

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ РЕЗИСТИВНИХ ТЕРМОМЕТРІВ ПІДВИЩЕНОЇ ЯКОСТІ

© Стадник Богдан^{1,2}, Сопільник Любомир¹, Яцук Юрій¹, 2008

¹Національний університет „Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, vyatsuk@polynet.lviv.ua

²Ряшівська політехніка, кафедра метрології та вимірювальних систем, Польща

Проаналізовано особливості побудови цифрових резистивних термометрів підвищеної якості, які можуть працювати із сенсорами із три- та чотирипровідними лініями зв'язку. Запропоновано структуру цифрового термометра з корекцією похибок вимірювального каналу. Проаналізовано метрологічні властивості такого цифрового резистивного термометра.

Проанализированы особенности реализации цифровых резистивных термометров повышенного качества, которые могут работать в комплекте с сенсорами с трёх- и четырёхпроводными линиями связи.

Предложена структура цифрового термометра с коррекцией погрешностей измерительного канала.

Проанализированы метрологические свойства такого цифрового резистивного термометра.

There are described the detailed features of high quality digital resistive thermometer for three and four connecting lines of sensors. The digital thermometer structure scheme with error correction features is proposed too. Metrological characteristic of such digital thermometers are analyzed also.

Постановка проблеми. На практиці значна частина температурних вимірювань з термоперетворювачами опору (ТО) зосереджена власне у середньоомному діапазоні. Тому із зростанням значень вимірюваних опорів починає домінувати небажаний вплив опорів ізоляції та зворотних струмів елементів вимірювального кола. У сучасних цифрових омметрах, очевидно, завдяки простоті апаратної реалізації, переважно використовуються прямі методи з проміжним перетворенням або на напругу, або на проміжок часу. Для реалізації цифрових омметрів із зрівноважувальним перетворенням (мостовим, компенсаційним, диференціальним, за методом заміщення) принципово необхідна наявність кодокерованих мір опору або ж провідності. Завдяки можливості корекції похибок, зумовлених впливом залишкових параметрів комутаційних елементів, на практиці у цифрових мостах використовуються лише кодокеровані магазини провідності. Відомо, що при вимірюванні пасивної фізичної величини – електричного опору, треба враховувати такі особливості:

– забезпечувати інваріантність результату вимірювання до впливу параметрів ліній зв'язку;

– забезпечувати інваріантність результату вимірювання до значення вимірювального струму та його змін;

– виконувати вимірювання за мінімально можливою розсіюваною в опорі ТО потужністю;

– зменшувати методичну похибку, зумовлену шунтуванням вимірювального опору ТО вхідним опором термометра.

Обмеження значення розсіюваної в опорі ТО потужності призводить до зменшення значення перетвореного сигналу, а, отже, й до зростання впливу завад, зокрема і внутрішніх шумів, і використання усереднювальних завадостійких алгоритмів перетворення. За умови використання чотирипровідної лінії зв'язку пара струмових дротів якої увімкнена послідовно з високим вихідним опором генератора вимірювального струму, а пара потенціальних дротів – з високим вхідним опором омметра, забезпечується інваріантність результату вимірювання опору ТО до значення опорів з'єднувальної лінії. Чотирипровідну лінію зв'язку тому доцільно застосовувати у потенціометричних вимірювальних структурах. Однак у мостових вимірювальних схемах мінімальний вплив опорів з'єднувальних ліній забезпечується тільки у разі використання трипровідної лінії зв'язку. Її використання призводить до необхідності або підгонки різниці опорів струмових з'єднувальних дротів до нульового значення, або урахування значення цієї різниці, зазвичай, в структурі цифрового термометра. У місцях з'єднань дротів ліній зв'язку можуть виникати контактні ЕРС, значення яких істотно змінюється у разі зміни умов довкілля. Окрім цього,

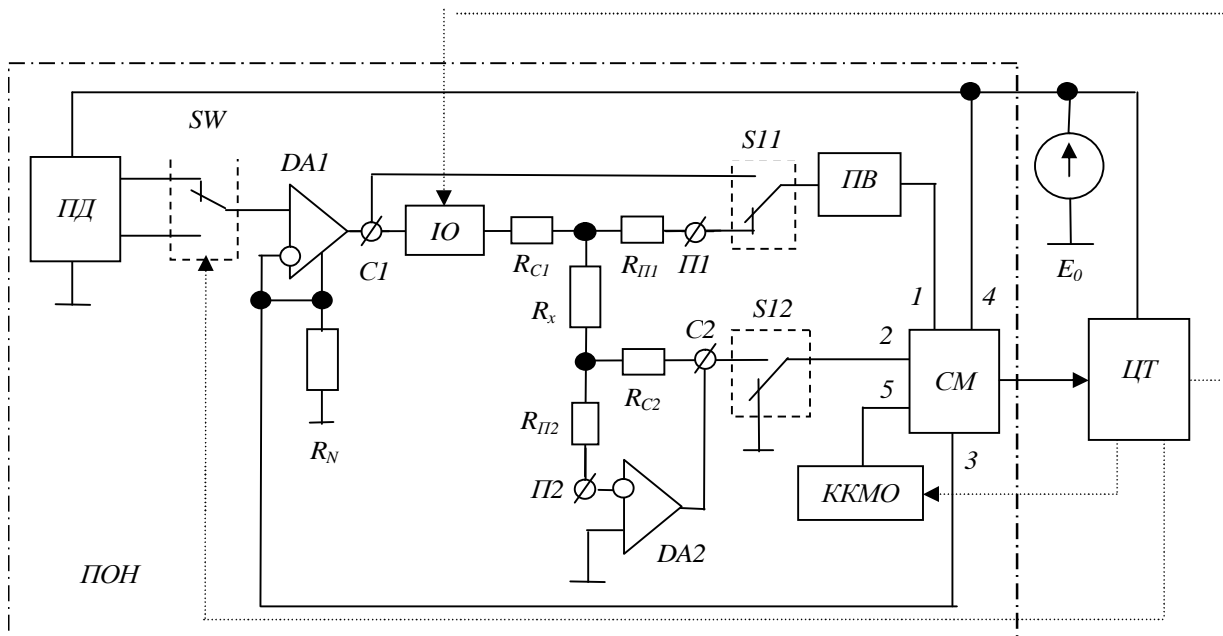
адитивна складова похибки АСП, зумовлена напругами зміщення та вхідними струмами операційних підсилювачів ОП термометра, істотно збільшуватиме похибку вимірювання опору ТО.

Вказані особливості вимірювання електричного опору ТО для побудови прецизійних і стабільних термометрів передбачають використання прецизійної та стабільної елементної бази, тобто конструктивно-технологічних методів побудови. Принагідно зауважимо, що переважна більшість зарубіжних цифрових омметрів побудована з використанням базового прецизійного вольтметра та блока перетворення опору на напругу постійного струму [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інваріантність до значення вимірювального струму забезпечується або у разі використання як опорної для ЦАП спаду напруги на зразковому резисторі [4, 5], або при використанні джерела напруги одночасно і для формування значення вимірювального струму, і для створення значення опорної для АЦП напруги [5, 6]. Точні сучасні цифрові омметри ґрунтуються на перетворенні електричного опору на активну величину – як правило, напругу постійного струму – з подальшим її вимірюванням за допомогою цифрового вольтметра [1, 3, 4, 6, 7]. Така структура вимірювачів

опору приваблює розробників простотою розширення функціональних можливостей базової структури приладу – вольтметра постійного струму шляхом використання перетворювача опір-напруга на основі неінвертувального або інвертувального підсилювачів та джерела вимірювального струму [3, 6]. Для досягнення максимально можливої точності використовується прецизійна та стабільна елементна база, що істотно збільшує вартість таких омметрів. У прецизійних цифрових термометрах необхідно забезпечити: мінімальні значення напруги зміщення та вхідних струмів; мінімальні значення температурних коефіцієнтів напруги зміщення та вхідних струмів; мінімальні значення шумових напруг і струмів; малу чутливість до перевантажень по входу; невелику складність вимірювального кола; лінійність багаторозрядних АЦП; мінімальні значення залишкових параметрів комутаційних елементів [6].

Формулювання цілей статті. Метою цієї статті є розроблення пропозицій до побудови прецизійних резистивних термометрів, що можуть працювати з ТО з три- або чотирьохпроводними лініями зв'язку. У цифрових термометрах промислового використання повинна бути передбачена можливість оперативного контролю проходження технологічного процесу.



Структура цифрового термометра з автоматичною корекцією похибок: ПОН – перетворювач опір-напруга; ЦТ – цифровий термометр; ПД – подільник напруги; ККМО – кодокерована міра опору; SW – електронний перемикач; ПВ – повторювач напруги; СМ – суматор; S₁ – перемикач виду лінії зв'язку

Основний матеріал. Для зменшення впливу контактних ЕРС та АСП доцільно використовувати метод модуляції вимірювального струму [2, 4, 8]. Тією чи іншою мірою сформульований вище комплекс вимог можна забезпечити при використанні тестових методів вимірювання електричного опору ТО. У такому разі структура цифрового термометра також складається з перетворювача опір-напряга та базового цифрового вольтметра (див. рисунок). Еквівалентна АСП такого термометра, зумовлена контактними ЕРС ліній зв'язку, напругами зміщення і вхідними струмами ОП перетворювача опір-напряга та вольтметра корегується методом модуляції вимірювального струму, а інваріантність до його значення забезпечується використанням одного джерела опорної напруги для АЦП ЦТ та генератора вимірювального струму [9]. Код результату вимірювання електричного опору ТО знаходять як різницю результатів перетворень у двох циклах вихідної напруги перетворювача опору на напругу ПОН при двох значеннях вимірювального струму. Вимірюваний опір ТО може під'єднуватися до термометра чотири- або трипровідною лінією зв'язку. Інформація про тип лінії зв'язку задається двополосним перемикачем S11, S12, залишкові параметри якого не впливатимуть на результат перетворення: опори ключів перемикача S1 вмикаються послідовно з високоомними входами блоків повторювача напруги ПВ та суматора СМ, а вплив залишкових напруг усувається використанням тестового методу вимірювання опору. Одна пара струмових та потенціальних дротів С2, П2 як для три-, так і для чотирипровідної лінії зв'язку під'єднана до входу перетворювача струм – напруга DA2. У першому циклі перетворення отримують код N_1

$$N_1 = \frac{U_{в1} + \Delta_{ЦВ}}{E_0 + \Delta_{АЦП}} K_A, \quad (1)$$

де $U_{в1}$ – вихідна напруга перетворювача ПОН у першому циклі перетворення; E_0 – значення опорної напруги; $\Delta_{ЦВ}$ – еквівалентна АСП ЦВ, зведена до його входу; $\Delta_{АЦП}$ – еквівалентна АСП АЦП цифрового вольтметра, зведена до входу опорної напруги; K_A – коефіцієнт перетворення аналогової величини на код у цифровому вольтметрі;

а у другому – код N_2

$$N_2 = \frac{U_{в2} + \Delta_{ЦВ}}{E_0 + \Delta_{АЦП}} K_A, \quad (2)$$

де $U_{в2}$ – вихідна напруга перетворювача ПОН у другому циклі перетворення.

Код N_X результату вимірювання електричного опору знаходять як різницю кодів, отриманих у двох циклах перетворення

$$N_X = N_1 - N_2 = \frac{U_{в1} - U_{в2}}{E_0 + \Delta_{АЦП}} K_A, \quad (3)$$

Значення вихідної напруги $U_{см}$ тривходового суматора СМ (вихідної напруги перетворювача ПОН) визначається як

$$U_{см} = (k_1 U_1 + k_2 U_2 + k_3 U_3) + e_{см}, \quad (4)$$

де U_1, U_2, U_3 – вхідні напруги суматора СМ по всіх його трьох входах; k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти передачі суматора відповідно для кожного із трьох його входів.

Значення вимірювальних струмів I_1, I_2 задаються від джерела напруги, яка використовується як опорна для АЦП, і знаходять їх за співвідношеннями

$$I_1 = (m_1 E_0 + e_1) / R_N, \quad (5)$$

$$I_2 = (m_2 E_0 + e_1) / R_N, \quad (6)$$

де m_1, m_2 – коефіцієнти передачі подільника ПД перетворювача ПОН відповідно в першому та другому циклах перетворення; R_N – опір струмозадавального резистора; e_1 – еквівалентна АСП перетворювача напруга-струм DA1.

Для чотирипровідної лінії зв'язку значення вхідних напруг суматора СМ визначається за співвідношеннями

$$U_{114} = I_1 R_X + e_2 + e_1, U_{124} = I_2 R_X + e_2 + e_L, \quad (7)$$

$$U_{214} = U_{224} = 0, \quad (8)$$

$$U_{314} = m_1 E_0 + e_1, U_{324} = m_2 E_0 + e_1, \quad (9)$$

де $U_{114}, U_{214}, U_{314}$ – вхідні напруги суматора СМ при струмі I_1 ; $U_{124}, U_{224}, U_{324}$ – вхідні напруги суматора СМ при струмі I_2 ; e_2 – еквівалентна АСП перетворювача струм-напруга DA2; e_L – контактні ЕРС в лініях зв'язку;

а для трипровідної лінії зв'язку –

$$U_{113} = -I_1 (R_{C1} + R_X) + e_2 + e_L, \quad (10)$$

$$U_{123} = -I_2 (R_{C1} + R_X) + e_2 + e_L,$$

$$U_{213} = -I_1 R_{C2} + e_2, \quad (11)$$

$$U_{223} = I_2 R_{C2} + e_2,$$

$$U_{313} = U_{314} = m_1 E_0 + e_1, \quad (12)$$

$$U_{323} = U_{324} = m_2 E_0 + e_1$$

де $U_{113}, U_{213}, U_{313}$ – вхідні напруги суматора СМ при струмі I_1 ; $U_{123}, U_{223}, U_{323}$ – вхідні напруги суматора СМ при струмі I_2 ; R_{C1}, R_{C2} – відповідно опори першого та другого струмового дротів лінії зв'язку.

Із співвідношень (4)–(12) визначимо код N_{4X} результату вимірювання опору R_X для чотирипровідної лінії зв'язку

$$N_{4X} = N_{14} - N_{24} = \frac{K_A(m_1 - m_2)}{1 + \Delta_{\text{АЦП}}/E_0} \left(\frac{R_X}{R_N} - \frac{K_3}{K_1} \right), \quad (13)$$

та код N_{3X} результату вимірювання опору R_X для трипровідної лінії зв'язку

$$N_{3X} = N_{13} - N_{23} = \frac{K_A(m_1 - m_2)K_1}{1 + \Delta_{\text{АЦП}}/E_0} \left[\frac{R_X}{R_N} + \left(R_{C1} - R_{C2} \frac{K_2}{K_1} \right) - \frac{K_3}{K_1} \right], \quad (14)$$

Співвідношення (13) та (14) подані у загальному випадку вимірювання електричного опору (якщо $K_3=0$) або ж відхилення опору R_X від певного початкового значення $R_{0X} = R_N K_3/K_1$, що особливо важливо для ряду резистивних сенсорів неелектричних величин [1]. У разі використання трипровідної лінії зв'язку трудомістка операція підгонки різниці опорів $R_{C1} - R_{C2}$ струмових дротів може бути замінена значно простішою і зручнішою у практичному використанні операцією підстроювання коефіцієнта K_2 до моменту виконання рівності $R_{C1} - R_{C2} K_2/K_1 = 0$; вимірюваний опір замінюється мірою і на цифровому табло омметра встановлюють показ, що дорівнює опору міри.

В інтелектуальних цифрових термометрах взагалі можна уникнути операцій підстроювання, а тільки необхідно увести значення опору міри R_M і визначити поправку ΔN_L

$$\Delta N_L = -(N_{3X} - N_M) = -\frac{K_A(m_1 - m_2)K_1}{1 + \Delta_{\text{АЦП}}/E_0} \times \left[\frac{R_X}{R_N} \left(R_{C1} - R_{C2} \frac{K_2}{K_1} \right) - \frac{K_3}{K_1} \right], \quad (15)$$

де N_M – код, що відповідає опору R_M міри.

Однак відзначимо, що у разі як підстроювання, так і уведення поправки на значення різниці опорів струмових дротів точно скорегувати значення цієї різниці для лінійної функції перетворення термометра можна тільки за певних умов довкілля та у певний момент часу. За рахунок часових змін і змін, зумовлених мінливістю робочих умов експлуатації параметрів як ліній зв'язку, так і термометра виникатиме похибка вимірювання опору T_O , значення якої залежить від різниці опорів струмових дротів трипровідної лінії зв'язку і змінюється випадково.

Уникнути цього недоліку можна, використовуючи в струмовому дроті імітатор електричного опору (ІО) [10]. Значення опору масштабувального резистора ІО необхідно вибрати не меншим від максимального значення різниці опорів з'єднувальних ліній та виготовити його з мідного дроту, що повинно істотно зменшити температурну зміну різниці опорів ліній зв'язку. АСП ІО коригуватиметься під час модуляції вимірювального струму. В ІО легко передбачити режим відтворення і так званого "від'ємного" опору, для якого спад напруги збігається з напрямом струму. Це дає можливість використати лише один ІО у випадку різнополярних значень різниць опорів обидвох струмових ліній зв'язку. Режимом роботи ІО керуватиме блок управління інтелектуального ЦТ.

В частковому випадку коефіцієнт передачі подільника опорної напруги m_2 може дорівнювати нулю. Тоді для вимірювання малих значень опору $T_O R_X$ необхідний двополярний ЦАП і потрібно буде запам'ятовувати двополярні коди, значення яких залежатиме практично тільки від еквівалентних АСП перетворювача ПОН та ЦТ. У такому разі доцільно змістити "плаваючу" нульову точку шкали омметра з метою отримання однополярної вихідної напруги ПОН у будь-яких робочих умовах експлуатації. Найпростіше це реалізується подаванням на четвертий вхід суматора СМ опорної напруги E_0 так, щоб виконувалась умова

$$K_4 E_0 > K_1 (|e_{2m}| + |e_{1m}|) + (K_1 + K_2) |e_{2m}| + |e_{Cm}|, \quad (16)$$

де K_4 – коефіцієнт передачі СМ для його четвертого входу; (нижнім індексом "m" позначено максимальні значення відповідних величин).

Для здійснення оперативного контролю проходження технологічного процесу пропонується доповнити структуру цифрових резистивних термометрів промислового використання кодокерованими мірами електричного опору ККМО [11, 12]. У такому разі ЦТ працюватиме за диференційним методом вимірювання, суть якого полягає у створенні та вимірюванні різниці між вимірюваною величиною та вихідною величиною міри, і, як показано в [13, 14], метрологічні властивості засобу вимірювань практично визначатимуться тільки параметрами ККМО. Похибка вимірювання опору T_O цифровим диференційним термометром визначатиметься лише похибками подільників опорної напруги для вимірювального та диференційного каналів перетворення, струмозадавального резистора та кодокерovanого подільника ККМО. Відомо, що відно-

шення опорів можна реалізовувати з похибкою, набагато меншою від похибок опорів резисторів, з яких цей подільник складається, особливо, коли коефіцієнти поділу є порівняно невеликими, а всі його резистори майже в однакових умовах (конструктивно це нескладно забезпечити як для дискретних, так і для плівкових резисторів). Як кодокерований подільник в розглянутій структурі термометра можна використовувати принципово будь-які подільники напруги, наприклад, інтегральні ЦАП, подільники із широтно-імпульсною модуляцією, на основі магнітних компараторів постійного струму тощо. За цих умов результуюча похибка вимірювання опору ТО може визначатися тільки похибкою струмозадавального резистора. Наявність лише одного струмозадавального та одного масштабувального в ККМО прецизійних резисторів, невеликі габарити кодокерovanого подільника напруги (інтегрального ЦАП) дають можливість їхньої конструктивної реалізації як малогабаритного вставного блока в ЦТ. Для забезпечення високої часової стабільності термометра або під час отримання маловірогідних результатів вимірювання температури необхідно виконувати частішу метрологічну перевірку такого вставного блока.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз співвідношень (13) та (14) дає змогу зробити висновок, що в цифрових термометрах з корекцією АСП похибка вимірювання електричного опору ТО, окрім МСП базового цифрового вольтметра, визначатиметься також мультиплікативними складовими похибки коефіцієнта передачі перетворювача опір-напруга. Отже, можна зробити висновок, що навіть за умови корекції АСП практично важко оперативно контролювати вимірювання електричного опору ТО. Використання в одному із струмових дротів активного імітатора електричного опору різниці опорів ліній зв'язку дасть можливість в цифрових термометрах для роботи з трипровідними ТО досягти практично однакових результатів з прецизійними чотирипровідними.

Запропонована структура цифрового термометра, результат перетворення в якому інваріантний до значення вимірювального струму, адитивних складових тракту перетворення та параметрів АЦП в широкому діапазоні вимірювання. Розроблені структура та алгоритм роботи можуть слугувати основою для побудови інтелектуальних цифрових термометрів системного призначення, які забезпечують високі метрологічні характеристики при малих масогабаритних

показниках засобів вимірювань та в широкому діапазоні зміни дестабілізуючих факторів на місці експлуатації.

1. *Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Полищук Є.С., Дорожжовець М.М., Яцук В.О. та ін.; За ред. проф. Є.С.Полищука. – Львів: Вид-во “Бескид Біт”, 2003. – 544 с.* 2. *Общепромышленные цифровые приборы для измерения температуры А566. Шморгун Е.И., Огирко Р.Н., Яцук В.А. и др // Приборы и системы управления. – 1987. – №10. – С. 27–30.* 3. *Low Level Measurements (Electrometer Measurements). – 3–rd rev. ed. – Keithley Instruments Inc, Cleveland, USA. – 127 p.* 4. *Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. – 5–е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1986. – 504 с.* 5. *Устройство для измерения сопротивления: А.с. 938198 СССР, МКИ G01R27/02. / С.Г. Булыга, Е.И. Шморгун, В.А. Яцук и др. (СССР). – №2984025/18–21; Заявлено 25.09.80; Опубл. 23.06.82, Бюл. №23. – 6 с.* 6. *Огирко Р.Н., Шморгун Е.И. Аналого-цифровые преобразователи сопротивления терморезистивных датчиков // Контрольно-измерительная техника. – 1988. – Вып.44. – С. 41–49.* 7. *Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / Гаврилюк М.А., Полищук Е.С., Обозовский С.С. и др. – К.: Вища школа, 1984. – 359 с.* 8. *Огирко Р.М. Цифровые термометры с терморезистивными перетворювачами: Автореф. дис. к.т.н.: 05.11.05 / Львів. політехн. ін-т. – Львів, 1990. – 17 с.* 9. *Цифровой измеритель температуры: А.с. 1303849 СССР, МКИ G01K7/22. / В.Б. Здеб, Р.Н. Огирко, В.А. Яцук и др. (СССР). – №4645575/24–10; Заявлено 03.02.89; Опубл. 23.03.91, Бюл. №12. – 4 с.* 10. *Яцук В. Принципи побудови кодокерovaných мір опору // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1999. – №55. – С. 35–43.* 11. *Лилак В.І., Бойко О.В., Яцук В.О. Переносні багатозначні калібратори для перевірки температурних каналів технічних систем на місці експлуатації // Вісник Харківського держ. політехн. ун-ту; “Системний аналіз, керування та інформаційні технології”. – 1999. – Вып. 71. – С. 94–96.* 12. *Яцук В. Підвищення метрологічної надійності засобів вимірювань у робочих умовах експлуатації // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – №60. – С. 98–102.* 13. *Яцук В. Компенсаційний метод побудови цифрових омметрів // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2001. – №420. – С 99–102.* 14. *Яцук В.О. Диференціальний метод вимірювання електричного опору // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2001. – №58. – С. 32–37.*