

Оцінка максимальної потужності нагрівачів термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля

©Кочан Орест, 2013

Тернопільський національний економічний університет

У статті проведено теоретичну оцінку максимальної необхідної потужності нагрівачів термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) для ефективного керування власним полем сенсора. Крім того приведено залежності максимальної погонної потужності нагрівачів ТЕП з КПТП від максимальної необхідної зміни температури та товщини шару теплоізоляції.

В статье приведена теоретическая оценка максимальной необходимой мощности нагревателей термоэлектрического преобразователя с управляемым профилем температурного поля (ТЭП с УПТП) для эффективного регулирования собственным полем сенсора. Кроме того, приведено зависимости максимальной погонной мощности нагревателей ТЭП с УПТП от максимального необходимого изменения температуры и толщины теплоизоляции.

The theoretical evaluation of maximum heaters power of thermocouple based sensor with controlled profile of temperature field (TBS with CPTF) is considered in this paper. Such evaluation is necessary for effective control of own temperature field of TBS with CPTF. Also the dependence maximum power per unit of length of heaters of TBS with CPTF from maximum temperature change as well as thickness of thermoinsulation layer is done in this paper.

Постановка проблеми. Термоелектричні перетворювачі (ТЕП) є одними з найбільш відомих і розповсюджених первинних перетворювачів температури (особливо для температур вище 500°C) [1], не дивлячись на досить вагомі недоліки – малу чутливість, нелінійність функції перетворення (ФП), необхідність врахування температури вільних кінців, а головне – відносно великі похибки. Вони визначаються в основному:

1. початковими індивідуальними відхиленнями ФП від номінальної (для найбільш розповсюджених ТЕП типу ХА – 6,5 °С при температурі 800°C, [2]). Методи визначення та корекції цих похибок відомі [3, 4], вони забезпечують їх зменшення майже до рівня взірцевих засобів;
2. часовим дрейфом ФП під дією температури і часу експлуатації (для ТЕП типу ХА – 8°C за 1000 годин при температурі експлуатації 800°C, [5]). Методи визначення та корекції цих похибок також досліджені [6 - 8]. При використанні температурного калібрувача [9, 10] або повірці ТЕП на місці експлуатації з допомогою взірцевого ТЕП [11, 12] можна отримати похибку вимірювання температури не більше 0,8 – 1,2°C;
3. похибкою від набутої в процесі тривалої експлуатації при високій температурі термоелектричної неоднорідності електродів термопар – чутливого елементу ТЕП.

Остання похибка вважається найбільш впливаючою і найменш дослідженою [13], згідно [14], похибки ТЕП взагалі не можна коригувати через її наявність. Причиною похибки від набутої неоднорідності термоелектродів є залежність їх степені деградації від температури експлуатації [5, 15]. Тому ділянки термоелектродів, що знаходяться в зоні градієнта температурного поля експлуатації, деградують по різному, тобто відхилення їх ФП від номінальної залежать від температури, в якій вони знаходяться [16]. Проявляє себе похибка від набутої неоднорідності, згідно [14, 16], як зміна термо-е.р.с., генерованої термопарою, при зміні профілю температурного поля вздовж її електродів (при сталих температурах робочого і вільних кінців). Наприклад, для ТЕП типу ХА при 1000 годин експлуатації при температурі 800°C, в найгіршому випадку похибка від набутої неоднорідності досягає 11°C [17], чим не можна нехтувати.

1. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля

Для зменшення впливу похибки від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар на результат вимірювання температури у [18 - 20] запропоновано і досліджено

термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП). У такому давачі профіль температурного поля вздовж термоелектродів головної термопари (що вимірює температуру об'єкта), утримується сталим (на нього не впливають зміни профілю зовнішнього температурного поля). Таким чином, створюються умови, при яких похибка від набутої неоднорідності її термоелектродів не може себе проявити.

Структурна схема вимірювального каналу температури, який використовує ТЕП з КПТП, представлена на рис. 1. Профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари ГТП утримується сталим за рахунок додаткових каналів керування температурою. В ці канали входять додаткові термопари ТП1 - ТПn, нагрівачі Н1 - Нn та канали керування відповідної підсистеми ПСК.

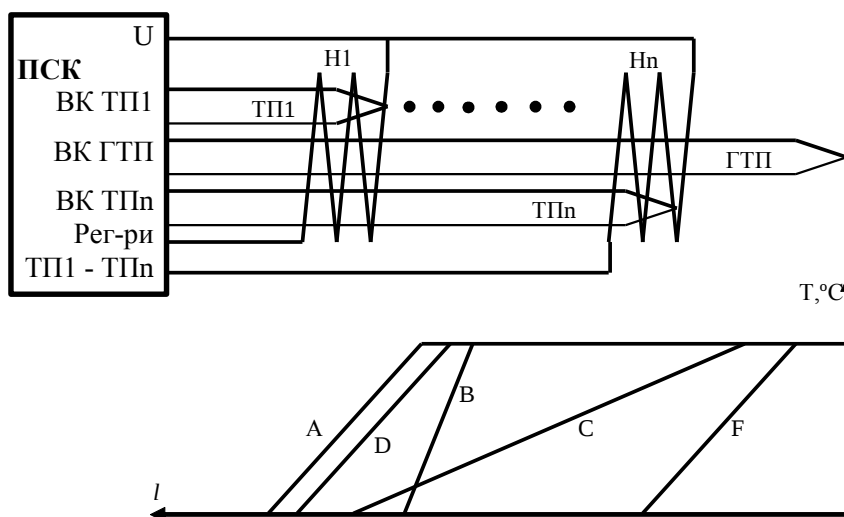


Рис. 1. Структурна схема вимірювального каналу температури, який використовує ТЕП з КПТП

Таким чином, під час експлуатації нагрівачі Н1 - Нn створюють вздовж електродів ГТП профіль температурного поля, позначений А на рис. 1. Реальні профілі температурного поля об'єкта вимірювання температури, наприклад, В, С, на профіль температурного поля вздовж електродів ГТП не впливають, тому похибка набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ГТП проявити себе не може. Максимально допустимі зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури позначені на рис. 1 буквами D та F. Власне вони визначають межі зміни температури, які повинні реалізувати додаткові канали керування температурою ТЕП з КПТП. Однак у [18 - 20] оцінка необхідної потужності нагрівачів Н1 - Нn для реалізації цих змін не проведена, що не дає змоги розробити конструкцію ТЕП з КПТП, а також оцінити вплив ТЕП з КПТП на об'єкт вимірювання температури.

Метою статті є оцінка максимальної потужності нагрівачів термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля, необхідної для компенсації заданих змін профілю зовнішнього температурного поля (температурного поля об'єкта вимірювання) та розрахунок параметрів нагрівачів.

2. Теоретична оцінка максимальної потужності нагрівачів ТЕП з КПТП

Максимально необхідну потужність нагрівачів Н1 - Нn можна приблизно оцінити прийнявши, що зона, в якій вони знаходяться, є безконечним циліндром, який має сталі температури внутрішньої t_1 (температура, яку утримують нагрівачі) та зовнішньої t_2 (температура оточуючого середовища) стінок. Тоді, згідно [21], можна записати

$$Q = -F\lambda \frac{dt}{dr} = -2\pi r l \lambda \frac{dt}{dr} \quad , \quad (1)$$

де Q – тепловий потік через бокову площу циліндра; F – бокова площа циліндра на одиницю довжини l ; r – радіус циліндра; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу циліндра.

Щодо ТЕП з КППП, то матеріал циліндра – це шар теплоізоляції, який покриває нагрівачі $H_1 - H_n$. Температури t_1 та t_2 пов'язані співвідношенням

$$t_1 - t_2 = \Delta t \quad , \quad (2)$$

де Δt – максимальна зміна температури, яку повинні реалізувати нагрівачі каналів керування ТЕП з КППП.

Згідно [21], одним з рішень диференційного рівняння (1) буде залежність погонного теплового потоку через зовнішню стінку циліндра (відношення Q до l), яку можна визначити як

$$\frac{Q}{l} = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_2}} = \frac{2\pi\lambda\Delta t}{\ln \frac{d_1}{d_2}} \quad , \quad (3)$$

де d_1 та d_2 – відповідно зовнішній та внутрішній діаметри циліндра, $\lambda = 0,15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

Виходячи з вищевикладеного можна записати

Залежності (2) – (4) дозволяють обчислити погонний тепловий потік, необхідний нагрівачам ТЕП з КППП для того, щоби реалізувати необхідну зміну температури вздовж електродів ГТП. Цей тепловий потік рівний потужності нагрівачів на відповідній довжині циліндра. Залежності максимальної погонної потужності нагрівачів ТЕП з КППП (Вт) від максимальної необхідної зміни температури ($^{\circ}\text{C}$) для різної товщини теплоізоляції (м) представлено на рис. 2. Як видно з рис. 2, велика потужність нагріву (більше 1 кВт/м) потрібна лише при тонкій шарі теплоізоляції та змінах профілю температурного поля, які відповідають вимірюваній температурі. Такий варіант цілком не характерний для прямого застосування ТЕП з КППП. Зазвичай зміни профілю температурного поля потужних термоагрегатів, наприклад, печей теплових електростанцій, визначаються змінами генерованої потужності, порою року та зовнішніми погодними умовами (сонце, вітер, опади). Такі впливи не змінюють профіль температурного поля термоагрегата більше, ніж на $30 - 50^{\circ}\text{C}$. Крім того, довжина зони одного нагрівача, для забезпечення гнучкого керування профілем температурного поля, не повинна перевищувати 0,1 м. В такому випадку максимальна потужність окремих нагрівачів ТЕП з КППП, залежно від товщини теплоізоляції, не буде перевищувати 20 – 50 Вт, що цілком прийнятно для потужних термоагрегатів.

Зміни профілю температурного поля, що відповідають вимірюваній температурі, характерні для ТЕП з самопівіркою [22]. В цьому випадку питання узгодженості такого ТЕП з об'єктом вимірювання температури необхідно вирішувати окремо. Очевидно, що для великих термоагрегатів, зокрема, печей потужних теплових електростанцій, такі потужності теж прийнятні, вони не викличуть спотворення їх функціонування.

3. Розрахунок параметрів нагрівачів

Для конструювання ТЕП з КППП необхідно узгодити параметри нагрівачів (матеріал і діаметр їх провідників) з потрібною потужністю, точніше напругою живлення та максимальним струмом. Для цього запишемо значення опору провідника R

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad , \quad (5)$$

де ρ – питомий опір провідника, для нагрівачів доцільно використовувати або ніхром, для якого, згідно [2], $\rho \approx 1 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$, або один з термоелектродів – хромель, для якого $\rho \approx 0,65 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$, або алюмель, для якого $\rho \approx 0,4 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$; L – довжина провідника; S – площа перерізу провідника.

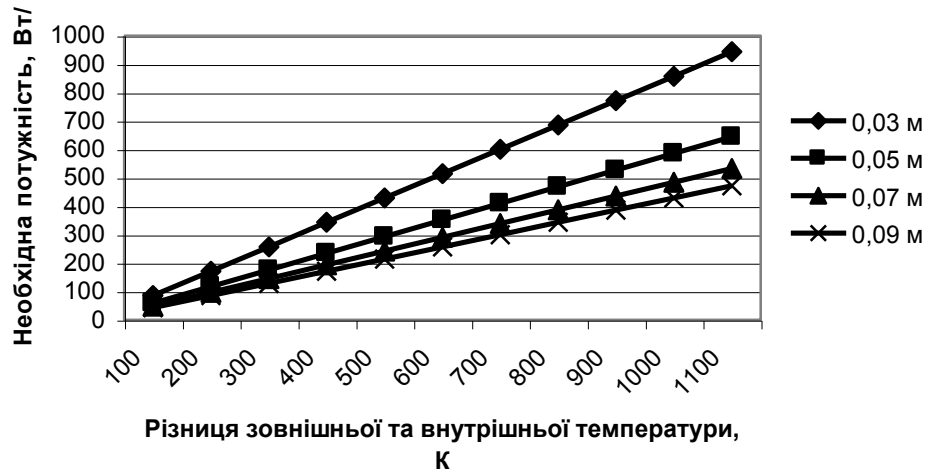


Рис. 2. Залежності максимальної погонної потужності нагрівачів ТЕП з КПТП від максимальної необхідної зміни температури та товщини шару теплоізоляції

В свою чергу для ТЕП з КПТП можна записати

$$L = n \cdot \pi \cdot d_2, \quad S = \pi \cdot d_p^2 / 4, \quad (6)$$

де n – кількість витків нагрівача, n можна визначити як $n = l / (d_p + w)$; d_p – діаметр провідника нагрівача; l – довжина однієї секції нагрівача; w – товщина ізоляції провідника (при суцільному намотуванні нагрівача) або відстань між провідниками (при намотуванні нагрівача з примусовим кроком).

Якщо підставити (6) у (5), отримаємо

$$R = 4\rho \frac{l \cdot d_2}{d_p^2 (d_p + w)}. \quad (7)$$

Для макета, описаного та дослідженого в [19], маємо $d_2 = 0,02 \text{ m}$, $l = 0,05 \text{ m}$, $d_p = 0,5 \text{ mm}$, $w = 1 \text{ mm}$, $\rho \approx 0,65 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ (хромель [2]). Підставивши ці дані в (7), отримаємо $R \approx 7 \text{ Ohm}$. Для забезпечення зміни температури на згадане раніше значення 30 - 50°C, згідно рис. 2, потрібна максимальна потужність нагрівачів 20 - 50 Вт. Товщина теплоізоляції макета приблизно 10 мм, тому необхідна напруга живлення нагрівачів повинна бути 18 - 19В, тоді максимальний струм нагрівача буде становити 2,6 – 2,7 А. Отримані дані прийнятні для практичного використання.

Значного зменшення необхідної потужності нагрівача, а значить його напруги і струму можна досягти шляхом збільшення товщини теплоізоляційного шару. Відповідні залежності приведено на графіках рис. 3 і 4.



Рис. 3. Залежність необхідної напруги живлення нагрівача від товщини теплоізоляційного шару (мм)

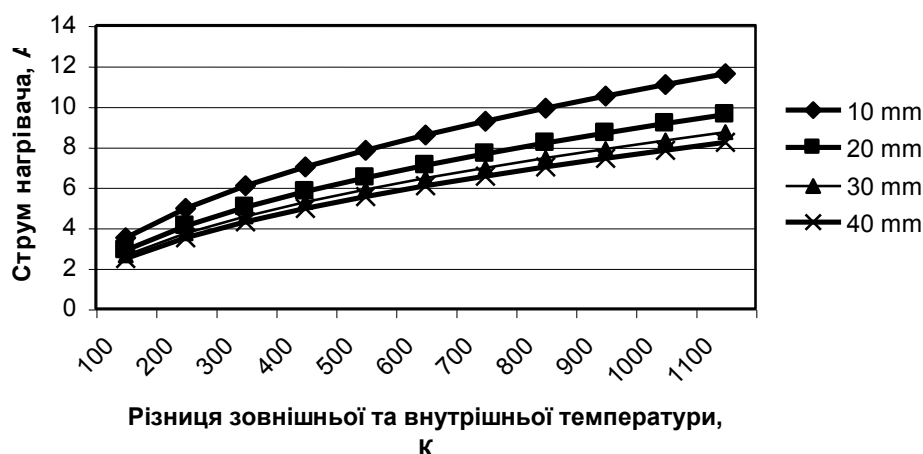


Рис. 4. Залежність необхідного струму нагрівача від товщини теплоізоляційного шару (мм)

Висновки

Приведена вище методика оцінки потужності нагрівачів ТЕП з КПП є приблизною. Вона не враховує тепловіддачі по осі нагрівачів (вздовж електродів термопар). Але, незважаючи на такий недолік, вона дозволяє оцінити необхідну потужність нагрівачів, провести їх конструктивний розрахунок, а також показує можливий шлях до оптимізації структури теплоізоляції.

Список посилань

1. Вимірювання температури: теорія та практика / Луцик Я. Т., Гук О. П., Лах О. І, Стадник Б. І. – Львів: “Бескид Біт”, 2006. – 560 с.
2. Приборы для измерения температуры контактным способом/Под ред. Р.В.Бычковского.-Львов.:Вища школа, 1979.-208 с.
3. Саченко А. А. Повышение точности измерения электрическими методами высоких температур в промышленных условиях: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. Наук : спец. 05.11.05 “Приборы и методы измерения электрических и магнитных величин” / А. А. Саченко. – Львов, 1978. – 20 с.
4. Саченко А.А., Совершенствование методов измерения температуры. / А.А. Саченко, Е.Я. Твердый - К.:Техніка - 1983. - 104 с.
5. Рогельберг Н.А. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°C продолжительностью до 10000 ч. Том III. / Рогельберг Н.А., Пигидина Э.Н., Покровская Г.Н. и др. – Сб. Исследование сплавов для термопар. – Труды института Гипроцветметобработка. – Москва: Металлургия, 1969.
6. 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
7. Березький О.М. Системи вимірювання температури з елементами штучного інтелекту: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання теплових величин" / О.М. Березький. – Львів, 1996. – 20 с.
8. Турченко В.О. Нейромережеві 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.
9. Alf Hundves, Henz G. Buschfort. Self calibrating temperature sensing proube and proube –indicator combination- Unated State Patent 3.499.340. 73-1, G01 -15/00.
10. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 96 с.
11. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis / L. Kortvelyessy – Vulkan-Verlag, Essen, 1981. S. – 498.

12. Пат. 2299408 России МПК G01K 15/00. Устройство для измерения температуры в виде термоэлектрического преобразователя / Коржавин А.В., Коржавин В.А., Богатов В.В., Белевцев А.В. Заявлен 28.03.2006.
13. Southworth D.J. Temperature Calibration with Isotech Block Baths / Southworth D.J. – Handbook of Isothermal Corporation Limited 1999.
14. Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности/ И.И. Киренков // Исследование в области температурных измерений: Сб.тр. – Москва: ВНИИМ. – 1976. – С. 11-15.
15. Павлов Б.П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар / Павлов Б.П. – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 109 с.
16. 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.
17. Васильків Н.М. Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації: дисертація на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання теплових величин"/ Н.М. Васильків - Львів, 2010. – 158 с.
18. Кочан О.В. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля / Кочан О.В. // Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету. - 2008. - N2. - С. 102-108.
19. Кочан О.В. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.04 – прилади і методи вимірювання теплових величин / О.В. Кочан . – Львів, 2011. – 20 с.
20. Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В. - заявл. 22.02.2007.
21. Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. /И.А. Недужий , А.Н. Алабовский. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 248 с. - (2-е изд., перераб. и доп.)
22. Заявка на патент №a201213268 Україна, G01k. Спосіб корекції похибки головної термопари. / Кочан О.В. – Заявл. 21.11.2012.