

НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ ЯК ЗАСІБ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ ОБРОБЛЕННІ СИГНАЛІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Розглянуто похибки вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів, адаптовано методи їх корекції для реалізації за допомогою нейронних мереж, оцінено похибки такої корекції. Результати проведених досліджень вказують на можливість використання нейронних мереж як універсального уніфікованого засобу функціонального перетворення при побудові вимірювального каналу приладів і систем прецизійного вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів.

Ключові слова: вимірювання, корекція похибки, термоелектричні перетворювачі, нейронні мережі

NADIA MYKHAILIVNA VASYLKIIV

Ternopil national economic university

NEURAL NETWORKS AS A MEANS OF FUNCTIONAL TRANSFORMATIONS IN SIGNAL PROCESSING OF THERMOELECTRIC CONVERTERS

Abstract - The aim of the research is to investigate the feasibility of using neural networks as a universal means of functional transformation in creating software for data processing (error correction) thermoelectric converters.

We consider the error temperature measurement using thermoelectric converters, adapted their methods to implement correction using neural networks, this estimated error correction. The methods for correcting errors implemented simple, unified for all errors neural network. The neural network for error correction of acquired heterogeneity should have multiple inputs.

The results of researches indicate to the possibility of using neural networks as a universal means uniform functional transformation in the construction of the measuring channel devices and systems for precision temperature measurement using thermoelectric converters.

Keywords: measuring, correction of error, thermoelectric converters, neural networks

Вступ

У зв'язку з широким використанням термоелектричних перетворювачів (ТЕП) при вимірюванні температур 500...1300°C, відносно великою кількістю притаманних їм похибок, а також доволі великими значеннями цих похибок, які зазвичай домінують у вимірювальному каналі [1, 2], розроблено чимало методів корекції практично всіх похибок ТЕП. Однак одночасне використання розроблених методів корекції різноманітних похибок ТЕП при побудові вимірювального каналу прецизійних засобів вимірювання температури супроводжується деякими труднощами, пов'язаними з різноманітністю математичних методів, що використовують методи корекції різних похибок. Така різноманітність, очевидно, пов'язана з тим, що методи корекції похибок оптимізовано для кожної з них зокрема. При цьому не було взято до уваги системний підхід до розроблення приладів і систем, який вимагає узгодження методів оброблення сигналів у вимірювальному каналі, а також вимоги модульного підходу до структури програмного забезпечення цих приладів і систем.

Додаткові труднощі виникають при побудові приладів і систем прецизійного вимірювання температури на базі мікроконтролерів, особливо 8-бітних. Ці мікроконтролери мають доволі обмежені обчислювальні ресурси, тому для них необхідність уніфікації програмного забезпечення є особливо важливою. Слід відзначити, що методи оброблення сигналів ТЕП не вимагають використання складних математичних методів або великих масивів даних, тому вимога щодо уніфікації програмного забезпечення та адаптації його для виконання мікроконтролерами може бути виконана.

1. Постановка задачі

При побудові вимірювального каналу приладів і систем прецизійного вимірювання температури за допомогою ТЕП необхідно коригувати наступні їх інструментальні похибки:

- 1) від впливу температури злутів порівняння ТЕП;
- 2) від нелінійності функції перетворення (ФП) ТЕП;
- 3) від індивідуальних відхилень ФП ТЕП від номінальної ФП;
- 4) індивідуальну похибку від дрейфу ФП ТЕП за час експлуатації;
- 5) індивідуальну похибку від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТЕП.

Залежно від умов експлуатації може знадобитися також корекція похибок, пов'язаних із взаємодією ТЕП з об'єктом вимірювання температури [3], однак ці похибки відносяться до методичних, а їх корекція вимагає індивідуального підходу в кожному випадку.

Під час корекції кожної з перелічених вище похибок ТЕП необхідно виконувати деякі функціональні перетворення. У [4] показано, що універсальним засобом функціонального перетворення можуть бути нейронні мережі (НМ). Вони мають адаптивні властивості та здатність до узагальнення, що робить їх привабливими при корекції похибок, свідченням чого є успішне їх використання для корекції

похибок від дрейфу ФП ТЕП [5, 6] та від набутої термоелектричної неоднорідності ТЕП [7, 8]. Тому доцільно дослідити можливість використання НМ як універсального уніфікованого засобу функціонального перетворення при побудові вимірального каналу приладів і систем прецизійного вимірювання температури за допомогою ТЕП.

Основним недоліком НМ, особливо при побудові приладів і систем на базі мікроконтролерів, є те, що вони потребують значних обчислювальних ресурсів. Однак, це справедливо лише для режиму навчання НМ, а, як показано в [6], для режиму їх використання необхідна обчислювальна потужність зменшується приблизно в 10^4 разів. Тому в [6] запропоновано використати для побудови мікропроцесорних модулів оброблення даних дистрибутивних вимірювально-керуючих мереж, що використовують НМ, дистанційне перепрограмування [9, 10], яке дозволяє змінювати програмне забезпечення в процесі роботи. Такий підхід дає змогу гнучко використовувати для оброблення даних довільні НМ.

Метою статті є дослідження доцільності використання нейронних мереж як універсального засобу функціонального перетворення при створенні програмного забезпечення для оброблення даних (корекції похибок) термоелектричних перетворювачів для 8-бітних мікроконтролерів. Для досягнення мети треба відібрати кращі методи корекції перелічених вище похибок ТЕП, адаптувати їх для реалізації за допомогою НМ та оцінити похибки корекції.

2. Корекція впливу температури злутів порівняння

Мостові схеми корекції впливу температури вільних кінців мають ряд суттєвих недоліків:

- відносно велику похибку корекції через неспівпадання характеру їх ФП з характером ФП ТЕП (у цих ФП різні знаки других похідних);
- значний вплив опору проводів підключення давача температури (мідного термометра опору) на коригуючу напругу;
- відносно велику інструментальну похибку через необхідність використання трьох прецизійних резисторів, які разом з термометром опору створюють міст.

Вищу точність забезпечують потенціометричні схеми [11], що, за рахунок практично відсутнього впливу опору проводів підключення термометра опору на похибку корекції, дають змогу відмовитися від подовжувальних проводів (термометр опору розміщується в головці ТЕП), похибка яких співмірна з похибкою ТЕП [12]. Недолік схеми [11], який полягає у необхідній більшій розрядності АЦП, на сьогодні, при використанні прецизійних сигма-дельта АЦП або відповідних мікроконверторів, неактуальний.

Алгоритм корекції повинен передбачати виконання наступних операцій:

1. Вимірювання струму термометра опору I_{TO} шляхом вимірювання спаду напруги U_{RN} на опорному резисторі, опір якого R_N відомий.

2. Вимірювання спаду напруги на термометрі опору U_{TO} .

3. Обчислення опору термометра опору R_{TO} за формулою

$$R_{TO} = R_N(U_{TO}/U_{RN}). \quad (1)$$

4. Визначення термо-е.р.с. ТЕП E_{VK} , що відповідає температурі злутів порівняння t_{VK} за допомогою нейронної мережі.

5. Обчислення скоригованої термо-е.р.с. ТЕП E_{RK}^{VK} , що відповідає температурі його робочого злуту t_{RK} за формулою

$$E_{RK}^{VK} = E_{RK} + E_{VK}, \quad (2)$$

де E_{RK} – безпосередньо виміряна термо-е.р.с. ТЕП.

Вибірка для навчання НМ в даному випадку повинна подавати на вхід НМ значення опору термометра R_{TO} , а на вихід – відповідні значення термо-е.р.с. ТЕП E_{VK} .

Як показали дослідження, для широко розповсюджених ТЕП хромель-алюмель (ХА) допустимо похибку функціонального перетворення забезпечує один нейрон.

Однак наступні функціональні перетворення не будуть настільки простими, тому, для уникнення необхідності зміни структури НМ, досліджено похибки НМ (тришаровий перцептрон, один вхідний розподільчий нейрон, три нейрони схованого шару із сигмоїдною функцією активації та один лінійний вихідний нейрон) при температурі злутів порівняння ТЕП ХА в діапазоні від 0 до 50°C. На рисунку 1 представлено результати досліджень.

Отримана максимальна похибка 0,14 % (що відповідає 0,07°C) цілком прийнятна.

Корекцію похибки нелінійності ФП ТЕП доцільно об'єднати з масштабним перетворенням вихідного коду аналого-цифрового перетворювача. Для зменшення похибки функціонального перетворення, НМ має формувати коди, які, при додаванні до результату перетворення, повинні приводити значення коду до вигляду, який вимагає лише ділення. Основою для корекції цієї похибки є стандарт [13], де вказано

номінальні значення термо-е.р.с. ТЕП $E_{RK}^{NOM}(t^{\circ}C)$ як функції температури. Тоді для ТЕП ХА лінеаризуючу поправку ΔE_{RK}^{LIN} можна обчислити як

$$\Delta E_{RK}^{LIN} = E_{RK}^{NOM}(t^{\circ}C) - 40 \cdot t^{\circ}C, \quad (3)$$

де $t^{\circ}C$ – поточне значення температури, $^{\circ}C$.

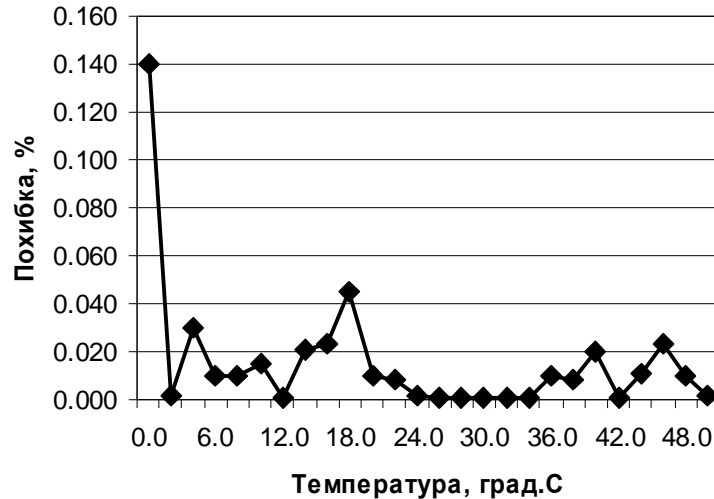


Рис. 1. Графік відносної похибки визначення коригуючої поправки на температуру злутів порівняння

3. Корекція похибки нелінійності ФП ТЕП

Вибірка для навчання НМ в даному випадку повинна подавати на вхід НМ значення отриманої у розділі 2 скоригованої термо-е.р.с. ТЕП E_{RK}^{VK} , а на вихід – відповідні значення поправки ΔE_{RK}^{LIN} . Як показали дослідження, для ТЕП ХА максимальна похибка визначення поправки в діапазоні від 0 до 1100 $^{\circ}C$ не перевищує 0,042% (рис. 2) при використанні НМ аналогічної, як у розділі 2, структури. Максимальне значення поправки не перевищує 12 $^{\circ}C$, тому абсолютна похибка лінеаризації не перевищує 0,005 $^{\circ}C$.

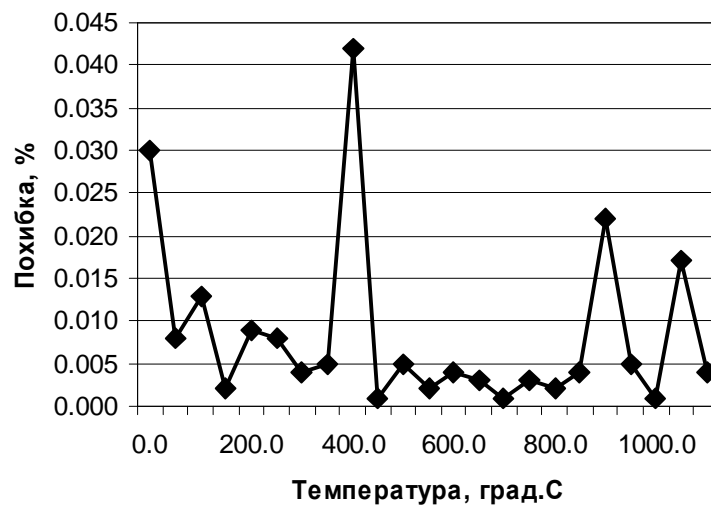


Рис. 2. Графік відносної похибки визначення поправки при лінеаризації

4. Корекція індивідуального відхилення ФП ТЕП від номінальної

Під час корекції похибки від індивідуального відхилення ФП ТЕП від номінальної нейронна мережа має формувати коди, які, при додаванні до результату аналого-цифрового перетворення, повинні приводити значення коду до вигляду, який вимагає лише ділення. Основою для корекції служать результати метрологічної перевірки ТЕП $E_{RK}^{REAL}(t^{\circ}C)$ у декількох точках [14]: трьох - для діапазону вимірювання, що не перевищує 500 $^{\circ}C$, до п'яти - при ширшому діапазоні вимірювання. Тоді індивідуальну поправку ΔE_{RK}^{IND} можна обчислити як

$$\Delta E_{RK}^{IND} = E_{RK}^{REAL}(t^{\circ}C) - E_{RK}^{NOM}(t^{\circ}C), \quad (4)$$

де $E_{RK}^{NOM}(t^{\circ}C)$ – номінальні значення термо-е.р.с. ТЕП, що відповідають температурі його метрологічної перевірки, отримані, наприклад, шляхом інтерполяції табличних значень термо-е.р.с. ТЕП цього типу.

Вибірка для навчання НМ в даному випадку повинна подавати на вхід НМ значення отриманої у розділі 3 термо-е.р.с. ТЕП після лінеаризації E_{RK}^{LIN} , а на вихід – знайдені індивідуальні поправки ΔE_{RK}^{IND} . Як показали дослідження, для ТЕП ХА максимальна похибка визначення поправки в діапазоні від 0 до 1100°C не перевищує 0,1% (рис. 3) при використанні НМ описаної структури. Максимальне значення поправки для ТЕП ХА не перевищує 8°C, тому абсолютна похибка лінеаризації не перевищує 0,008°C.

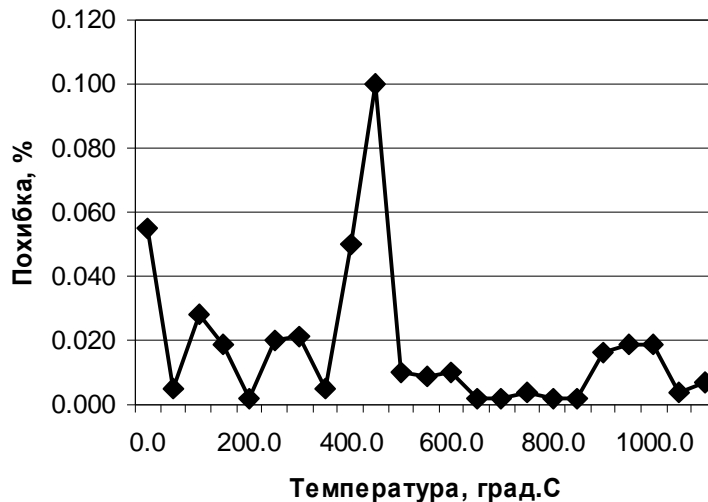


Рис. 3. Графік похибки корекції індивідуального відхилення ФП ТЕП

5. Корекція дрейфу ФП ТЕП в часі

В процесі корекції похибки від ФП ТЕП в часі НМ також повинна формувати коди, які, при додаванні до результату аналого-цифрового перетворення, повинні приводити значення коду до вигляду, який вимагає лише ділення. Відомо три методи корекції цієї похибки за допомогою НМ [6, 15]:

1. Навчання НМ за результатами періодичної метрологічної перевірки ТЕП на місці експлуатації за допомогою взірцевого ТЕП [16] або калібрування за допомогою температурного калібрувальника [17]. Його недоліком є потреба відносно великої кількості метрологічних перевірок або калібрувань для якісного навчання НМ [15].

2. Використання ансамблю з апроксимуючої та прогнозуючої НМ [6]. Цей метод для якісного навчання НМ вимагає відносно невеликої кількості метрологічних перевірок або калібрувань (5 – 7), але доки вони не будуть проведені, похибка від дрейфу ФП ТЕП в часі не буде коригована.

3. Використання ансамблю з інтегруючої історичні дані, апроксимуючої та прогнозуючої НМ [5, 6]. Цей метод для якісного навчання нейронної мережі вимагає лише однієї метрологічної перевірки або калібрування, однак він спирається на масив результатів метрологічної перевірки групи однотипних ТЕП.

Ці методи мають велику, зростаючу згідно їх номера у приведеному переліку, обчислювальну складність. Однак це стосується лише етапу навчання. На етапі використання ці методи корекції можуть мати однакову невисоку обчислювальну складність. Для корекції в складі мікроконтролера слід виконати один з методів, з його допомогою провести прогноз 50 – 100 значень термо-е.р.с. дрейфу та навчити на них НМ корекції, що буде використана безпосередньо для обчислення коригуючої поправки.

Індивідуальні значення функції ΔE_{DRIFT}^{IND} , що коригує дрейф ФП ТЕП в часі, можна обчислити за допомогою перелічених методів та представити як

$$\Delta E_{DRIFT}^{IND} = f(E_{RK}^{REAL}, \tau_{EXP}), \tag{5}$$

де τ_{EXP} – час експлуатації ТЕП.

Вибірка для навчання НМ в даному випадку повинна подавати на вхід НМ значення отриманої у розділі 4 термо-е.р.с. ТЕП після лінеаризації та корекції похибки від індивідуального відхилення ФП ТЕП від номінальної $E_{RK}^{LIN+IND}$, а також відповідний час експлуатації τ_{EXP} . На вихід слід подавати знайдені індивідуальні поправки ΔE_{DRIFT}^{IND} . Як показали дослідження, для ТЕП ХА максимальна похибка корекції дрейфу ФП ТЕП в часі в діапазоні від 0 до 2000 годин не перевищує 0,56 % (рис. 4) при НМ, аналогічній до описаної вище (вона лише повинна мати два вхідні розподільчі нейрони, куди поступають $E_{RK}^{LIN+IND}$ та

τ_{EXP}). Максимальне значення похибки дрейфу ФП ТЕП в часі для ТЕП ХА не перевищує 22°C, тому абсолютна похибка лінеаризації не перевищує 0,13°C.

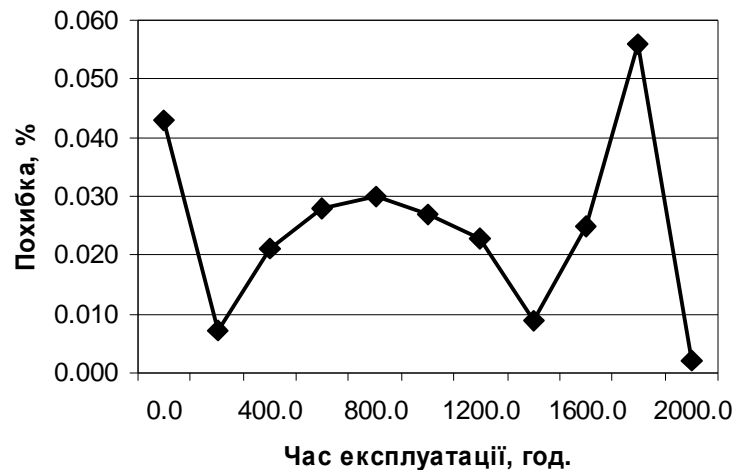


Рис. 4. Графік похибки корекції похибки від дрейфу ФП ТЕП в часі

6. Корекція похибки від набутої термоелектричної неоднорідності

Похибка ТЕП від набутої в процесі експлуатації неоднорідності його термоелектродів визначається та коригується найважче. Вона полягає у тому, що деградація різних ділянок термоелектродів під час дії високих температур при експлуатації приблизно пропорційна до температури. Деградація проявляється і як дрейф ФП ТЕП в часі (зміна в часі генерованої термо-е.р.с. при постійних температурах робочого з'єдну і з'єднів порівняння) [1, 12, 18], і як похибка від набутої неоднорідності (зміна генерованої термо-е.р.с. при постійних температурах робочого з'єдну і з'єднів порівняння через зміну профіля температурного поля вздовж термоелектродів) [8, 18]. Методи корекції похибки від набутої неоднорідності, запропоновані раніше, базуються на розподілі визначеної під час метрологічної перевірки ТЕП похибки між математичними моделями похибок ділянок ТЕП, однак не визначають дійсного критерію розподілу. У [7, 8] запропоновано нейромережвий метод корекції цієї похибки, який полягає у тому, що згаданий критерій розподілу знаходять за допомогою НМ, яка узагальнює результати метрологічної перевірки ТЕП у різних профілях температурного поля вздовж термоелектродів.

Запропонований у [7, 8] метод досить складний не тільки під час навчання НМ, а і в процесі їх використання. Він передбачає навчання НМ за результатами метрологічної перевірки в різних температурних полях, визначення формованих математичними моделями похибок ділянок поправок для всіх ділянок і для всіх профілів температурного поля, а також сум поправок для кожного профілю, обчислення відхилень цих сум від результатів метрологічних перевірок, розподіл відхилень сум між ділянками (за допомогою навченої раніше НМ) та корекцію математичних моделей похибок ділянок згідно результатів розподілу.

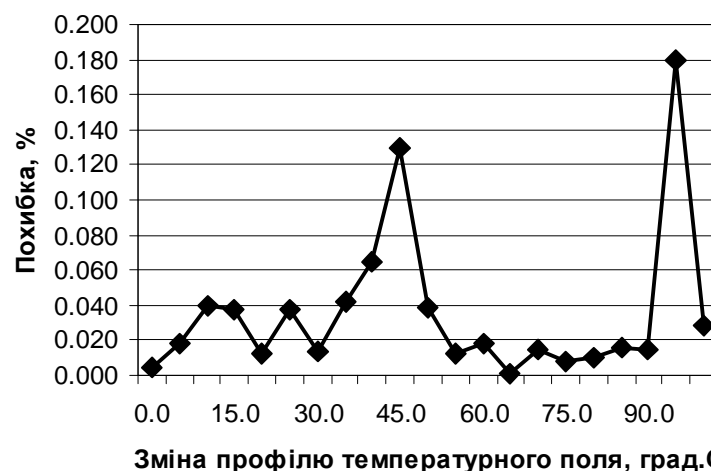


Рис. 5. Графік похибки корекції від набутої термоелектричної неоднорідності

Однак метод можна значно спростити за рахунок обчислення (за відкоригованими математичними моделями похибок ділянок) 50–100 значень залежності поточних поправок для різних комбінацій температур всіх ділянок (тобто різних профілів температурного поля вздовж електродів ТЕП) і навчання додаткової НМ корекції (що буде використовуватись мікроконтролером) на обчислених значеннях. У такому разі НМ корекції буде відрізнятися від описаних вище лише кількістю вхідних розподільчих нейронів – їх

кількість має бути рівна кількості датчиків температури ділянок вздовж електродів ТЕП. Саме для цих точок визначення профілю температурного поля повинні бути обчислені значення поточних поправок, на яких вчиться НМ корекції. Таким чином, структура НМ для корекції всіх похибок буде однорідна.

Як показали дослідження [19], для ТЕП ХА максимальна похибка від набутої неоднорідності досягає 11°C. Відносна похибка корекції похибки від набутої неоднорідності для ТЕП, що експлуатувався 1000 годин, як показало моделювання, не перевищує 0,18 % (рис. 5), абсолютна похибка не перевищує 0,02°C.

Висновки

Як видно з результатів проведеного дослідження, похибки, які вносять нейронні мережі, є відносно дуже малі. Слід зазначити, що вказані вище значення максимальних похибок відносяться виключно до самих нейронних мереж, вони не враховують інструментальних похибок інших компонентів вимірювального каналу. Відібрані кращі методи корекції похибок ТЕП можуть бути реалізовані досить простою, уніфікованою для всіх похибок нейронною мережею. Додаткова уніфікація можлива за рахунок використання у всіх випадках найскладнішого варіанту – нейронної мережі корекції похибки від набутої неоднорідності, яка повинна мати декілька входів. При цьому, якщо така кількість входів для корекції інших похибок не потрібна, то на входи подають однакові значення вхідної змінної. Однак в такому випадку навчати всі нейронні мережі потрібно саме з такою кількістю входів.

Отже, використання нейронної мережі, як універсального засобу функціонального перетворення, при створенні програмного забезпечення оброблення даних ТЕП для 8-бітних мікроконтролерів можливе та доцільне.

Література

1. Вимірювання температури: теорія та практика / Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник. – Львів: “Бескид Біт”, 2006. – 560 с.
2. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий: дис. доктора техн. наук : 05.11.16 / Саченко Анатолий Алексеевич. – Ленинград, 1988. – 278 с.
3. Гордов А.Н. Точность контактных методов измерения температуры / А.Н., Гордов, Я.В. Малков, Н.Н. Эргард [и др.]. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 237с.
4. Головкин В.А. Нейроинтеллект: теория и применение. Книга 1. Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями / В.А. Головкин. – Брест: Изд. БПИ, 1999. – 264 с.
5. Патент 50830 Україна, МПК 7 G06F15/18. Спосіб формування навчальної вибірки прогнозуючої дрейф пристрою збору даних нейронної мережі / Саченко А., Кочан В., Турченко В. (Україна), Головкин В., Савицький Ю. (Білорусь), Лапоулос Т. (Греція) – заявл. 04.01.2000; Опубл. 15.11.2002. – 14 с.
6. Турченко В.О. Нейромереві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.13 «Обчислювальні машини, системи, мережі» / В.О. Турченко. – Львів, 2001. – 16 с.
7. Пат. 92192 Україна, МПК G01K 7/02. Спосіб корекції похибки неоднорідності термодатчиків / Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В. – № a200805623; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.11.09, Бюл. №21.
8. Васильків Н.М. Метод корекції похибки вимірювання температури неоднорідними термодатчиками / Н.М. Васильків // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С.168-173.
9. Васильків Н.М. Контролер з дистанційною реконфігурацією для адаптивної вимірювально-керуючої мережі / Н.М. Васильків, В.В. Кочан, А.О. Саченко, В.О. Тимчишин // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Комп'ютерні системи та мережі. – 1998. – №350. – С.14-18.
10. Пат. 90766 Україна, МПК G06R. Мережевий модуль обробки даних з дистанційною реконфігурацією / Кочан Р.В., Майків І.М., Турченко І.В., Кочан В.В. – №200806336; заявл. 13.05.2008; опубл. 25.05.10.
11. А.с. СССР № 1224611. Устройство для измерения температуры / А.А. Саченко, В.В. Кочан, Г.М. Гладий, Ю.П. Троценко, А.Ф. Карачка (СССР) - опубл. 1986, БИ № 14.
12. Бычковский Р.В. Контактные датчики температуры / Р.В. Бычковский – М.: Металлургия, 1978. – 240 с.
13. ДСТУ 2837-94 Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення. – [Чинний від 1986-04-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – (Національний стандарт України)
14. Рогельберг И.Л. Сплавы для термодатчиков / И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.
15. Кочан Р. В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.16 “Інформаційно-вимірювальні системи” / Р.В. Кочан. – Львів, 2005. – 16 с.
16. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis / L. Kortvelyessy – Vulkan-Verlag, Essen, 1981.– P. 498.
17. United States Patent 3.499.340. 73-1. G01K 15/00. Self calibrating temperature sensing probe and

proube – indicator combination // Alf Hundves, Henz G. Buschfort. – 1968.

18. Кочан О.В. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар / О.В. Кочан, Р.В. Кочан, В.Я. Яскілка, Н.М.Васильків // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. – №1 – С. 122 -129.

19. Васильків Н.М. Дослідження впливу змін профілю температурного поля на похибку вимірювання температури неоднорідними термопарами / Н.М. Васильків, О.В. Кочан // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2010. – Т.15. – №2. – С.146-153.

References

1. Lutsyk Ya.T., Huk O.P., Lakh O. I., Stadnyk B. I. Vymiriuvannya temperatury: teoriia ta praktyka.– Lviv: “Beskyd Bit”, 2006. – 560 p. [in Ukrainian]
2. Sachenko A.A. Razrabotka metodov povy'sheniya tochnosti i sozdanie sistem precizionno izmereniya temperatury' dlya promy'shlenny'x tekhnologiy: dis. doktora texn. nauk : 05.11.16. – Leningrad, 1988. – 278 p. [in Russian]
3. Gordov A.N., Malkov Ya.V., E'rgard N.N. Tochnost' kontaktny'x metodovizmereniya temperatury'. – M.: Izd. standartov, 1973. – 237с. [in Russian]
4. Golovko V.A. Nejrointellekt: teoriya i primenenie. Kniga 1: Organizaciya i obuchenie nejronny'x setej s pryamy'mi i obratny'mi svyazyami. – Brest: Izd. BPI, 1999. – 264 p. [in Russian]
5. Pat. 50830 Ukraine, MPK 7 G06F15/18. Sposib formuvannya navchalnoi vybirky prohnozuiuchoi dreif prystroiu zboru danykh neironnoi merezhi / Sachenko A.O., Kochan V., Turchenko V. (Ukraine), Holovko V., Savitskyi Yu. (Bilorus), Laopoulos T. (Hretsia) – zaiavl. 04.01.2000; Opubl. 15.11.2002. – 14 p. [in Ukrainian]
6. Turchenko V.O. Neiromerzhevi metody i zasoby pidvyshchennia efektyvnosti dystributyvnykh merezh zboru i obrobky sensorykh danykh: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets.. 05.13.13 «Obchysluvalni mashyny, systemy, merezhi». – Lviv, 2001. – 16 p. [in Ukrainian]
7. Pat. 92192 Ukraine, MPK G01K 7/02. Sposib korektsii pokhybky neodnorodnosti termopar / Vasylykiv N.M., Kochan O.V., Kochan V.V. - № a200805623; zaiavl. 29.04.2008; opubl.10.11.09, biul..№21. [in Ukrainian]
8. Vasylykiv N.M. Metod korektsii pokhybky vymiriuvannya temperatury neodnorodnykh termoparamy. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Technical sciences. Khmelnytsky. 2010. Volume. Issue 2. pp.168-173. [in Ukrainian]
9. Vasylykiv N.M., Kochan V.V., Sachenko A.O., Tymchyshyn V.O. Kontroler z dystantsiinoiu rekonfiguratsieiu dlia adaptyvnoi vymiriuvanno-keruiuchoi merezhi. Visnyk DU «Lvivska politekhnika». Kompiuterni systemy ta merezhi.- 1998. - №350. - pp.14-18. [in Ukrainian]
10. Pat. 90766 Ukraine, MPK G06R. Merezhevi modul obrobky danykh z dystantsiinoiu rekonfiguratsieiu / Kochan R.V., Maikiv I.M., Turchenko I.V., Kochan V.V. - №200806336; zaiavl. 13.05.2008; opubl.25.05.10. [in Ukrainian]
11. A.s. SSSR № 1224611. Ustrojstvo dlya izmereniya temperatury' / Sachenko A.A., Kochan V.V., Gladij G.M., Trocenko Yu.P., Karachka A.F. - Opubl. BI № 14 , 1986. [in Russian]
12. By'chkovskij R.V. Kontaktny'e datchiki temperatury'– M.: Metallurgiya, 1978. – 240 p. [in Russian]
13. Peretvoriuvachi termoelektrychni. Nominalni statychni kharakterystyky peretvorennia : DSTU 2837-94 . - [Chynnyi vid 1986-04-01] – K.: Derzhstandart Ukrainy, 1994. – (Natsionalnyi standart Ukrainy) [in Ukrainian]
14. Rogelberg I.L., Bejlin V.M. Splavy' dlya termopar. – M.: Metallurgiya, 1983. – 360 p. [in Russian]
15. Kochan R.V. Vdoskonalennia komponentiv pretsyziinykh rozpodilynykh informatsiino-vymiriuvalnykh system: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 05.11.16 “Informatsiino-vymiriuvalni systemy. – Lviv, 2005. – 16 p. [in Ukrainian]
16. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis– Vulkan-Verlag, Essen, 1981.- P. 498.
17. United States Patent 3.499.340. 73-1. G01K 15/00. Self calibrating temperature sensing proube and proube – indicator combination // Alf Hundves, Henz G. Buschfort. - 1968.
18. Kochan O.V., Kochan R.V., Yaskilka V.Ya, Vasylykiv N.M. Otsinka maksymalnoi pokhybky neodnorodnykh termopar. Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. – 2007. - №1 - pp. 122-129. [in Ukrainian]
19. Vasylykiv N.M., Kochan O.V. Doslidzhennia vplyvu zmin profilu temperaturnoho polia na pokhybku vymiriuvannya temperatury neodnorodnykh termoparamy. Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. – 2010. – Т.15. - №2. – pp.146-153. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 14.5.2015 р.

Надрукована/Printed : 14.5.2015 р.

Рецензент: д. т. н., професор Саченко А.О.