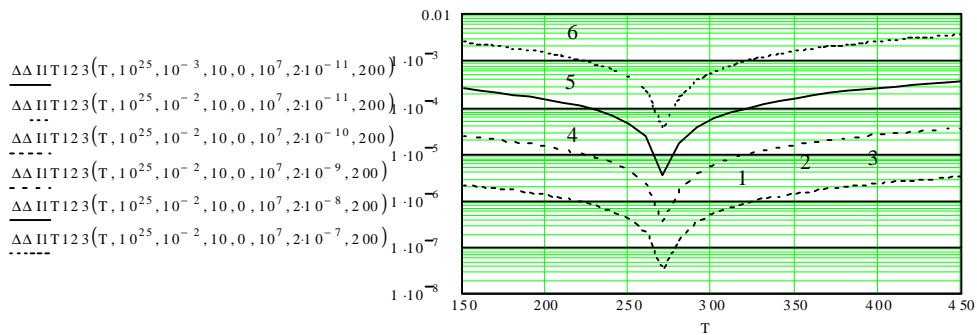


Рис. 4. Температурна залежність похибки цифрового термометра, спричиненої зміною вимірювального струму для фіксованого значення вхідного струму підсилювача генератора струму (криві 1–2) та зміною вхідного струму підсилювача для фіксованого значення вимірювального струму (криві 2–6)

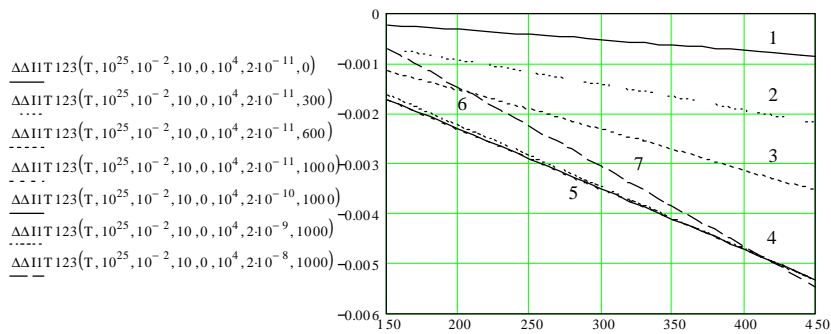


Рис. 5. Температурна залежність похибки цифрового термометра, спричинена зміною опору з'єднувальних ліній для фіксованого значення вхідного струму підсилювача генератора струму (криві 1–4) та зміною вхідного струму підсилювача, для фіксованого значення опору з'єднувальних ліній (криві 4–7)

На рис. 4 подано температурну залежність похибки ЦТ $\Delta\theta$, зумовлену зміною значень вхідних струмів ГС, залежно від значень вимірювального струму $I_1 = 10^{-6}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$ А (криві 1–4), для значення $I_{ГС} = 2 \cdot 10^{-11}$ А та при $I_1 = 10^{-2}$ А $I_{ГС} = 10^{-10}; 10^{-9}; 10^{-8}$ А. Аналіз рис. 4 показує, що, вибравши ОП з МДН-транзисторами на вході (наприклад, типу ОР42 фірми Analog Device, типове значення вхідних струмів для яких становить 18 пА) можна суттєво, до значень, менших від 10^{-5} К, зменшити похибку ЦТ, викликану вхідними струмами ОП ГС.

На рис. 5 подано температурну залежність похибки ЦТ, спричиненої зміною опору з'єднувальних ліній в межах від 0 до 1 кОм для фіксованого значення $2 \cdot 10^{-11}$ А вхідного струму підсилювача ГС (криві 1-4) та зміною вхідного струму підсилювача в межах від $2 \cdot 10^{-11}$ А до $2 \cdot 10^{-8}$ А для фіксованого значення $R_{л1} = 1$ кОм опору з'єднувальних ліній (криві 4–7). Аналіз рис. 5 показує, що навіть у найгіршому випадку $R_{л1} = 0$ та за мінімальних значень вимірюваної температури 150 К похибка ЦТ не перевищуватиме 0,01 К. Це підтверджує теоретичне припущення про інваріантність результату вимірювання до опорів дводротової з'єднувальної лінії.

Способи коригування похибок. Із виконаного аналізу можна зробити висновки про необхідність зменшити складові похибки ГС, спричинені похибками ЦАП та еквівалентною напругою зміщення операційних підсилювачів (ОП) ГС. Для цього можна скористатися декількома можливостями. Перша, найтривіальніша, яка полягає у використанні прецизійної елементної бази, призводить до зростання вартості ЦТ, а також обов'язкового періодичного коригування похибок, що зумовлено деградаційними змінами параметрів його елементів. Друга можливість пов'язана із алгоритмічною корекцією АСП усього тракту перетворення ГС завдяки використанню додаткового такту для вичленування, запам'ятовування значення та коригування АСП ГС. Справді, аналіз співвідношення (3) дає змогу зробити висновок про таку можливість, за допомогою подавання до ЦАП нульового коду управління, перетворення еквівалентної АСП на код, запам'ятовування його значення та коригування її значення в кожному із проміжних циклів перетворення. Цей шлях сьогодні є перспективним, однак процедура коригування триватиме певний час та зменшуватиме функціональні можли-

вості процесора. І, нарешті, третій шлях є універсальним і полягає в автоматичному аналоговому коригуванні АСП завдяки уведенню в структуру ГС запам'ятовувальних елементів – конденсатора C_e та додаткового ключа S_e (на рис. 1 ці елементи обведено пунктирною лінією).

Для коригування еквівалентної адитивної складової похибки ГС, яка призводить до появи і АСП, і МСП ЦТ, використовують принцип періодичного коригування дрейфу (див. рис. 1) [10] безпосередньо на виході генератора струму. У цьому випадку новий цикл формування модуляційних струмів складатиметься з чотирьох тактів. У першому такті до ЦАП подається нульове значення коду та замикається ключ S_e і запам'ятовувальний конденсатор C_e зарядиться до напруги зміщення

$$U_{ce} = e_{клин} + e_{ГС} / (1 + 1/k_{ГС}) - I_{ГС} R_e / (1 + k_{ГС}), \quad (5)$$

де R_e – опір замкненого ключа S_e .

За умови $k_{ГС} \gg 1$ справджується рівність $U_{ce} \cong D_{клин}$. У інших трьох тактах формуються струми I_i , значення яких знаходять з виразу (2). Отже, як показує аналіз виразу (2) та результати математичного моделювання за виконання умов $k_{ГС} \gg 1$ та $I_i \gg I_{ГС}$, значення модуляційних струмів I_i практично визначатиметься тільки параметрами ЦАП та описуватиметься таким виразом

$$I_i = m_i U_{ГС} / R_c. \quad (6)$$

Використання ЦАП дає нову можливість під час налагодження ЦТ, змінюючи у певних невеликих межах значення кодів керування μ_1, μ_2, μ_3 , що відповідатимуть струмам I_1, I_2, I_3 , встановлювати співвідношення $2 \mu_1 - \mu_2 - \mu_3 = 0$ (що, очевидно, еквівалентно умові $2I_1 - I_2 - I_3 = 0$ забезпечення інваріантності результату вимірювання до опорів дводротової з'єднувальної лінії). Оскільки температурний дрейф та часові зміни коефіцієнтів передачі помножувальних ЦАП є незначними [8], то після налагодження ЦТ умова інваріантності результату вимірювання до опорів двопровідної з'єднувальної лінії забезпечуватиметься в широкому діапазоні змін температури довкілля та впродовж довгих проміжків часу.

Висновки.

1. Аналіз показав, що завдяки високій стабільності для кодового задання значень у генераторах вимірювального струму найдоцільніше використовувати помножувальні резистивні багаторозрядні ЦАП.

2. За результатами математичного моделювання похибок генератора вимірювальних струмів подано рекомендації щодо вибору параметрів елементів цифрового діодного термометра.

3. Щоб зменшити вплив адитивної складової похибки, доцільно використовувати методи автоматичного аналогового або цифрового коригування.

1. Яцук Ю.В. *Покращання метрологічних характеристик цифрових перетворювачів температури в робочих умовах експлуатації: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.04 / Яцук Юрій Васильович.* – Львів, 2009. – 19 с. 2. Яцук В. *Метод покращення характеристик напівпровідникових сенсорів на основі р-п-переходу / В. Яцук, Ю. Яцук // Вимірювальна техніка та метрологія.* – 2002. – № 59. – С. 90–95. 3. Яцук В.О. *Підвищення точності та метрологічної надійності засобів вимірювання температури з напівпровідниковими сенсорами / В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”; “Автоматика, вимірювання та керування”.* – 2003. – Вип. 475. – С. 88–93. 4. Василюк В.М. *Проектування цифрових термометрів з термодіодними сенсорами /*

В.М. Василюк, А.М. Ленюченко, П.С. Малачівський // Вимірювальна техніка та метрологія – №56. – 2000. – С. 55–58. 5. *New Method of Dispersion Minimization of Si p-n Junction Temperature Sensors // V.O. Yatsuk, O.Ye. Basalkevych, Yu.V. Yatsuk, A.O. Sachenko // Proceedings of SAS 2007 – IEEE Sensors Applications Symposium, San Diego, California USA, 6-8 February 2007.* – P. 1–4. 6. *Shwarts Yu.M., Borblik V.L., Kulish N.R. etc Limiting characteristics of diode temperature sensors.* – *Sensors and actuators*, 86 (2000). – P. 197-205. 7. *Обух І.Я., Яцук В.О., Скебський П.П. Результати експериментальних досліджень уніфікації напівпровідникових сенсорів температури // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, “Автоматика, вимірювання та керування”.* – Вип. 551. – 2006. – С. 70–73. 8. *Федорков Б.Г., Телец В.А., Дегтяренко В.П. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи.* – М.: Радио и связь, 1984. – 320 с. 9. *Пейтон А. Дж., Воли В. Аналоговая электроника на операционных усилителях: пер. с англ.* – М.: БИНОМ, 1994. – 352 с. 10. *Яцук В.О., Малачівський П.С. Методи підвищення точності вимірювань: підручн.* – Львів: Бескид-біт, 2008. – 368 с.