

Принципова електрична схема такого пристрою може бути такою, як зображено на рис. 14.

Струм через діод доцільно вибрати в межах від 0,1 мА до 1 мА. Опір R1 має бути температурно-незалежним (щоб від його зміни не змінювався струм через діод). Резистори R2 – R7 можуть бути температурозалежними, проте їхні ТКО повинні бути однаковими. Резистором R4 виставляються $U_{вих} = 0$ при температурі 0°C. Резистором R7 можна підрегулювати чутливість схеми до температури.

Реалізація такої схеми має кращу лінійність, ніж незрівноважена мостова схема з мідним термоперетворювачем опору.

Значний розкид параметрів діодів істотно ускладнює оцінювання похибок.

1. Поліщук Є.С., Дорожжовець М.М., Яцюк В.О., Ванько В.М. Бойко Т.Г. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник для студентів електротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Львів.: Бескид Біт, 2003. – 544 с. 2. Поліщук Є.С. Измерительные преобразователи. – К.: Вища школа, 1981. – 296 с. 3. Поліщук Є.С. Електричні вимірювання електричних та неелектричних величин. – К.: Вища школа, 1979. – 352 с. 4. Петраков О.М., Создание аналогових PSPICE – моделей радиоэлементов. – М.: Радио Софт, 2004. – 208 с. 5. Электроника: Энциклопедический словарь / В.Г. Колесников. – М.: Сов. энциклопедия, 1991. – 688 с. 6. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. / Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. — М.: Мир, 1992. — 592 с.

УДК 536.532

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З КОРЕКЦІЄЮ ПОХИБКИ НЕОДНОРІДНОСТІ

© Кочан Орест, 2008

НДІ Інтелектуальних комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету
orest_k@bigmir.net

Запропоновано та обґрунтовано конструкцію нового термоелектричного перетворювача, який забезпечує відсутність впливу набутої під час експлуатації термоелектричної неоднорідності термопар, що входять до його складу, на результат вимірювання температури (відсутність впливу похибки неоднорідності).

Синтезовано систему вимірювання температури, яка взаємодіє з таким термоелектричним перетворювачем і оцінено сумарну похибку вимірювання температури за її допомогою.

Предложено и обосновано конструкцию нового термоэлектрического преобразователя, обеспечивающего отсутствие влияния приобретенной в ходе эксплуатации термоэлектрической неоднородности термопар, входящих в его состав, на результат измерения температуры (отсутствие влияния погрешности неоднородности). Синтезировано систему измерения температуры, взаимодействующую с таким термоэлектрическим преобразователем и произведена оценка суммарной погрешности измерения температуры с ее помощью.

It is proposed and substantiated the construction of new thermocouple in this paper. This thermocouple provides absence of influence of acquired during exploitation thermoelectric heterogeneity of thermoelectrodes on temperature measurement results (absence of heterogeneity error). Also there is synthesized temperature measurement system based on proposed thermocouple and evaluated error of temperature measurement results using this system.

Вступ. Для вимірювання температури у діапазоні 500...1500°C в промисловості, наукових дослідженнях та інших галузях, широко використовують термоелектричні перетворювачі на базі термопар. Сучасне технологічне обладнання потребує високої точності, тому точність вторинних приладів і систем вимірю-

вання температури невпинно росте [1, 2]. Однак сумарна похибка вимірювання температури практично не зменшується через те, що у вимірювальному каналі похибка первинних перетворювачів – термопар – вона домінує [3, 4]. А їхня точність за останні десятиріччя практично не зростає [5]. Це пов'язано з порівняно

великим початковим розкидом характеристик перетворення (ХП) термопар [5] та значним дрейфом цих ХП, пов'язаним з деградаційними процесами в електродах термопари під дією високих температур і часу експлуатації [6, 7]. Тому досягнення високої точності вимірювання температури вимагає розроблення відповідних методів корекції похибок термопар.

Для корекції початкових індивідуальних відхилень ХП термопар від номінальної можна використати результати їхньої перевірки в лабораторних умовах, на основі яких будують математичну модель дрейфу [8, 9]. Однак швидкість згаданих деградаційних процесів залежить від температури, за якої експлуатуються окремі ділянки електродів термопари, що призводить також до наростання набутої неоднорідності цих електродів. Це викликає зміну вихідної термо-ЕРС термопар, що довго експлуатувалися, від зміни профілю температурного поля вздовж їхніх електродів навіть за незмінних температур робочого і вільних кінців термопари, що ставить під сумнів можливість корекції похибки дрейфу термопар [10]. Тому значна увага приділялася розробленню методів визначення похибки термопар на місці експлуатації (тоді профіль температурного поля перевірки не відрізняється від профілю поля експлуатації). Запропоновано перевірку термопар на місці експлуатації [6] та калібрування за допомогою температурного калібратора [11, 12], а також комбінації згаданих методів з побудовою індивідуальної матмоделі дрейфу [3, 13]. Але ці методи вимагають стабільності профілю температурного поля у ході експлуатації – зміна температурного поля об'єкта вимірювання викликає зміну профілю температурного поля вздовж електродів термопари і заходи з підвищення точності необхідно повторювати.

Інший підхід передбачає корекцію похибки неоднорідності перерахунком похибки ХП термопари, визначеної для однієї форми профілю температурного поля вздовж термоелектродів (наприклад, поля перевірки), в похибку, що відповідає іншому профілю температурного поля (наприклад, поле експлуатації) [14, 15] за допомогою: (i) віртуального розділення електродів термопари на ділянки, де неоднорідністю можна нехтувати; (ii) введення в термоелектричний перетворювач додаткових термопар контролю форми профілю температурного поля; (iii) корекції похибки дрейфу ХП кожної ділянки окремо. Однак для такого перерахунку необхідні достатньо точні та достовірні матмоделі дрейфу, порівнянні із змінами похибки неоднорідності, одержаними в результаті експериментальних досліджень. Отримати достатньо точні та

повні дані таких експериментальних досліджень важко у зв'язку з:

1. складністю експериментальних досліджень неоднорідності термоелектродів, яка вимагає витримки досліджуваних наборів термоелектродів за заданих температур, а потім визначення їхніх похибок від зміни профілю температурного поля;

2. великим розкидом результатів експериментальних досліджень, який, крім індивідуальних особливостей деградації термоелектродів, містить випадкові похибки від встановлення заданих профілів температурних полів при дослідженні проявів похибки неоднорідності.

Це призводить до необхідності уточнення параметрів матмоделі корекції похибки неоднорідності за результатами перевірки термоелектричних перетворювачів у лабораторних умовах [14], або, краще, на місці експлуатації [15]. Ці методи передбачають корекцію похибки окремих ділянок термопар, умовно вибраних під час побудови матмоделі дрейфу. Однак результатом перевірки термопари є значення сумарної похибки всіх ділянок, тому виникає завдання адекватного розподілу між вибраними ділянками термопар відхилення похибки, обчисленої за допомогою матмоделі, від визначеної під час перевірки для корекції матмоделей дрейфу цих ділянок. Теоретично обґрунтовані критерії такого розподілу відсутні, а використання для їхньої побудови результатів експериментальних досліджень [15, 16], відповідно до згаданих в пп. 1 і 2 причин, не дають надійної бази для корекції матмоделей похибок через те, що похибки розподілу можуть спотворити матмоделі корекції похибки окремих ділянок і не покращити, а погіршити точність корекції. Крім того, сформовані за результатами експериментальних досліджень критерії розподілу мають істотні недоліки: (i) відповідають тільки умовам цього експерименту (інакше виникає методична похибка через невідповідність умов досліджень і експлуатації); (ii) мають порівняно велику дисперсію. Тому ці методи корекції похибки неоднорідності є трудомісткими і ненадійними.

Отже, похибка неоднорідності залишається однією з найнебезпечніших і малодосліджених похибок поширених давачів температури. Отже, метою цієї роботи є розроблення термоелектричного перетворювача, який дасть змогу різко зменшити вплив на результат вимірювання температури за допомогою термопари, що входить до його складу, похибки від набутої у ході експлуатації неоднорідності її електродів, а також оцінка похибки вимірювання

температури з допомогою такого термоелектричного перетворювача.

Принцип побудови термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. Якщо розділити кожен термоелектрод термопари на ділянки $i = \overline{1, n}$, електрорушійну силу (ЕРС) E_k для k -ї ділянки можна записати як

$$E_k = (e_N + \Delta e_k) \times (t_{k+1} - t_k), \quad (1)$$

де $e_N, \Delta e_k$ – номінальне значення питомої ЕРС (термоелектрична здатність) для цього термоелектрода (матеріалу) та індивідуальне її відхилення для k -ї ділянки відповідно; t_{k+1}, t_k – температури на межах k -ї ділянки термоелектрода.

Спрямуємо різницю $t_{k+1} - t_k$ до нуля і, перетворюючи (1), визначимо сумарну ЕРС E_Σ одного термоелектрода:

$$\begin{aligned} E_\Sigma &= \int_0^{t_{rk}} (e_N + \Delta e_k) dt = \\ &= \int_0^{t_{rk}} e_N dt + \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt = E_{\Sigma N} + \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt, \end{aligned} \quad (2)$$

де $E_{\Sigma N}$ – номінальне значення ЕРС, яке генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур $t_{rk} - t_0$. Інтеграл в останньому виразі визначає сумарну похибку термоелектрода ΔE_Σ .

Для переходу до інтегрування по довжині термоелектродів позначимо градієнт температурного поля вздовж термоелектродів

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial l}. \quad (3)$$

Під час експлуатації, під дією високих температур, змінюється хімічний склад термоелектродів (окиснення, міграція) та їхній кристалічний стан, причому інтенсивність змін сильно залежить від температури, за якої ця ділянка перебувала під час експлуатації [17, 18]. В результаті Δe_k окремих ділянок кожного термоелектрода стає неоднаковою, тобто сумарна ЕРС стає залежною від профілю температурного поля вздовж термоелектродів. На підставі (2), з урахуванням (3), можна знайти сумарну похибку ΔE_Σ термоелектрода в температурному полі експлуатації

$$\begin{aligned} \Delta E_\Sigma &= \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt = \int_0^l \Delta e(t_e, t) \frac{\partial t}{\partial l} dl = \\ &= \Delta e(t_e, t) \int_0^l \frac{\partial t}{\partial l} dl = \Delta e(t_e, t) \int_0^l \nabla t dl \end{aligned} \quad (4)$$

де $\Delta e(t_e, t)$ – відхилення питомої ЕРС як функція температури та часу експлуатації для кожної ділянки термоелектрода.

З (4) видно, що, якщо Δe_k не прямує до нуля, тобто за наявності дрейфу ХП термопари, при зміні ∇t змінюється сумарна похибка термоелектрода ΔE_Σ незалежно від того, що температура робочого та вільних кінців залишається незмінною. Отже, профіль температурного поля вздовж термоелектродів стає додатковою впливною величиною. Це означає, що коригуюча поправка $r = -\Delta E_\Sigma$, знайдена в температурному полі печі, де виконувалася перевірка (для градієнта ∇tp), не обов'язково відповідає похибці термоелектричного перетворювача в температурному полі об'єкта експлуатації (для градієнта ∇te). Тому висновок [7] про те, що явище термоелектричної неоднорідності термопар, які вже експлуатувалися, істотно обмежує можливість корекції похибок термопар за допомогою їхньої перевірки, є виправданим.

Відомі методи корекції похибки неоднорідних термопар полягають у використанні таких особливостей рівності (4):

1. Перевірка термоелектричного перетворювача у спеціальній перевірній печі, яка відтворює профіль температурного поля експлуатації [14], передбачає $\nabla tp \approx \nabla te$. Такий спосіб дає змогу зменшити вплив неоднорідності, тільки коли профіль температурного поля експлуатації відомий і незмінний (стабільний), тобто має обмежене застосування.

2. Перевірка термоелектричного перетворювача здійснюється безпосередньо на місці експлуатації за допомогою спеціального температурного калібратора [3, 11, 12]. Такий спосіб теж передбачає $\nabla tp \approx \nabla te$. Він дає змогу зменшити вплив неоднорідності при змінах профілю температурного поля у ході експлуатації, однак вимагає стеження за цими змінами і операції калібрування після виникнення кожної істотної зміни (і додаткового дослідження того, які зміни є в кожному окремому випадку істотними). Крім того, температурні калібратори поки що не випускаються.

3. Перевірка термоелектричного перетворювача здійснюється безпосередньо на місці експлуатації за допомогою взірцевої термопари, яка вставляється в спеціально передбачений канал чохла [6]. Такий спосіб, по суті, еквівалентний попередньому і має всі його недоліки, його перевага тільки в тому, що, на відміну від температурних калібраторів, взірцеві термопари випускаються.

4. Перевірка термоелектричного перетворювача здійснюється в температурному полі, яке не відтворює профіль температурного поля експлуатації, тобто $\nabla tp \neq \nabla te$. Однак отримане значення поправки $r = -\Delta E_{\Sigma}$ перераховується в температурне поле експлуатації [14, 15]. Такий спосіб дає змогу зменшити вплив неоднорідності у разі змін профілю температурного поля експлуатації. Але він вимагає додаткових досліджень для виявлення критеріїв розподілу сумарної похибки термопар спочатку між двома термоелектродами, а потім – між всіма ділянками кожного термоелектрода [16]. Такі критерії, імовірно, залежать від матеріалу термоелектродів і забруднень, характерних для цього місця експлуатації, а також часу експлуатації термоелектричного перетворювача. У разі невідповідності прийнятих критеріїв дійсним виникає методична похибка корекції, яку дуже важко оцінити через необхідність великої кількості додаткових експериментів власне для цих умов експлуатації. Тому такий спосіб корекції похибок неоднорідності, незважаючи на ускладнення конструкції термоелектричного перетворювача (використання додаткових давачів температури для визначення ∇tp і ∇te), є доволі трудомістким і, загалом, не є надійним.

Існує ще один шлях підвищення точності вимірювання в умовах дії впливних величин – стабілізація дії цих впливних величин з подальшим використанням традиційних методів корекції похибок [19]. У застосуванні до термоелектричних перетворювачів це означає стабілізацію профілю температурного поля вздовж електродів термопар як при перевірці, так і при експлуатації. Тобто, крім градієнтів ∇tp і ∇te , які характеризують профілі температурних полів перевірки та експлуатації відповідно, вводиться третій градієнт ∇t_{TE} , який характеризує профіль температурного поля вздовж термоелектродів термопари. Градієнт ∇t_{TE} роблять сталим, незалежним від градієнтів ∇tp і ∇te . Тоді зміна градієнтів ∇tp і ∇te не буде впливати на розподіл температури вздовж термоелектродів термопари і похибка неоднорідності проявити себе не зможе. Це означає, що під час експлуатації (безпосередньо після перевірки) можна без додаткової похибки використати значення похибок, отриманих при перевірці. Надалі можна використовувати відомі методи корекції похибок термопар [13], через те, що залежність похибки кожного термоелектрода ΔE_{Σ} від зміни профілю температурного поля, зовнішнього щодо термоелектричного перетворювача, не буде себе проявляти.

Відповідно до сказаного пропонується новий принцип побудови термоелектричного перетворювача, який можна назвати термоелектричним перетворювачем з керованим (стабілізованим) профілем температурного поля вздовж власних термоелектродів. Згідно з цим принципом термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля (рис. 1) складається з головної термопари 1 і декількох додаткових підсистем регулювання температури [20]. Кожна з цих підсистем складається із додаткової термопари (позиції 2...4), пристрою керування 5 (на рис. 1 поданого одним багатоканальним блоком) і нагрівача (позиції 6...8). Додаткові термопари 2...4 та відповідні їм нагрівачі 6...8 (які охоплюють термопари 1...4) зміщені відносно головної термопари 1 по її осі. Така конструкція забезпечує можливість цілеспрямованого керування профілем температурного поля вздовж термоелектродів головної термопари 1, тобто можливість стабілізації заданого профілю температурного поля її термоелектродів (наприклад, графік А рис. 1), як при перевірці (наприклад, графік В), так і при експлуатації (наприклад, графік С). У такому разі профілі температурних полів як перевірної печі (В), так і об'єкта, де експлуатується термоелектричний перетворювач (С), не впливають на профіль температурного поля вздовж термоелектродів головної термопари (А), тому похибка від неоднорідності її термоелектродів, згідно з (4), проявити себе не може.

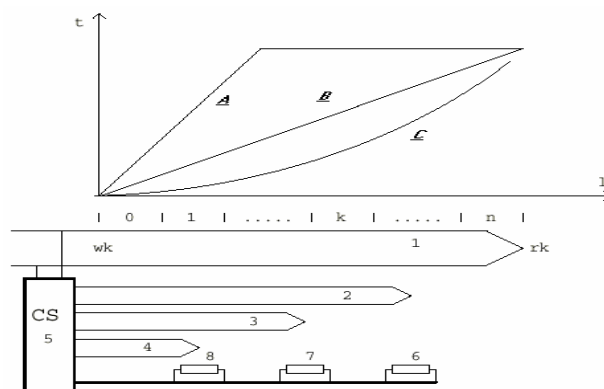


Рис. 1. Принцип побудови термоелектричного перетворювача з керованим (стабілізованим) профілем температурного поля

Конструктивна схема пропонуваного термоелектричного перетворювача. На рис. 2 наведена конструктивна схема пропонуваного термоелектричного перетворювача. Основою для неї є традиційний термоелектричний перетворювач, який складається з термоелектродів 1 і 2, ізольованих керамічними

втулками (бусами) 3 і захисного чохла 4. Для керування полем на деякій віддалі від робочого кінця головної термопари розміщено робочі кінці додаткових термопар 5 і відповідних їм нагрівачів 6, ізольованих від чохла керамічними втулками 7. Нагрівачі 6 розміщені поверх основного чохла 4 і захищені додатковим чохлом 8. Для забезпечення керування профілем температурного поля додаткові термопари і відповідні їм нагрівачі повинні бути розміщені вздовж головної термопари так, щоби повністю контролювати розподіл температури вздовж її термоелектродів, однак не впливати на температуру робочого кінця.

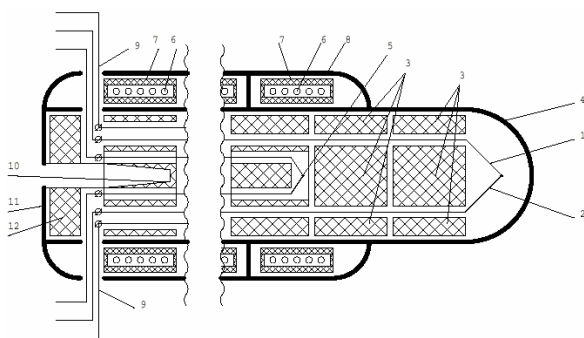


Рис. 2. Конструктивна схема пропонованого термоелектричного перетворювача

У зоні вільних кінців термоелектричного перетворювача (див. ліву сторону рис. 2) розміщено клему під'єднання проводів 9 підімкнення головної та додаткових термопар до вимірювальної системи і підсистем регулювання температури. Там само, наприклад, у заглибленні 10 може бути розміщений давач температури вільних кінців, що дасть змогу уникнути використання подовжувальних (компенсаційних) проводів. Тоді, для уникнення похибки від різниці температур власне вільних кінців та її давача, яка може виникнути під дією зовнішніх теплових потоків, необхідно забезпечити захист від цих потоків, наприклад, за допомогою теплоізоляційної прокладки 12 і кришки 11.

У пропонованій конструкції термоелектричного перетворювача виникає методична похибка від впливу теплового потоку крайнього правого нагрівача (див. рис. 2) на температуру робочого кінця головної термопари, яка власне і слугує для вимірювання температури об'єкта. Однак ця методична похибка може бути зведена до значень, якими можна знехтувати. Для цього крайній правий нагрівач (а, можливо, і кілька наступних нагрівачів) повинні підтримувати температуру зон такою, що дорівнює

температурі робочого кінця. Тоді різниця температур між робочим кінцем головної термопари і цими нагрівачами є малою, а, отже, і тепловий потік від зони нагрівача до робочого кінця буде малим. Отже, він не буде спотворювати результат вимірювання температури.

Наявність в складі пропонованого термоелектричного перетворювача додаткових підсистем регулювання температури дає термоелектричному перетворювачу змогу створити свій, незалежний від профілів температурних полів перевірки та експлуатації, профіль температурного поля вздовж термоелектродів головної термопари і постійно витримувати його. Це дає змогу термопарі з неоднорідними термоелектродами:

1. Користуватися поправками, знайденими під час перевірки, без додаткових методичних похибок, тобто досягти інваріантності до профілів температурних полів перевірки та експлуатації.
2. Користуватися відомими методами прогнозу і корекції дрейфу [3, 13] без обмежень, які накладає наявність похибки неоднорідності.

Треба відзначити, що пропоноване технічне рішення, крім значно складнішої структури термоелектричного перетворювача, вимагає також відповідної вимірювально-керуючої системи для забезпечення працездатності. Розглянемо структурну схему такої системи.

Структура системи вимірювання температури за допомогою пропонованого термоелектричного перетворювача. Для вимірювання температури за допомогою пропонованого термоелектричного перетворювача необхідно використати багатоканальну вимірювально-керуючу систему, основними вимогами до якої є:

1. Достатня кількість каналів для встановлення нуля, калібрування, вимірювання термо-ЕРС всіх термопар (зокрема головну), а також сигналу первинного перетворювача температури вільних кінців.
2. Діапазон вимірювання напруги – від 0 до 50...60 мВ.
3. Чутливість – не гірше за 1 мкВ.
4. Достатньо висока точність, вимоги до якої можна визначити після аналізу похибок термоелектричного перетворювача з умови, що похибка вимірювання термо-ЕРС має бути в декілька разів меншою від похибки самого термоелектричного перетворювача (тобто такою, значенням якої можна практично знехтувати).
5. Достатня обчислювальна потужність для виконання таких підпрограм:

- корекції похибки зміщення і коефіцієнта перетворення каналів вимірювання термо-ЕРС;
- корекції впливу температури вільних кінців всіх термопар, що входять в термоелектричний перетворювач (вигідно у підсистемах регулювання температури використати термопари, однотипні з головною, але це не обов'язково);
- корекції похибки лінійності ХП усіх термопар, що входять в термоелектричний перетворювач;
- формування уставок регулювання додаткових підсистем регулювання температури для створення заданого профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари;
- регулювання температури окремих ділянок головної термопари згідно із сформованими уставками;
- корекції похибки початкового розкиду ХП головної термопари;
- корекції похибки дрейфу ХП головної термопари.

Структура розробленої системи вимірювання температури подана на рис. 3. Вона ґрунтується на модулі збирання даних з дистанційним перепрограмуванням, описаним в [21]. Основними її компонентами є:

1. Термоелектричний перетворювач, у який входять головна термопара TC0, додаткові термопари TC1...TCn і нагрівачі H1...Hn.
2. Комутатор на герконових реле з термовирівнювачами для усунення впливу паразитних термо-ЕРС [22].
3. Сенсор температури вільних кінців термопар – мідний термометр опору Rcj.
4. Аналого-цифровий перетворювач ADC типу AD7712 (сигма-дельта перетворення), що має велику розрядність (24 розряди), чутливість і завадостійкість [23].
5. Мікроконтролер MC типу AT89C52, обчислювальна потужність якого достатня для виконання у реальному часі перелічених раніше підпрограм.
6. Транзисторні ключі PS1...PSn і регістр RG типу 74HC574, який керується MC. Разом з відповідною підпрограмою вони створюють набір широтно-імпульсних модуляторів потужності нагрівачів H1...Hn.
7. Інтерфейсний адаптер IFA, що забезпечує оптичну розв'язку та обмін даними через інтерфейс RS-232C як у класичному варіанті, так і у модифікованому [24, 25], який уможливує роботу у двопровідній вимірювально-керуючій мережі дистрибутивних систем.

8. Джерело живлення PS, яке забезпечує гальванічну розв'язку і формує напругу +5V живлення елементів схеми, +24V живлення реле комутатора і нагрівачів, а також напруги ±10V живлення інтерфейсу. До складу PS входить теж стабілізатор зрізкової напруги Uref типу AD780 для калібрування ADC.

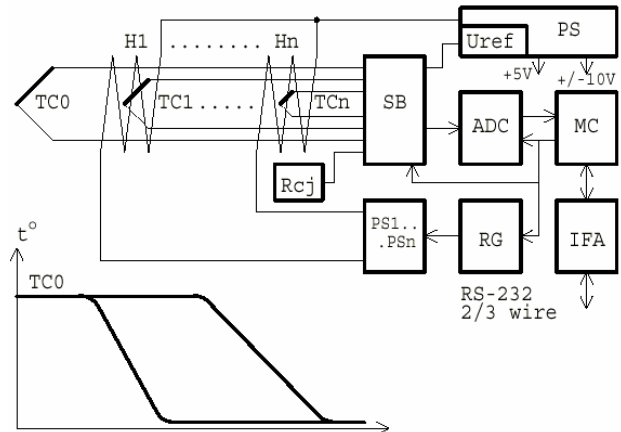


Рис. 3. Структура системи вимірювання температури за допомогою термопари з керованим профілем температурного поля

Пропонована структурна схема вимірювання температури за допомогою термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля дає змогу виконати всі вимоги, які були до неї поставлені. Вона має достатній ступінь конкретизації для того, щоби оцінити похибку вимірювання температури за допомогою пропонованого термоелектричного перетворювача.

Оцінка похибки вимірювання температури пропонованим термоелектричним перетворювачем. У похибку вимірювання температури за допомогою пропонованого термоелектричного перетворювача входять такі складові:

1. Похибка перевірки (або калібрування) термоелектричного перетворювача (фактично його головної термопари TC0).
2. Похибка корекції дрейфу головної термопари шляхом прогнозу зміни її ХП у проміжках між перевірками.
3. Похибка від нестабільності підтримуваного додатковими підсистемами регулювання температури профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари, яка задає залишкову похибку неоднорідності.
4. Методична похибка через тепловий потік від нагрівача H1 до робочого кінця головної термопари TC0.

5. Похибки вимірювання термо-ЕРС усіх термопар, які входять до складу ТЕП.

6. Похибки корекції впливу температури вільних кінців всіх термопар ТЕП і лінеаризації їхніх ХП.

Оцінимо значення перелічених складових похибки для системи з термопарами типу ХА.

Похибка перевірки Δ_P включає похибку платинової взірцевої термопари (не перевищує $0,4..0,7^\circ\text{C}$ в діапазоні тривалої експлуатації термопар ХА, [5]), похибку від нерівності температур робочих кінців взірцевого та робочого ТЕП (у разі використання термовирівнювача не перевищує $0,1^\circ\text{C}$) і похибку вимірювання її термо-ЕРС та визначення дійсного значення температури перевірки (включає, своєю чергою, похибки, перелічені у пп. 5 і 6). Задамо вплив похибок за пп. 5, 6 не більше ніж $0,4^\circ\text{C}$, тоді Δ_P не буде перевищувати $0,8^\circ\text{C}$.

Прогноз зміни (дрейфу) ХП головної термопари у проміжках між перевірками (калібруваннями) дає змогу значно зменшити частоту цих заходів за рахунок корекції цієї похибки. Для мінімізації похибки прогнозу Δ_{PR} доцільно використати метод інтеграції історичних даних з допомогою нейронних мереж [13, 26, 27]. Міжперевірний інтервал доцільно вибирати так (наприклад, згідно з [6, 7]), щоби Δ_{PR} не перевищувала похибки перевірки Δ_P .

Похибка Δ_{NS} від нестабільності підтримуваного з допомогою додаткових підсистем регулювання температури профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари залежить від:

1. Похибок Δ_{TCD} дрейфу додаткових термопар ТС1...ТСп за міжперевірний інтервал. Безпосередній вплив похибок ТС1...ТСп коригується під час перевірки головної термопари, а їхній дрейф не буде перевищувати Δ_{PR} .

2. Похибки регулювання відповідних додатковим термопарам ТС1...ТСп регуляторів Δ_C . При використанні звичайних ПІД-регуляторів ця похибка не перевищує 2°C .

3. Похибки Δ_E неідеальності екранування нагрівачами Н1...Нп впливу змін зовнішніх температурних полів, тобто залишковим впливом теплових потоків об'єкта вимірювання на профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари. Приблизна оцінка Δ_E згідно з [28] показує, що вона не буде перевищувати 5°C у разі зміні профілю температурного поля об'єкта на 100°C .

Звідси $\Delta_{NS} = \sqrt{\Delta_{TCD}^2 + \Delta_C^2 + \Delta_E^2} \approx 5,5^\circ\text{C}$. Згідно із [29] максимальну похибку неоднорідності можна визначити як зміну термо-ЕРС при зміні профілю температурного поля на вимірювану температуру T_X , і вона дорівнює максимальному дрейфу ХП термопари Δ_{DM} , який згідно із [29] становить 18°C . Звідси похибку Δ_{NH} неоднорідності, викликану нестабільністю Δ_{NS} , можна приблизно оцінити через відношення Δ_{NS} до T_X – $\Delta_{NH} = (\Delta_{DM} \times \Delta_{NS}) / T_X \approx 0,13^\circ\text{C}$. Отриманим значенням похибки неоднорідності Δ_{NH} можна знехтувати.

У запропонованому термоелектричному перетворювачі виникає методична похибка, викликана тепловим потоком від нагрівача Н1 до робочого кінця головної термопари ТС0. Згідно із [28] для мінімізації цієї методичної похибки необхідно, щоби:

– уставка регулювання додаткової підсистеми регулювання температури, яка відповідає термопарі ТС1 і нагрівачу Н1, повинна дорівнювати результату вимірювання головної термопарою ТС0;

– віддаль між робочим кінцем головної термопари ТС0 і нагрівачем Н1 повинна бути в 2...3 рази більшою від віддалі між нагрівачами і щонайменше в десять разів більша від діаметра чохла ТЕП.

Оцінка цієї методичної похибки Δ_{MET} згідно із [28] показала, що вона не буде перевищувати $0,2^\circ\text{C}$.

Похибки вимірювання термо-ЕРС термопар визначаються адитивною Δ_A і мультиплікативною Δ_M похибками каналів вимірювання термо-ЕРС, а також впливом завод нормального і загального виду. Своєю чергою, Δ_A визначається: (і) похибкою комутатора, що закорочує вхід вимірювального каналу, яка, при використанні комутатора на герконах з термовирівнювачами [22], не перевищує $0,5\text{mV}$; (ii) шумами ADC, рівень яких не перевищує $0,5\text{mV}$ [23]. Значення Δ_A не перевищує $0,75\text{mV}$. Δ_M визначається, крім похибки комутатора і шумів ADC, сумарною похибкою стабілізатора взірцевої напруги типу AD780 і подільника його вихідної напруги. Остання визначається похибкою визначення дійсного значення вихідної напруги подільника при калібруванні системи загалом (не повинна перевищувати $0,01\%$, що відповідає 4mV), її температурним коефіцієнтом (не більше за $0,0005\%/^\circ\text{C}$ як для стабілізатора AD780, так і для плівкового

подільника 313NP5, що в сумі відповідає $0,37\text{ mV}/^\circ\text{C}$) і нестабільністю вихідної напруги подільника U_{ref} за міжперевірний інтервал (не перевищує $0,02\%$ за рік, що відповідає 8 mV). Підсумувавши, отримуємо $\Delta_M \approx 9\text{ mV}$, що приблизно відповідає $0,23^\circ\text{C}$. Через те, що $\Delta_M \gg \Delta_A$, похибкою Δ_A можна знехтувати.

Похибка Δ_N від завод нормального виду визначається їхньою амплітудою (зазвичай не перевищує половини вимірюваної термо-ЕРС, тобто $10...20\text{ mV}$ для термопар типу ХА) і коефіцієнтом їхнього придушення ADC (перевищує 70 дБ при частотах завади в діапазоні $(50 \pm 1)\text{ Гц}$). Звідси $\Delta_N \approx 3...6\text{ mV}$. Аналогічно похибка Δ_Z від завод загального виду визначається їхньою амплітудою (в електропечах опору, згідно із [30], досягає 540 В) і коефіцієнтом їхнього придушення, який визначається ефективністю екранування та гальванічної розв'язки, і, згідно із [30], досягає 160 дБ . Звідси $\Delta_Z \leq 7\text{ mV}$.

Похибка Δ_{CJ} корекції впливу температури вільних кінців термопар визначається тепловими похибками (невідповідність температур сенсора R_{CJ} і вільних кінців) і похибкою схеми вимірювання. При використанні термовирівнювача невідповідність температур не буде перевищувати $0,05^\circ\text{C}$ [31], а використання потенціометричної схеми з чотири провідним під'єднанням мідного термометра опору [32] з резистором типу С5-60 як взірцевим резистором та індивідуальних поправок на ХП цього термометра забезпечить похибку схеми не більше за $0,06^\circ\text{C}$. Отже, Δ_{CJ} не буде перевищувати $0,1^\circ\text{C}$.

Похибка лінеаризації Δ_L у разі використання мікроконтролера не перевищує $0,1^\circ\text{C}$.

Отже, сумарна похибка вимірювання температури неоднорідною термопарою Δ_T становитиме

$$\Delta_T = \sqrt{\Delta_P^2 + \Delta_{PR}^2 + \Delta_{MET}^2 + \Delta_M^2 + \Delta_N^2 + \Delta_Z^2 + \Delta_{CJ}^2 + \Delta_L^2} \approx 1,4^\circ\text{C}.$$

Ця сумарна похибка вимірювання температури об'єднує всі інструментальні та методичні складові похибок усіх компонентів вимірювального каналу, зокрема як первинного вимірювального перетворювача, так і вторинних приладів, а також специфічну похибку ТЕП, які за тривалий час експлуатації набули значної термоелектричної неоднорідності – похибку від зміни форми температурного поля об'єкта експлуатації.

Висновки. Пропонований термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля дає змогу істотно підвищити точність вимірювання температури об'єктів, температурні поля яких істотно змінюються під час експлуатації. Це досягається за рахунок створення ним власного профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари, який практично не залежить від профілів температурних полів перевірки та експлуатації. Тому, як показують результати оцінки похибок системи вимірювання температури за допомогою пропонованого термоелектричного перетворювача, навіть за наявності значної набутої термоелектричної неоднорідності електродів головної термопари похибка від цієї неоднорідності (специфічна похибка вимірювання температури, пов'язана зі зміною температурних полів об'єкта вимірювання) не може себе проявити, і, відповідно, сумарна похибка вимірювання температури системою значно нижча, ніж у наявних системах.

1. <http://www.fluke-test.com.au/netdaq.htm>. 2. www.thermo-electra.com. 3. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий. Дис... д-ра техн. наук: 05.11.16. – Ленинград, 1988. – 278 с. 4. Кочан Р. В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.16 – “Інформаційно-вимірювальні системи” – Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. 5. International standard IEC 584-2. 6. Kortvelyessy L. Thermolement Praxis.- Vulkan-Verlag, Essen, 1981. S. – 498. 6. Рогельберг Н.А., Пугидина Э.Н., Покровская Г.Н. и др. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°C продолжительностью до 10000 ч. // В сб. Исследование сплавов для термопар. Труды института Гипроцветметобработка. Том III. – М.: Металлургия, 1969. 8. А.с. 352152 СРСР. Устройство для измерения температуры. А.А. Саченко, К.М. Обелевская, Л.В. Заничковская и др.; Опубл. 1972, Бюл. № 28. 9. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. – К.:Техніка, 1983. 10. Кириков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Исследования в области температурных измерений: Сб.тр. – М.: ВНИИМ, 1976. 11. Alf Hundves, Henz G. Buschfort. Self-calibrating temperature sensing probes and probes – indicator combination. United State Patent 3.499.340. 73-

- 1, G01 -15/00. 12. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 13. Турченко В.О. Нейромережеві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних. Автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.13.13. / Державний університет “Львівська політехніка”. – Львів, 2001. – 16 с. 14. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.11.15 – М., ВНИИФТРИ, 1984. 15. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях. Автореферат диссертатії на здобуття вченого ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.04 – Львів, Державний університет “Львівська політехніка”, 1997. 16. Чирка М.І., Васильків Н.М., Кочан Р.В. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів. // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. – 1999. – №6. 17. Куинн Т. Температура. – М.: Мир, 1985. – 448 с. 18. Куритник И.П. Современное состояние термоэлектрических преобразователей. – М.: 1985. – 56 с. (Обзор информ./ ЦНИИТЭИприборостроения. ТС-6. Вып.1). 19. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.: Выща школа, 1983. 20. Кочан О.В., Кочан Р.В. Термоелектричний перетворювач. Заявка на патент України № 200701855, Заявл. 22.02.2007. 21. Kochan R., Kochan V., Sachenko A., Turchenko V. Development DAQ Module for Intelligent Sensor System. Proceedings of the ISA/IEEE Sensors for Industry Conference Sicon/02. 19-21 November 2002, Houston, Texas, USA. 22. Патентна заявка 2004032136 Україна, МПК 7H01H51/00. Комутатор сигналів низького рівня: Кочан Р.В., Кочан В.В. Заявл. 23.03.2004. 23. 24-Bit Sigma-Delta, Signal Conditioning ADC with 2 Analog Input Channels – AD7712 Data Sheets ([URL:http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/-_399787711AD7712_f.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/-_399787711AD7712_f.pdf)). 24. Патент 25609A України, МКІ G06F 15/00. Двопровідна локальна обчислювальна мережа, повторювач сигналу та інвертор для використання в ній / В.В.Кочан, В.О. Тимчишин (Україна); Заявл. 30.10.97 № 97105295; Видано 30.10.98. 25. Kochan V., Tymchyshyn V. Construction of Distributed Information Measurement Systems on the Basis of Modified RS-232C Interface // Proc. of the 10th IMEKO TC-4 Symposium on Development in Digital Measuring Instrumentation. – 1998. – Naples, Italy. – P. 723–726. 26. Саченко А., Кочан В., Турченко В, Головка В. (BY), Савіцький Ю. (BY), Лаопоулос Т. (GR). Спосіб формування навчальної вибірки прогнозуючої дрейф пристрою збору даних нейронної мережі. Патент №50830 Україна, МПК 7 G06F15/18, Заявлено 04.01.2000; Опубл. 15.11.2002. 27. Sachenko A., Kochan V., Turchenko V.. Sensor Drift Prediction Using Neural Networks // Proceedings of the International Workshop on Virtual and Intelligent Measurement Systems (VIMS'2000). – Annapolis (USA). – 2000. 28. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, Ленинградское отд., 1976. 29. Кочан О., Васильків Н., Кочан Р., Яскілка В. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар. Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. – Том 3, Число 3. 30. Kochan R., Berezky O., Karachka A., Wojko O., Maruschak I. Development of the integrating analogue to digital converter for distributive data acquisition systems with improved noise immunity. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. February 2002, Number 1, Volume 51. 31. Белоусов И.А. Повышение точности многоканальных измерительных устройств с термоэлектрическими преобразователями: Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н.-Львов, ФМІ, 1991. 32. Гладий Г.М., Карачка А.Ф., Кочан В.В., Саченко А.А., Троценко Ю.П. Устройство для измерения температуры. А.с. N 1224611, БИ 14 1986.