

Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 536.531

Н.М. Васильків

Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З КОРЕКЦІЄЮ ПОХИБКИ ВІД НАБУТОЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У статті розглядається структурна схема системи вимірювання температури, в якій передбачено корекцію похибок термоелектричних перетворювачів, і зокрема, похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термонпар, а також дана оцінка похибки вимірювання температури такою системою. Запропонована структура та апаратне виконання вимірювального модуля нижнього рівня вимірювальної системи дають змогу отримати високу точність вимірювання температури без значних затрат на апаратні засоби.

Ключові слова: вимірювання, температура, похибка, термонпара, термоелектрична неоднорідність, метрологічна перевірка.

Вступ

Для вимірювання температури в діапазоні вище 500°C традиційно використовуються в основному термоелектричні перетворювачі (ТЕП) [1]. Їх чутливим елементом є термонпари, які хоч і мають суттєві недоліки, однак давачі (сенсори) високих температур на основі іншого принципу дії (оптоволоконні, лазерні, термошумові), які інтенсивно розроблялися останнім часом [1], поки що не можуть конкурувати з ТЕП. Основним недоліком термоелектричних перетворювачів є їх відносно велика похибка, яка, як правило, домінує серед похибок інших компонентів вимірювального каналу [2], що змушує шукати методи її зменшення.

Постановка задачі. Відомими є методи високоточної корекції багатьох похибок ТЕП – температури вільних кінців [3], нелінійності функції перетворення (ФП) [4], відхилення індивідуальної ФП від номінальної при випуску [5], дрейфу ФП ТЕП з часом експлуатації [6]. Згідно [7, 8], найбільш небезпечною є похибка ТЕП від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів. Останнім часом розроблені методи корекції і цієї похибки [9, 10]. Однак методи побудови систем вимірювання температури, які забезпечують корекцію всіх цих похибок, поки що не описані.

Метою статті є розроблення структурної схеми системи вимірювання температури, в якій передбачено корекцію всіх перелічених похибок ТЕП, і зокрема, похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТЕП, а також оцінка похибки вимірювання температури такою системою.

Методи корекції похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТЕП

Похибка від набутої термоелектричної неоднорідності термоелектричних перетворювачів виникає тому, що під час експлуатації, через залежність швидкості деградації електродів ТЕП від температури експлуатації [11], окремі ділянки ТЕП отримують різні значення питомої термо-е.р.с. Таким чином, електроди ТЕП стають неоднорідними щодо термоелектричних параметрів, похибка кожної ділянки кожного електрода змінюється під час експлуатації по-різному, залежно від того, які фізико-хімічні деградаційні процеси переважають у тій чи іншій ділянці. ФП різних ділянок стають різними. Тому, при зміні профілю температурного поля вздовж електродів ТЕП, коли змінюється температура, при якій знаходяться ділянки електродів ТЕП, генерована ділянками термо-е.р.с. змінюється. Це викликає зміну термо-е.р.с. ТЕП в цілому (хоча температура робочого з'єднання і з'єднаних порівняння не змінилася).

Спроби корекції похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ТЕП робилися давно. У [12] було запропоновано метод перерахунку похибки від набутої неоднорідності з одного профілю температурного поля в інше, що дало можливість коригувати цю похибку за результатами метрологічної перевірки в лабораторних умовах. Для такого перерахунку потрібна була математична модель залежності похибки кожного електрода від часу експлуатації та температури експлуатації, причому для кожної пари значень часу та температури експлуатації треба було знати ФП від температури. Але індивідуальний характер деградації

кожної ділянки вимагав досить часті метрологічної перевірки, інакше похибка перерахунку значно зростає. У [13] було запропоновано для кожної ділянки обидвох електродів ТЕП використати індивідуальні математичні моделі, які коригуються за результатами періодичної метрологічної перевірки. Такі заходи можуть суттєво підвищити точність перерахунку. Однак в результаті періодичної метрологічної перевірки отримуємо сумарну похибку всіх ділянок обидвох електродів ТЕП, яку слід розподілити між ділянками для корекції індивідуальних моделей їх похибок. Обґрунтований критерій такого розподілу невідомий, а неправильний розподіл, замість уточнення індивідуальних моделей похибок ділянок електродів ТЕП, може їх спотворити і стати джерелом додаткової похибки.

У [9, 10] запропоновано визначати критерій розподілу похибок між ділянками ТЕП за результатами його метрологічної перевірки у декількох профілях температурного поля. Якщо похибка від набутої неоднорідності скоригована правильно (тобто вибраний правильний критерій розподілу), то результати метрологічної перевірки будуть у всіх полях однаковими. Знайти значення коефіцієнтів розподілу, якщо кількість профілів температурного поля рівна кількості ділянок, на які розбиті обидва електроди ТЕП, можна шляхом розв'язку системи лінійних рівнянь. Однак для підвищення точності корекції кількість ділянок слід збільшувати, а це веде до значного зростання трудомісткості реалізації методу. Для усунення цього протиріччя у [9, 10] запропоновано зменшити кількість профілів температурного поля при метрологічній перевірці та навчити нейронну мережу прогнозувати поправки в інших профілях температурного поля.

Синтез структурної схеми вимірювального модуля системи

Як видно з викладеного, процедура корекції похибки неоднорідності досить складна і вимагає відносно великих обчислювальних ресурсів при навчанні нейронних мереж. У [9] запропоновано навчати нейронну мережу на верхньому рівні ієрархічної вимірювальної системи, а використовувати на нижньому. В такому випадку на нижньому рівні системи, згідно [9], можна використати прості 8-бітні мікроконтролери, які мають достатні ресурси для обчислення навчених нейронних мереж. Саме таку структуру використаємо для побудови запропонованої системи прецизійного вимірювання температури. В такому разі структура верхнього ієрархічного рівня відповідає традиційній універсальній комп'ютерній системі, що взаємодіє із вимірювальними модулями нижнього рівня через мережу, яку доцільно побудувати на базі модифікованого послідовного інтерфейсу RS-232C [14]. Така мережа має достатню пропускну здатність та значно нижчу за інші вартість, крім того, її найлегше нарощувати.

Вимірювальний модуль нижнього рівня повинен виконувати всі перелічені вище процедури корекції та мати відповідні апаратні засоби для такої корекції.

Зокрема, він вимагає постійного поступлення даних, які характеризують профіль температурного поля вздовж електродів термопар, яка використовується для вимірювання температури об'єкта (головної термопар). Тому в склад вимірювального каналу, до якого підключено головну термопару, повинні входити, крім традиційного каналу вимірювання термо-е.р.с. головної термопар і корекції температури її злютів порівняння, канали вимірювання термо-е.р.с. додаткових термопар (які вимірюють температури вздовж електродів головної термопар) і корекції температур їх злютів порівняння. Таким чином, для вимірювання температури із застосуванням запропонованого у [9, 10] методу корекції похибки необхідна багатоканальна або багатоточкова система, яка повинна мати функції вимірювання і обробки результатів. Згідно [15], багатоточкові системи мають суттєві переваги над багатоканальними, тому для реалізації вимірювальної системи, яка використовує запропонований метод корекції похибки вимірювання температури ТЕП з неоднорідними термопарами, доцільно використати багатоточкову вимірювальну систему, основними вимогами до якої є:

1. Відповідна до конструкції ТЕП, що містить головну термопару і термопару контролю профілю температурного поля вздовж її термоелектродів, кількість каналів вимірювання напруги для встановлення нуля, калібрування, вимірювання термо-е.р.с. всіх термопар, а також вихідних сигналів схеми первинних перетворювачів температури їх злютів порівняння. Слід відзначити, що кількість каналів може бути суттєво зменшена, по-перше, за рахунок апроксимації профілю температурного поля за результатами вимірювання температури в декількох точках металевого захисного чохла ТЕП, і, по-друге, за рахунок зведення злутів порівняння всіх термопар в один корпус, куди поміщений спільний давач температури злутів порівняння. Таке рішення дозволяє відмовитися від використання подовжувальних (компенсаційних) проводів, що додатково підвищує точність вимірювання температури.

2. Діапазон вимірювання напруги – від 0 до 60...80 мВ (для ТЕП типу ХА).

3. Чутливість – не гірше 1 мкВ.

4. Висока завадостійкість щодо завад як нормального, так і загального виду відносно високої амплітуди (згідно критеріїв, сформульованих у [15, 16]).

5. Достатньо висока точність, вимоги до якої можна визначити з умови аналізу методу корекції часового дрейфу ФП головної термопар. Згідно [15] похибка каналів вимірювання напруги повинна бути меншою від похибки взірцевих засобів, що використовуються при реалізації вибраного методу корекції часового дрейфу ФП головної термопар.

6. Достатня обчислювальна потужність для виконання таких підпрограм:

- корекції адитивної (зміщення) та мультиплікативної (коефіцієнту перетворення) похибок всіх каналів вимірювання термо-е.р.с. [17];

- корекції впливу температури злутів порівняння термопар, що входять в ТЕП [3];
- корекції похибки лінійності ФП всіх термопар, що входять в ТЕП [4];
- корекції похибки початкового розкиду ФП головної термопари [5];
- корекції похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів головної термопари за допомогою запропонованого методу [9, 10];
- корекції похибки дрейфу ФП головної термопари в часі шляхом реалізації запропонованого методу корекції похибки вимірювання температури з допомогою ТЕП, в який входять неоднорідні термопари, та наступного прогнозу дрейфу з допомогою, наприклад, методів, запропонованих у [18].

Слід відзначити, що, для спрощення експлуатації системи прецизійного вимірювання температури, вимоги до похибки вимірювальних каналів мають формуватися не з вимог робочих ТЕП, а взірцевих (робочих еталонів) [15]. Це пов'язано з тим, що, під час метрологічної перевірки на місці експлуатації, для виключення необхідності використання додаткових вимірювальних засобів для вимірювання температури за допомогою взірцевих ТЕП (робочих еталонів), останні повинні підключатися до додаткових каналів вимірювання термо-е.р.с., передбачених у вимірювальних модулях нижнього рівня.

Структура вимірювального модуля системи прецизійного вимірювання температури, що виконує перелічені вимоги, представлена на рис. 1.

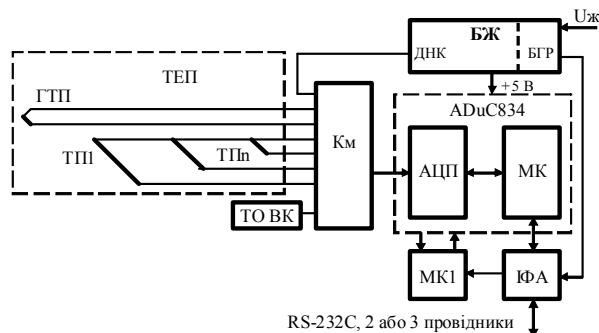


Рис. 1. Структура системи вимірювання температури

Вона базується на модулі збору даних з дистанційним перепрограмуванням, описаному в [19] та складається з таких компонентів:

1. ТЕП, куди входять головна термопара ГТП і додаткові термопари ТП1...ТПn.
2. Комутатор Км на герконових реле типу РГК-15, оснащених термовирівнювачами для зменшення впливу паразитних термо-е.р.с. Згідно даних [15, 20], отримана в такій конструкції паразитна термо-е.р.с. при комутації не перевищує 1 мкВ.
3. Давач температури злутів порівняння термопар – мідний термометр опору ТО ВК типу 50М, ввімкнений в потенціометричну схему [3] послідовно з опорним резистором типу С5-61 опором 100 Ом (температурний коефіцієнт, згідно [21], не більше 0,0005%/°C).

4. Мікроконвертор типу ADuC-834 [22], куди входять:

- 24-х розрядний сігма-дельта аналого-цифровий перетворювач АЦП, який, згідно [19], має велику чутливість (рівень шумів не більше 1 мкВ) і завадостійкість (придушення завад нормального виду не менше 70 дБ в діапазоні частот завади (50±1) Гц);
- мікроконтролер МК типу АТ89С52, обчислювальна потужність якого достатня для виконання в реальному часі перелічених вище (див. п. 6 попереднього переліку) підпрограм.

5. Інтерфейсний адаптер ІФА, що забезпечує обмін даними через інтерфейс RS-232C як в класичному варіанті, так і в модифікованому [14]. Модифікований варіант дозволяє роботу в двохпроводній вимірювально-керуючій мережі дистрибутивних систем [15]. Гальванічна розв'язка в системі забезпечена з допомогою оптронів типу АОТ128 [23], ввімкнених між виходом МК і мережею.

6. Блок живлення БЖ, який забезпечує гальванічну розв'язку і формує напругу +5V для живлення елементів схеми, +12V живлення реле комутатора, а також напруги ±10V живлення інтерфейсу.

7. В склад блоку живлення БЖ входить стабілізатор джерела напруги калібрування ДНК типу AD780 [24], оснащений гібридно-плівковим подільником типу 313HP1 [25] (температурний коефіцієнт поділу не більше 0,0005%/°C) для калібрування каналів вимірювання напруги АЦП.

Однією з важливих особливостей розробленої системи вимірювання температури є можливість дистанційної заміни програми роботи [18, 19] під час експлуатації системи. У зв'язку з тим, що обробка результатів, тобто корекція впливу похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар на результат вимірювання температури, ведеться з допомогою нейронної мережі, така можливість є дуже цінною. Адже, у зв'язку з обмеженими обчислювальними ресурсами мікроконтролерів, навчання нейронної мережі буде вестися, як було сказано, на верхньому ієрархічному рівні системи. Далі навчена нейронна мережа має бути передана на нижній рівень, в мікроконвертор, для використання при обробці результатів вимірювання термо-е.р.с. Однак, через особливості навчання нейронної мережі, її структура, вагові коефіцієнти та зміщення будуть змінюватися під час кожної метрологічної перевірки. Тоді вигідніше замінити програму роботи мікроконтролера МК в цілому. Інакше різко зростає небезпека некоректного оновлення сталої програми обробки даних. Дистанційна заміна програми роботи під час експлуатації системи реалізована окремим мікроконтролером МК1 мінімальної конфігурації типу АТ2313. Він постійно стежить за потоком команд і повідомлень в мережі. При появі команди дистанційної заміни програми роботи даного модуля та після її підтвердження МК1 подає лог. 0 на вихід PSEN (41-й вивід) мікроконвертора ADuC-834 (режим Download – завантаження програми роботи), потім лог. 0 на його

вхід RESET (скидання, 15 вивід), потім подає лог. 1 спочатку на вихід PSEN, а потім – на вхід RESET. Далі МК1 передає на сервер мережі повідомлення про готовність модуля до завантаження програми. Після завантаження програми сервер знову звертається до МК1 і передає йому команду на відновлення роботи модуля. МК1 подає на вхід RESET короткочасний імпульс лог. 0, який скидає мікроконтролер МК мікроконвертора і тим самим запускає його роботу.

Оцінка похибки вимірювання температури

Оцінку похибки результату вимірювання температури з допомогою розробленої системи проведемо поетапно. Спочатку оцінимо похибку вимірювання температури без врахування похибок, пов'язаних з давачем, як це прийнято для традиційних систем вимірювання температури та інших фізичних величин. Ця похибка містить:

- 1) похибки вимірювання термо-е.р.с. всіх термопар, що входять в склад ТЕРП;
- 2) похибки корекції впливу температури злутів порівняння термопар Δ_{CJ} , які входять в склад ТЕРП;
- 3) похибки Δ_L лінеаризації функцій перетворення всіх термопар, які входять в склад ТЕРП.

Похибки вимірювання термо-е.р.с. термопар, що входять в склад ТЕРП, включають систематичні та випадкові складові адитивної Δ_A та мультиплікативної Δ_M похибки каналів вимірювання термо-е.р.с., а також випадкову складову похибки від обмеженого коефіцієнту придушення завад нормального і загального виду. Систематичні складові адитивної Δ_A та мультиплікативної Δ_M похибок каналів вимірювання термо-е.р.с. усунуто шляхом автоматичного встановлення нуля та калібрування [17]. Після цього адитивна складова Δ_A визначається похибкою комутатора, що закорочує вхід вимірювального каналу, яка, при використанні вказаного під час опису схеми комутатора на герконових реле РГК-15 з додатковими термовирівнювачами [20], не перевищує $1\mu V$, а також шумами АЦП, рівень яких, при використанні сігма-дельта аналого-цифрового перетворювача АЦП, що входить в мікроконвертор ADUC834, теж не перевищує $1\mu V$ [22]. Таким чином, адитивна складова похибки каналів вимірювання термо-е.р.с. Δ_A не перевищує $1,5\mu V$ і має випадковий характер. В мультиплікативну складову похибки каналів вимірювання термо-е.р.с. Δ_M входять, крім похибки комутатора і шумів АЦП, сумарна похибка стабілізатора напруги типу AD780 [24] і підключеного до його виходу гібридно-плівкового подільника 313HP1 [25]. Ця похибка визначається, по-перше, похибкою калібрування вихідної напруги подільника при калібруванні системи в цілому (не перевищує $0,01\%$, що відповідає $4\mu V$), температурним коефіцієнтом (не більше $0,0005\%/^{\circ}C$ як для

AD780, так і для 313HP5, що в сумі дає $0,3\mu V/^{\circ}C$ або $6\mu V$ в діапазоні $\pm 10^{\circ}C$ від нормальної температури експлуатації), і, по-друге, сумарною нестабільністю вихідної напруги стабілізатора AD780 і коефіцієнта поділу подільника за рік (обидві не перевищують $0,015\%$, що в сумі відповідає $8\mu V$). Просумувавши, отримаємо $\Delta_M \approx 11\mu V$, що приблизно відповідає $0,27^{\circ}C$. Через те, що $\Delta_M \gg \Delta_A$, похибкою Δ_A можна нехтувати.

Похибка від завад нормального виду Δ_{NMR} визначається їх амплітудою (для типових ТЕРП без металевого чохла, згідно [26], не перевищує $10...20mV$ для термопар типу ХА) і коефіцієнтом їх придушення АЦП (перевищує 70 дБ при частотах завади в діапазоні $(50\pm 1)Гц$). Звідси $\Delta_{NMR} \approx 3...6\mu V$. Похибка від завад загального виду Δ_{CMR} визначається амплітудою завади (в електродвигачах, згідно [15], досягає $540B$) і коефіцієнтом їх придушення. Останній визначається якістю екранування та гальванічної розв'язки, і, при використанні технічних рішень, розроблених в [15], досягає 160 дБ. Звідси $\Delta_{CMR} \leq 7\mu V$, тобто $\Delta_{CMR} \approx \Delta_{NMR} \leq 0,17^{\circ}C$.

Похибка Δ_{CJ} корекції температури злутів порівняння термопар визначається похибкою схеми вимірювання і тепловими похибками (невідповідність температури давача температури злутів порівняння ТО ВК температурі злутів порівняння). Якщо злоти порівняння підключаються до мідного кабелю в закритому металевому корпусі, що має всередині поролонову теплоізоляційну прокладку, невідповідність температур не буде перевищувати $0,05^{\circ}C$ [3]. При використанні потенціометричної схеми з чотирьохпровідним підключенням мідного термометра опору та резистора типу C5-61 [21], а також при використанні індивідуальних поправок на функцію перетворення ТО ВК похибка вимірювальної схеми не буде перевищувати $0,06^{\circ}C$ [3]. Таким чином, сумарна похибка Δ_{CJ} не буде перевищувати $0,1^{\circ}C$.

Похибка лінеаризації Δ_L , при використанні мікроконтролера, згідно [15], не буде перевищувати $0,1^{\circ}C$ для ТЕРП типу ХА. В такому випадку похибка вимірювання температури Δ_T^1 розробленої системи, нормована традиційним чином (без врахування похибки ТЕРП та дії завад) буде становити

$$\Delta_T^1 = \sqrt{\Delta_M^2 + \Delta_{CJ}^2 + \Delta_L^2} \approx 0,3^{\circ}C. \quad (1)$$

При врахуванні дії завад похибка Δ_T^2 розробленої системи буде становити

$$\Delta_T^2 = \sqrt{\Delta_M^2 + \Delta_{NMR}^2 + \Delta_{CMR}^2 + \Delta_{CJ}^2 + \Delta_L^2} \approx 0,35^{\circ}C. \quad (2)$$

Слід відзначити, що традиційне нормування похибки для систем, що використовують методи корекції похибок вимірювання температури, викликаних давачами, не відображає суті таких систем та їх переваг. Тому врахуємо похибки метрологічної перевірки ТЕРП на місці експлуатації за методом [27]

(тобто похибку робочого еталону Δ_N – термомари першого або другого розряду, яка, згідно [28] рівна $0,3^\circ\text{C}$ або $0,6^\circ\text{C}$ відповідно), похибку вимірювання температури робочого еталону (можна оцінити згідно залежностей (1) і (2)) та похибку корекції похибки від набутої неоднорідності електродів ТЕП. Остання похибка включає в себе похибку відтворення впливу набутої неоднорідності Δ_{IN} (згідно [29, 30], не перевищує $0,65^\circ\text{C}$), та прогнозу цієї ж похибки Δ_{PR} значення якої, при використанні адаптивного прогнозу за [18], можна оцінити як не більше 20% від самої похибки, тобто $0,13^\circ\text{C}$.

При оцінці похибки вимірювання температури робочого еталону слід врахувати, що він представляє собою платинову термомару типу ПП (S), чутливість якої приблизно рівна $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ [2], тобто менша за чутливість термомар типу ХА приблизно в чотири рази. Тому, для підвищення точності вимірювання її термо-е.р.с. необхідно перейти на діапазон перетворення 20 мВ. В такому випадку похибкою Δ_A нехтувати не можна (вона буде відповідати $0,15^\circ\text{C}$), а похибка Δ_M не буде перевищувати $2,8\mu\text{V}$ або $0,28^\circ\text{C}$. Вплив завад фактично не зміниться, але значення похибки від їх дії зросте приблизно в чотири рази і буде становити $\Delta_{CMR} \approx \Delta_{NMR} \leq 0,7^\circ\text{C}$, тобто похибка від дії завад стане домінуючою. Для її зменшення доцільно використати багатократні вимірювання, їх цензурування та дискретне усереднення. Згідно [30], такі заходи дають змогу зменшити дію завад приблизно в три рази, тобто приблизно до $0,24^\circ\text{C}$. Решта похибок будуть мати значення, оцінені раніше. В такому випадку похибка вимірювання температури Δ_T^3 за допомогою еталонної термомари, без врахування похибки від дії завад, буде становити

$$\Delta_T^3 = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_M^2 + \Delta_{CJ}^2 + \Delta_L^2} \approx 0,35^\circ\text{C}. \quad (3)$$

При врахуванні дії завад похибка Δ_T^4 вимірювання температури за допомогою еталонної термомари буде становити

$$\Delta_T^4 = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_M^2 + \Delta_{NMR}^2 + \Delta_{CMR}^2 + \Delta_{CJ}^2 + \Delta_L^2} \approx 0,5^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Слід відзначити, що корекція похибки ТЕП згідно методу [9, 10], який передбачає визначення похибки ТЕП як суми похибок всіх ділянок (причому кожна ділянка має індивідуальну модель похибки), забезпечує одночасну корекцію практично всіх складових похибки ТЕП: від відхилення індивідуальної ФП від номінальної при випуску, від дрейфу ФП ТЕП з часом експлуатації та від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів. В такому випадку сумарну похибку вимірювання температури Δ_T^5 (при використанні для метрологічної перевірки на місці експлуатації еталонної термомари першого розряду) можна визначити як

$$\Delta_T^5 = \sqrt{\Delta_N^2 + (\Delta_T^4)^2 + \Delta_{IH}^2 + \Delta_{PR}^2} \approx 0,9^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Якщо для метрологічної перевірки на місці експлуатації використовувати еталонну термомару другого розряду, то сумарна похибка вимірювання температури Δ_T^6 може бути визначена згідно (5), але значення Δ_N буде $0,6^\circ\text{C}$. Похибка Δ_T^6 в такому випадку не буде перевищувати 1°C .

Висновки

Як видно з викладеного, при корекції складових похибок як давача температури, так і інших компонентів вимірювального каналу, похибка вимірювання температури (не термо-е.р.с. ТЕП, а саме температури) може бути досить малою. Однак для досягнення такої похибки необхідне детальне розроблення як апаратних, так і програмних компонентів вимірювального каналу. Запропонована структура та апаратне виконання вимірювального модуля нижнього рівня вимірювальної системи дають змогу отримати високу точність вимірювання температури без значних постійних затрат (затрат на апаратні засоби). В подальшому планується розробити алгоритм роботи описаного модуля, який забезпечить оброблення результатів вимірювань згідно розглянутих методів.

Список літератури

1. *Вимірювання температури: теорія та практика* / Я.Т. Луцук, О.П. Гуж, О.І. Лах, Б.І. Стадник. – Львів: “Бескид Біт”, 2006. – 560 с.
2. *Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення*: ДСТУ 2837-94. [Чинний від 1986-04-01] – К.: Держстандарт України, 1994. – (Національний стандарт України).
3. *Белоусов И.А. Повышение точности многоканальных измерительных устройств с термоэлектрическими преобразователями*: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.05.11.05 «Методы и средства измерения электрических и магнитных величин» / Белоусов И.А. – Львов, 1991. – 20 с.
4. *Васильків Н.М. Аппроксимация номинальных статических характеристик преобразования термоэлектрических преобразователей типа ТПП, ТХА, ТХК* / Н.М. Васильків, Т.В. Лендюк, А.Ф. Карачка // *Матер. Респ. науч-техн. конф. «Применение вычислительной техники и математических методов в научных и экономических исследованиях»*. – К., 1989. – С. 114-115.
5. *Саченко А.А. Совершенствование методов измерения температуры* / А.А. Саченко, Е.Я. Твердый. – К.: Техніка, 1983. – 104 с.
6. *Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий*: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.16 / Саченко А.А. – Л., 1988. – 278 с.
7. *Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности* / И.И. Киренков // *Исследование в области температурных измерений: Сб.тр.* – М.: ВНИИМ. – 1976. – С. 11-15.
8. *Southworth D.J. Temperature Calibration with Isotech Block Baths* / D.J. Southworth. – Handbook of Isothermal Corporation Limited, 1999.

9. Пат. 92192 Україна, МПК G01K 7/02. Спосіб корекції похибки неоднорідності термопар / Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В. - № а200805623; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.11.09, Бюл. №21.
10. Васильків Н.М. Метод корекції похибки вимірювання температури неоднорідними термопарами / Н.М. Васильків // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2010. - № 2. - С. 168-173.
11. Рогельберг И.Л. Изменения термоэлектрической силы проводов из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°C продолжительностью до 10000 ч. Том III. / И.Л. Рогельберг, Э.Н. Пигидина, Г.Н. Покровская [и др.] // Сб. Исследование сплавов для термопар. - Труды института Гипроцветметобработка. - М.: Металлургия, 1969. - С. 128-133.
12. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.15 «Метрологическое обеспечение по отраслям» / Мильченко В.Ю. - М., 1984. - 25 с.
13. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання теплових величин" / Чирка М.І. - Львів, 1997. - 20 с.
14. Патент 25609А України, МПК G06F 15/00. Двопроводна локальна обчислювальна мережа, повторювач сигналу та інвертор для використання в ній / В.В. Кочан, В.О. Тимчишин (Україна). - № 97105295; заявл. 30.10.97; опубл. 30.10.98.
15. Кочан Р.В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.16 "Інформаційно-вимірювальні системи" / Кочан Р.В. - Львів, 2005. - 16 с.
16. Масляк Б.О. Підвищення завадостійкості засобів вимірювання температури в промислових умовах: автореф. дис. на ... канд. техн. наук: спец. 05.11.05 «Прилади та методи вимірювання електричних і магнітних величин» / Масляк Б.О. - К., 1994. - 20 с.
17. Земельман М.А. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах / М.А. Земельман // Измерительная техника. - 1964. - №9.
18. Турченко В.О. Нейромережеві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.13 «Обчислювальні машини, системи, мережі» / Турченко В.О. - Львів, 2001. - 16 с.
19. Universal Sigma-Delta ADC for Intelligent Distributed Instrumentation / R. Kochan, A. Sachenko, V. Kochan, N. Vasylykiv // Proceedings of the 4-th International Conference on Advanced A/D and D/A Conversion Techniques and Their Applications.-Czech Technical University in Prague, Czech Republic, May 28-29. - 2002. - P. 215-218.
20. Пат. 2004032136 Україна, МПК 7H01H51/00. Комутатор сигналів низького рівня: Кочан Р.В., Кочан В.В. Заявл. 23.03.2004.
21. Резисторы С5-61 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.microelectronica.ru/tira/c5_61.html.
22. Details, datasheet, quote on part number:ADUC834 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.chipdig.com/datasheets/parts/datasheet/041/ADUC834.php>.
23. АОТ128 datasheet. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу до ресурсу: Datasheets search system <http://kazus.ru/datasheets/search/go/?query=АОТ128&=1>.
24. High Precision Reference. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу до ресурсу: <http://www.analog.com/en/other-products/militaryaerospace/ad780/products/product.html>.
25. Описание типов резисторов. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу до ресурсу: <http://www.tensor-nn.ru/@info.htm>.
26. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis / L. Kortvelyessy. - Vulkan-Verlag, Essen, 1981.
27. ГОСТ 8.338-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки. - Минск: ИПК Издательство стандартов, 2003. - 23 с.
28. Дослідження впливу швидкості дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності / О.В. Кочан, П.С. Биковий, М.І. Чирка, Н.М. Васильків, В.В. Кочан // Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти. - 2012. - Т.2, вип.1. - С. 54-62.
29. Дослідження впливу нерівномірності дрейфу термопар на похибку корекції їх неоднорідності / Н.М. Васильків, В.В. Кочан, О.В. Кочан, М.І. Чирка // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2012. - № 4. - С. 142-149.
30. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 304 с.

Надійшла до редколегії 5.05.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.О. Саченко, Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ TEMPERATURE С КОРРЕКЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ОТ ПРИОБРЕТЕННОЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Н.М. Васильків

Рассматривается структурная схема системы измерения температуры, в которой предусмотрено коррекцию погрешностей термоэлектрических преобразователей, и в частности, погрешности от приобретенной термоэлектрической неоднородности электродов термопар, а также дана оценка погрешности измерения температуры такой системой. Предложенная структура и аппаратное исполнение измерительного модуля нижнего уровня измерительной системы дают возможность получить высокую точность измерения температуры без значительных затрат на аппаратные средства.

Ключевые слова: измерения, температура, погрешность, термопара, термоэлектрическая неоднородность, метрологическая поверка.

TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM WITH ERROR CORRECTION FROM THE ACQUISITION OF THERMOELECTRIC HETEROGENEITY OF THERMOELECTRIC CONVERTERS

N.M. Vasylykiv

The article discusses the block diagram of the temperature measurement system, which provides error correction thermoelectric converters, and in particular, the error of acquired thermoelectric heterogeneity of electrodes thermocouples, and also estimation error of temperature measurement by this system. The proposed structure and hardware implementation of modules lower level of the measuring system enable to obtain high accuracy of temperature measurement without consuming the hardware.

Keywords: measurement, temperature, error, thermocouple, thermoelectric heterogeneity, metrological verification.