

О. Кочан

Науково-дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних систем  
Тернопільського національного економічного університету

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З КЕРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

У статті проведено аналіз впливу набутої в процесі тривалої експлуатації термопар термоелектричної неоднорідності їх електродів на генеровану термопарами термо-е.р.с. Розроблено термоелектричний перетворювач, який, за рахунок додаткових підсистем регулювання температури, стабілізує профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари. В такому термоелектричному перетворювачі похибка від термоелектричної неоднорідності електродів головної термопари не може себе проявити. Тому існуючі методи корекції дрейфу термопар під дією часу і температури експлуатації можуть забезпечити вищу точність вимірювання температури.

О. Kochan

## THERMOCOUPLE BASED SENSOR

In this paper is analyzed influence of heterogeneity of thermocouple's electrodes on generated e.m.f. for thermocouples which was under action of long operation time. There is developed thermocouple, which provide stabilization the temperature profile along electrodes of the main thermocouple using additional temperature control loops. The error of the main thermocouple caused by heterogeneity of own electrodes could not show itself in the developed sensor. Therefore implementation of existed methods of thermocouples drift, particularly caused by operation time and temperature, correction for developed thermocouple brings improvement precision of temperature measurement.

### Умовні позначення

$e_N, \Delta e_k$  – номінальне значення питомої термо-е.р.с. (термоелектрична здатність) для даного термоелектроду (матеріалу) та індивідуальне її відхилення для  $k$  – тої ділянки відповідно;

$t_{k+1}, t_k$  – температури на межах  $k$  – тої ділянки термоелектроду;

$E_{\Sigma N}$  – номінальне значення е.р.с., яке генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур робочого та вільних кінців  $t_{rk} - t_0$  ;

$l$  – координата довжини.

$t_e$  – температура експлуатації;

$t$  – поточна температура;

$\tau$  – час експлуатації;

$a$  – змінна інтегрування.

### Вступ

Як відомо, при використанні сучасних вимірювальних засобів і систем похибка вимірювання температури з допомогою термоелектричних перетворювачів практично повністю визначається похибками останніх [1...4]. Це пов'язано з відносно великим початковим розкидом характеристик перетворення (ХП) термопар [5, 6] та значним дрейфом цих ХП, пов'язаним з деградаційними процесами в термоелектродах під дією високих температур і часу експлуатації [7, 8]. Тому досягнення високої точності вимірювання температури вимагає розробки відповідних методів прогнозу і корекції похибок термопар [1].

Але швидкість протікання згаданих деградаційних процесів залежить від температури експлуатації окремих ділянок термоелектродів, що призводить до наростання їх набутої неоднорідності. Це викликає, при незмінних температурах робочого і вільних кінців термопари, зміну вихідної термо-е.р.с. термопар від зміни профілю температурного поля вздовж цих термоелектродів. Останній фактор ставить під сумнів можливість корекції похибок термопар [9]. Тому значна увага зверталася на

розробку, по-перше, методів визначення похибки термопар на місці експлуатації з метою подальшої побудови матмоделі дрейфу і корекції похибки власне для цього профілю температурного поля [1, 8, 10, 11] та, по-друге, оцінки і корекції самої похибки неоднорідності [12...15]. Однак методи першої групи ефективні тільки при стабільному профілі температурного поля, його зміна вимагає побудови матмоделі дрейфу заново. Методи другої групи додатково до цього вимагають для побудови достовірних математичних моделей корекції достатньо точних і повних даних експериментальних досліджень дрейфу, які важко отримати в зв'язку з:

- 1) складністю експериментальних досліджень неоднорідності термоелектродів, яка вимагає витримки досліджуваних наборів термоелектродів при заданих температурах, а потім визначення їх похибок від зміни профілю температурного поля;
- 2) великим розкидом результатів експериментальних досліджень, який, крім індивідуальних особливостей деградації термоелектродів, включає випадкові похибки від встановлення заданих профілів температурних полів при дослідженні проявів похибки неоднорідності.

Це приводить до необхідності уточнення параметрів математичних моделей корекції похибки неоднорідності за результатами перевірки термоелектричних перетворювачів в лабораторних умовах [15] або, краще, на місці експлуатації [16]. Ці методи базуються на моделях корекції похибки окремих ділянок термопар (умовно вибраних), неоднорідністю яких можна нехтувати. Однак результатом перевірки термопар є значення сумарної похибки всіх ділянок, тому виникає задача адекватного розподілу між вибраними ділянками термопар відхилення похибки, обчисленої за допомогою математичної моделі, від визначеної при проверці для корекції матмоделей дрейфу цих ділянок. Теоретично обгрунтовані критерії такого розподілу відсутні, а використання для їх побудови результатів експериментальних досліджень [17], відповідно до згаданих в пп. 1 і 2 причин, не дають надійної бази для корекції математичних моделей похибок через те, що похибки розподілу можуть спотворити математичні моделі корекції похибки окремих ділянок і не покращити, а погіршити точність корекції. Таким чином, похибка неоднорідності залишається однією з найбільш небезпечних і мало досліджених похибок.

Метою даної статті є розробка запропонованого в [18] термоелектричного перетворювача, в якому похибка від неоднорідності електродів не проявляється, незважаючи на зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання.

### **Принцип побудови термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля**

Якщо розбити кожен термоелектрод термопар на ділянки  $i = \overline{1, n}$ , електрорушійну силу (е.р.с.)  $E_k$  для  $k$ -тої ділянки можна записати як [19, 20]

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

де  $e_N, \Delta e_k$  – номінальне значення питомої е.р.с. (термоелектрична здатність) для даного термоелектроду (матеріалу) та індивідуальне її відхилення для  $k$ -тої ділянки відповідно;  $t_{k+1}, t_k$  – температури на межах  $k$ -тої ділянки термоелектроду.

Спрямуємо різницю  $t_{k+1} - t_k$  до нуля і, перетворюючи (1), визначимо сумарну е.р.с.  $E_\Sigma$  одного термоелектроду:

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

де  $E_{\Sigma N}$  – номінальне значення е.р.с., яке генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур робочого та вільних кінців  $t_{rk} - t_0$ . Інтеграл визначає сумарну похибку термоелектроду  $\Delta E_\Sigma$ .

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

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

Слід відзначити, що в процесі експлуатації, під дією високих температур, змінюється хімічний склад термоелектродів (окислення, міграція) і їх кристалічний стан, причому інтенсивність змін у значній мірі залежить від температури, при якій дана ділянка перебувала під час експлуатації [21]. В результаті накопичення цих змін  $\Delta e_k$  окремих ділянок термоелектродів стає неоднаковою, тобто сумарна е.р.с. стає залежною від розподілу температурного поля вздовж термоелектродів. Таким чином, на основі (2), з врахуванням (3), запишемо вираз, який визначає сумарну похибку  $\Delta E_\Sigma$  термоелектроду в температурному полі експлуатації

$$\Delta E_\Sigma = \int_0^{t_k} \Delta e_k dt = \int_0^l \Delta e_k \frac{\partial t}{\partial l} dl = \int_0^l \Delta e_k \nabla t dl \quad , \quad (4)$$

де  $\Delta e_k = f(t_e, t, \tau)$  – відхилення питомої е.р.с. термоелектроду як функція температури експлуатації ділянки  $t_e$ , поточної температури  $t$  цієї ділянки (яка відповідає зміненому градієнту) та часу її експлуатації  $\tau$  для кожної ділянки термоелектрода окремо.

Слід відзначити, що  $\Delta e_k$  у виразі (4) формально не залежить від змінної інтегрування  $l$ , хоча між ними існує зв'язок через поточну температуру  $t$  (аргумент функції  $\Delta e_k$ ) кожної ділянки термоелектрода, яка, в свою чергу, визначається зміною градієнта температурного поля  $\nabla t$ . Тому підінтегральний вираз в (4), для спрощення аналізу, можна розділити на два співмножники. Отже з (4) можна зробити очевидний висновок, що, якщо  $\Delta e_k$  прямує до нуля, тобто при відсутності дрейфу ХП термопари, сумарна похибка  $\Delta E_\Sigma$  термоелектроду буде рівна нулю і зміна градієнту температурного профілю  $\nabla t$  вздовж електродів термопари не вплине на  $\Delta E_\Sigma$ . Одночасно з (4) видно, що, якщо  $\Delta e_k$  не прямує до нуля, тобто при наявності дрейфу ХП термопари, сталий (детермінований) градієнт температурного поля  $\nabla t$  через його інтеграл (який описує профіль температурного поля вздовж електродів термопари) впливає на сумарну похибку  $\Delta E_\Sigma$  термоелектроду як деякий постійний коефіцієнт. Очевидно, що при зміні градієнту температурного поля  $\nabla t$  змінюється його інтеграл (профіль температурного поля вздовж електродів термопари), тобто коефіцієнт при  $\Delta e_k$  змінюється. Останнє веде до зміни сумарної похибки  $\Delta E_\Sigma$ , тобто до прояву похибки від неоднорідності термопар.

З викладеного видно, що методи корекції зміни ХП термопар можна розділити на дві великі групи:

1. Ті, які приймають градієнт температурного поля  $\nabla t$  незмінним, тобто вважають профіль температурного поля експлуатації сталим, а боротьбу з відхиленнями питомої е.р.с. ділянок термоелектродів зводять до боротьби з впливом першого інтегралу (4). При цьому індивідуальні відхилення  $\Delta e_k$  коригують методом періодичного визначення сумарної похибки всієї термопари в лабораторних умовах [22, 23], або на місці експлуатації [8, 10, 11] шляхом повірки або калібрування. Слід відзначити, що методи визначення індивідуального відхилення сумарної похибки всієї термопари на місці експлуатації [8, 10, 11] дозволяють одночасно коригувати і похибку неоднорідності, але тільки при умові подальшої сталості градієнту температурного поля  $\nabla t$ , тобто коли другий інтеграл залежності (4) впливає як сталий коефіцієнт.

2. Ті, які приймають градієнт температурного поля  $\nabla t$  змінним стрибкоподібно, тобто вважають профіль температурного поля експлуатації сталим на деякому проміжку часу. Протягом цього часу використовуються методи боротьби зі зміною ХП термопар, відомі з п. 1, а після зміни – методи перерахунку індивідуальних відхилень  $\Delta e_k$  відповідно до знайдених відповідно до методів п. 1 значень сумарної похибки всієї термопари [15...17].

Очевидно, що перелічені групи методів корекції зміни ХП термопар не вичерпують всіх можливих варіантів експлуатації термоелектричних перетворювачів. Аналізуючи розглянуті вище методи і залежність (4), можна запропонувати використання щодо термопар ще одного відомого методу зменшення дії впливаючих величин – методу їх стабілізації, який дозволяє перевести випадкову впливаючу величину в систематичну, з наступною її корекцією методами, які використовуються для корекції систематичних похибок. Щодо термопар стабілізація впливаючої величини означає стабілізацію профілю температурного поля експлуатації термопари. При цьому процес корекції зміни ХП термопар можна звести до методів п. 1, незважаючи на те, що профіль температурного поля об'єкта вимірювання змінюється. Ця стабілізація повинна діяти як при експлуатації термоелектричного перетворювача, так і при його повірці, тоді неспівпадання температурних полів умов експлуатації та повірної печі не приведе до прояву похибки від неоднорідності термопари. При такій стабілізації термопара стає інваріантною до темпу змін температурного поля об'єкта вимірювання – вони можуть бути стрибкоподібними (при зміні, наприклад, режимів термообробки), плавними (при зміні, наприклад, умов теплообміну об'єкта з зовнішнім середовищем) або періодичними (наприклад, добовими або сезонними). Тому доцільна розробка такого термоелектричного перетворювача, який може бути названим термоелектричним перетворювачем з керованим профілем температурного поля [18].

#### **Розробка конструкції пропонованого термоелектричного перетворювача**

Метод стабілізації профілю температурного поля експлуатації термопари може бути реалізований, наприклад, з допомогою додаткових підсистем регулювання температури. Структура такого термоелектричного перетворювача представлена на рис. 1. Основним засобом вимірювання температури є головна термопара ГТ, під'єднана до вимірювального каналу ВК засобу вимірювання температури ЗВТ. Профіль температурного поля вздовж електродів ГТ стабілізований з допомогою додаткових підсистем регулювання температури, в склад яких входять додаткові термопари  $T_1...T_n$ , нагрівачі  $H_1...H_n$  та власне регулятори, представлені на рис. 1 у вигляді входів РТх і виходів РТу одного багатоканального ЗВТ. Додаткові термопари  $T_1...T_n$  та відповідні їм нагрівачі  $H_1...H_n$  зміщені відносно головної термопари ГТ по її осі таким чином, щоби створювати їй суцільне покриття. Така структура забезпечує можливість цілеспрямованого керування профілем температурного поля вздовж електродів головної термопари ГТ, тобто можливість стабілізації заданого профілю температурного поля вздовж її термоелектродів (наприклад, відповідно до графіку А рис. 1). Зміна зовнішніх щодо пропонованого термоелектричного перетворювача профілів температурних полів у межах, які знаходяться між кривими В і С (рис. 1) не буде впливати на профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари ГТ. Зокрема, цей профіль залишиться відповідним кривій А як при повірці (при профілі температурного поля повірної печі, який відповідає, наприклад, кривій D), так і при експлуатації (при профілі температурного поля об'єкта вимірювання, який відповідає, наприклад, кривій E). В такому випадку профілі температурних полів як повірної печі (D), так і об'єкта, де експлуатується термоелектричний перетворювач (E), не впливають на профіль температурного поля вздовж термоелектродів головної термопари (A), тому похибка від неоднорідності її термоелектродів, згідно з (4) проявити себе не може.

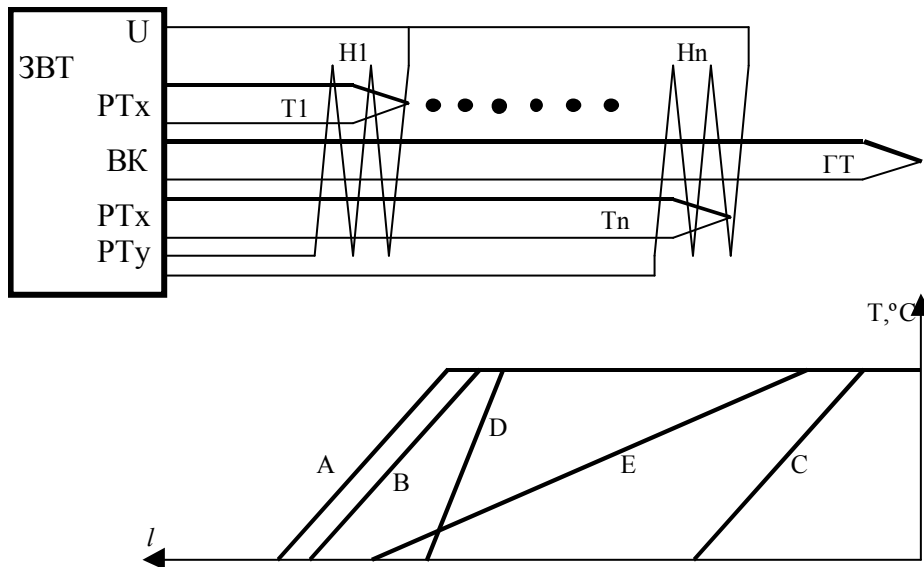


Рисунок 1 - Структура термоелектричного перетворювача з керованим (стабілізованим) профілем температурного поля і профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари

На рис. 2 представлена конструктивна схема пропонованого термоелектричного перетворювача. Основою для неї є традиційний термоелектричний перетворювач, який складається з термоелектродів 1 і 2 головної термопари, ізолюваних керамічними втулками (бусами) 3, і захисного чохла 4. Для керування профілем температурного поля на деякій віддалі від робочого кінця головної термопари розміщено робочі кінці додаткових термопар 5 і відповідні їм нагрівачі 6, ізолювані 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 таким чином, щоби повністю контролювати розподіл температури вздовж її термоелектродів, однак не впливати на температуру робочого кінця.

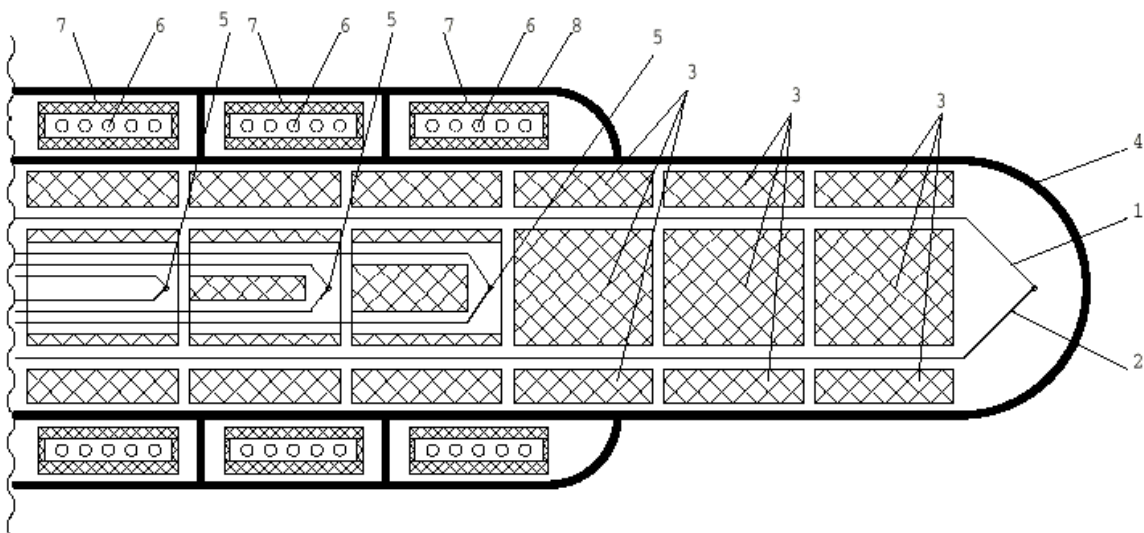


Рисунок 2 - Конструктивна схема пропонованого термоелектричного перетворювача

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 служить 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) повинні підтримувати температуру зон, рівною температурі

робочого кінця головної термопар. Тоді різниця температур між робочим кінцем головної термопар і цими нагрівачами є малою, а значить і тепловий потік від зони нагрівача до робочого кінця буде малим. Отже, він не буде істотно впливати на результат вимірювання температури.

### **Висновки**

Наявність у складі пропонованого термоелектричного перетворювача додаткових підсистем регулювання температури дозволяє термоелектричному перетворювачу створити свій, незалежний від профілів зовнішніх температурних полів, профіль температурного поля вздовж термоелектродів головної термопар і постійно витримувати його, тобто досягнути інваріантності головної термопар щодо профілів зовнішніх температурних полів. Це дає можливість використовувати термопарі зі значною набутою термоелектричною неоднорідністю електродів без небезпеки виникнення значної похибки неоднорідності [9, 24]. Зокрема, це дозволяє термопарі з неоднорідними термоелектродами користуватися поправками, знайденими при повірці, без додаткових методичних похибок, пов'язаних з різницею температурних полів повірної печі та об'єкта експлуатації. Також розроблені раніше методи корекції похибок термопар, зокрема часового дрейфу їх ХП у зв'язку з деградацією термоелектродів під дією температури і часу експлуатації, можуть забезпечити вищу точність вимірювання через менший вплив похибки від змін профілю температурного поля об'єкта вимірювання.

### **Література**

1. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температур в промышленных технологиях: Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. - Ленинград, ЛЭТИ, 1988.
2. Кочан Р.В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.16. Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2005. - 16с.
3. <http://www.fluke-test.com.au/netdaq.htm>
4. [www.thermo-electra.com](http://www.thermo-electra.com)
5. International standard IEC 584-2.
6. ГОСТ 3044-84. Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статистические характеристики преобразования, - М.: Изд-во стандартов, 1984.- 56 с.
7. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др.- Киев.: Наукова думка, 1972.- 223 с.
8. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis.- Vulkan-Verlag, Essen, 1981. S.- 498.
9. Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Исследования в области температурных измерений: Сб.тр.- М.: ВНИИМ.-1976.-С.11-15.
10. 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.
11. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 96 с.
12. Гришков А.Я., Сирота А.М. Влияние неоднородности термоэлектродов на показания термопар// Исследования сплавов для термопар. - М.: Металлургия, 1969. - С.107-115.
13. Тартаковский Д.Ф. Расчет погрешности термопары от термоэлектрической неоднородности ее электродов//Труды метролог. ин-тов СССР.-1969.-Вып.105(165).-С.107-114.
14. Павлов Б.П., Лижевская Л.И., Серягина Л.П. Графический метод расчета погрешности термопар из-за неоднородности электродов // Измерительная техника.-1985.-N7.-С.43-45.
15. 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. - 25с.
16. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.04 - Львів, Державний університет “Львівська політехніка”, 1997. – 16 с.
17. М.І.Чирка, Н.М.Васильків, Р.В.Кочан. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів. // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. – 1999. – №6. – С.37-42.
18. Кочан О.В., Кочан Р.В. G01K 7/02. Термоелектричний перетворювач. Заявка на патент України № а 2007 01855, заявлено 22.02.2007.

19. Куинн Т. Температура.- М.: Мир, 1985. - 448 с.
20. Гордов А.Н. Основы пирометрии.- М.:Металлургия, 1971.- 447 с.
21. Рогельберг И.Л., Нужнов А.Г., Покровская Г.Н. и др. Стабильность термоэлектродвижущей силы термопар хромель-алюмель при нагреве на воздухе при температурах до 1200 С // Исследование сплавов джля термопар: Сб.тр. института Гипроцветметобработка.- М.: Металлургия, 1967. Т.11. Вип.24.- С.54-65.
22. А.А. Саченко, К.М. Обелевская, Л.В. Заничковская, В.А. Кочан. Устройство для измерения температуры. А.с. № 352152 СССР.
23. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. - К.:Техніка, 1983. - 104 с.
24. О. Кочан, Н. Васильків, Р. Кочан, В. Яскілка. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - №1, 2007. - С.122-129

*Одержано 29.02.2008 р.*