
ДЕГРАДАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ СЕНСОРІВ

SENSOR'S DEGRADATION, METROLOGY AND CERTIFICATION

УДК 536.532

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109115>

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ СТАНУ ЕЛЕКТРОДІВ ТЕРМОПАР У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Кочан

Науково-дослідний інститут «Інтелектуальних комп'ютерних систем» Тернопільського національного економічного університету, 46004, Майдан Перемоги 3, м. Тернопіль, Україна.
(0352) 43-6038.

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка», 79013, вул. С. Бандери 28А, м. Львів, Україна. (032)-258-26-19. orestvk@gmail.com

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ СТАНУ ЕЛЕКТРОДІВ ТЕРМОПАР У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Кочан

Анотація. У статті розглянуто причини виникнення похибок термоелектричних перетворювачів (ТЕП) викликаних деградаційними процесами у електродах термопар (ТП) – похибки від дрейфу функції перетворення і похибки від набутої у процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП. Проаналізовано умови, в яких проявляються ці похибки, а також показано взаємозалежність між цими похибками і проаналізовано можливість визначення похибки ТЕП на місці експлуатації та бездемонтажного діагностування стану електродів ТП. Запропоновано міру деградації електродів ТП – еквівалентний час експлуатації.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, термопара, дрейф функції перетворення, набута неоднорідність термоелектродів, визначення похибки на місці експлуатації, діагностування стану електродів ТП, еквівалентний час експлуатації

THEORETICAL FUNDAMENTALS OF ESTIMATION OF THERMOCOUPLE LEG CONDITIONS DURING OPERATION

O. Kochan

Abstract. The causes of the thermocouple (TC) errors due to degradation processes in TC legs, such as the error due to drift of conversion characteristic and the error due to thermoelectric inhomogeneity of TC legs acquired during operation, are considered in this paper. The conditions under which these errors manifest themselves are analyzed. Also, the interdependence between these errors is shown as well as the opportunity of determining the error of a TC in situ and the nondestructive self-diagnosis of the state of TC legs during operation is considered. The measure of the degree of TC leg degradation such as the equivalent operating time is proposed in this paper.

Keywords: thermocouple, drift of conversion characteristics, acquired thermoelectric inhomogeneity, determination of error in situ, diagnosis of TC leg conditions, equivalent operating time

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ТЕРМОПАР В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

O. Kochan

Аннотация. В статье рассмотрены причины возникновения погрешностей термоэлектрических преобразователей вызванных деградационными процессами в электродах термопар – погрешности из-за дрейфа функции преобразования и погрешности из-за приобретенной в процессе эксплуатации термоэлектрической неоднородности электродов термопар. Проанализированы условия в которых эти погрешности появляются. Также показана взаимозависимость между этими погрешностями и проанализирована возможность определения погрешности термоэлектрического преобразователя на месте эксплуатации и бездемонтажного диагностирования состояния электродов термопар. Предложена мера степени деградации термопары – эквивалентное время эксплуатации.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, термопара, дрейф функции преобразования, приобретённая неоднородность термоэлектродов, определение погрешности на месте эксплуатации, диагностирование состояния электродов термопар, эквивалентное время эксплуатации.

Вступ

Незважаючи на ряд недоліків, термоелектричні перетворювачі (ТЕП), чутливим елементом яких є термопари (ТП), широко використовуються [1]. Одним із їх основних недоліків є деградація електродів ТП при дії високих температур у процесі експлуатації [2 - 4]. Деградація проявляє себе як похибка ТП від дрейфу функції перетворення (ФП) ТП (зміна ФП на протязі часу експлуатації ТП) або як похибка від набутої під час експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП (зміна генерованої термо-е.р.с. в умовах зміни профілю температурного поля при сталих температурах робочого і вільних кінців). У [5] показано, що максимальні похибки від дрейфу ФП ТП та від її набутої термоелектричної неоднорідності рівні. Ця властивість похибок ТП послужила теоретичною основою для розроблення методів визначення похибки ТП [6] та діагностування стану їх електродів [7] під час її експлуатації. Подальше вивчення взаємної залежності обох похибок дає змогу створити методи визначення еквівалентного часу експлуатації ТП.

Стан предметної області

За законом Зеебека [1], номінальну E_i^N та дійсну E_i^R термо-е.р.с. кожної ділянки електродів ТП можна визначити як

$$\begin{aligned} E_i^N &= e_N (T_{i+1} - T_i), \\ E_i &= (e_N + \Delta e_i) \cdot (T_{i+1} - T_i), \end{aligned} \quad (1)$$

де e_N , Δe_i – номінальна питома термо-е.р.с. (термоелектрична здатність) термоелектрода та її похибка; T_{i+1} , T_i – температури на кінцях ділянки термоелектрода.

Відхилення питомої термо-е.р.с. від номінальної Δe_i можна представити як суму початкового Δe_i^{POCH} та набутого у процесі експлуатації Δe_i^{NAB} відхилень, тобто $\Delta e_i = \Delta e_i^{POCH} + \Delta e_i^{NAB}$. Методи корекції початкового відхилення ТП Δe_i^{POCH} розглянуті у [8] та зводяться до визначення похибки ТП перед вводом у експлуатацію. При цьому ні дрейф ФП ТП, ані набута термоелектрична неоднорідність на похибку Δe_i^{POCH} не впливають – вони ще не встигли з'явитися.

рідність на похибку Δe_i^{POCH} не впливають – вони ще не встигли з'явитися.

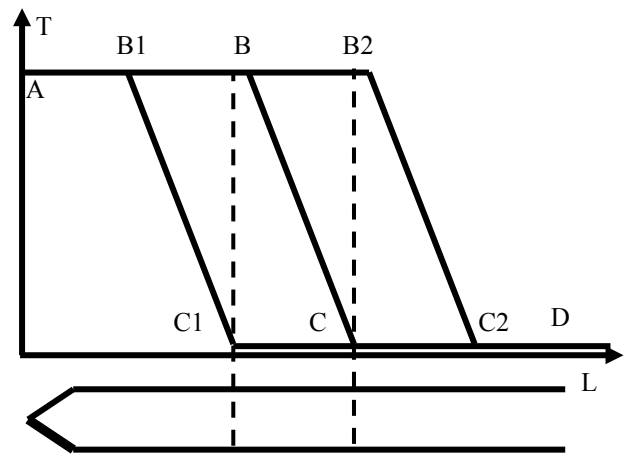


Рис. 1. Розміщення електродів ТП у різних профілях температурного поля.

На рис. 1 показано розміщення електродів ТП при експлуатації. Профіль постійної експлуатації позначено ABCD. Термо-е.р.с., генеровану ТП під час експлуатації, згідно (1), створюють ті її ділянки, що знаходяться у градієнта температури, тобто BC. Інші ділянки термо-е.р.с. не генерують. Деградація, як було показано у [2 - 4], приблизно пропорційна температурі, тому ті ділянки, що знаходяться у зоні АВ, деградує найбільше, а ті ділянки, що знаходяться у зоні CD, не деградує цілком. Але процеси деградації, що проходять у ділянках, які експлуатуються у зоні АВ, згідно (1), на термо-е.р.с. ТП (а значить і на її похибку) не впливають. У зоні BC кожна ділянка електродів ТП експлуатується при своїй температурі та деградує відповідно до цієї температури.

Якщо профіль температурного поля перевести до АВ1С1D, то у зону градієнту В1С1 потраплять ділянки, що експлуатувалися при максимальній температурі та мають максимальні Δe_i^{NAB} . Якщо профіль температурного поля перенести у АВ2С2D, то у зону градієнту В2С2 потраплять ділянки, що експлуатувалися при кімнатній температурі. Ці ділянки не деградували, для них $\Delta e_i^{NAB} \rightarrow 0$.

Тому, як було показано у [5], відхилення Δe_i^{NAB} при сталій вимірюваній температурі може проявляти себе як:

1. похибка дрейфу ФП ТП Δe_{TP}^{DR} , тобто зміна ФП в часі при сталому профілі температурного поля вздовж електродів ТП;

2. похибка Δe_{TP}^{NEOD} від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП – зміни генерованої термо-е.р.с. від зміни профілю температурного поля вздовж електродів при сталій температурі робочого та вільних кінців.

Методи корекції Δe_{TP}^{DR} узагальнено у [9] та розвинуто у [10]. Метод корекції Δe_{TP}^{NEOD} , запропонований у [11], має невисоку ефективність. Більш ефективний метод [12], що передбачає стабілізацію профілю температурного поля вздовж електродів ТП за допомогою додаткових підсистем регулювання температури. Тоді Δe_{TP}^{NEOD} не може себе проявити, тобто $\Delta e_{TP}^{NEOD} \rightarrow 0$. ТЕП, оснащений такими підсистемами регулювання температури, названо у [12] ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП). Але метод [12] передбачає лише стабілізацію профілю температурного поля вздовж електродів ТП. Цілеспрямовані зміни профілю температурного поля дають можливість визначення похибки ТП [6] та діагностування стану її електродів [7] під час експлуатації. Однак для обґрунтування цих методів та оцінки їх похибок слід розвинути теоретичні основи термоелектричних явищ.

Метою даної статті є розвиток теоретичних основ використання властивостей похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності для розроблення методу оцінки стану електродів ТП у процесі експлуатації.

Теоретичні основи взаємодії похибок термодар від дрейфу та від набутої термоелектричної неоднорідності

Якщо проаналізувати експериментальні дослідження процесу зростання похибки ТП при її деградації у процесі експлуатації [2 - 4], стає очевидним, що дрейф ФП ТП Δe_{TP}^{DR} та кожної її i -тої ділянки є функцією двох змінних – температури T_{Ei} та часу τ_{Ei} експлуатації, тоб-

то $\Delta e_i^{DR} = f(T_{Ei}, \tau_{Ei})$. А похибка від набутої термоелектричної неоднорідності Δe_i^{NEOD} проявляє себе лише при зміні профілю температурного поля, тому вона є функцією трьох змінних [5]

$$\Delta e_i^{NEOD} = f(T_{Ei}, \tau_{Ei}, \Delta T_{Di}), \quad (2)$$

де ΔT_{Di} – зміна температури ділянки до значення куди потрапила i -та ділянка термоелектрода після зміни профілю температурного поля.

Але у ТЕП з КПТП температури експлуатації та діапазону рівні, тобто $T_{Di} = T_{Ei}$, то $\Delta T_{Di} \rightarrow 0$ і похибка від набутої термоелектричної неоднорідності електродів ТП себе не проявляє, тобто $\Delta e_i^{NEOD} = 0$. У цьому полягає суть методу стабілізації профілю температурного поля [12]. У [5] показано, що похибки від дрейфу ФП ТП і від набутої термоелектричної неоднорідності електродів є наслідком однієї причини – деградації термоелектродів у процесі експлуатації. Тому між цими похибками існує тісний взаємозв'язок. А їх максимальні значення рівні, тобто $\Delta e_{MAX}^{DR} = \Delta e_{MAX}^{NEOD}$. Тому значення як Δe_i^{DR} так і Δe_i^{NEOD} характеризують стан i -тої ділянки термоелектрода, тобто ступінь її деградації. Через те, що похибка Δe_i^{NEOD} , згідно (2), є функцією трьох змінних, для її зображення необхідно побудувати чотиривимірний графік. Слід відзначити, що функція (2) мусить виконувати наступні умови

$$\Delta e_i^{NEOD} = 0 \left\{ T_{Ei} = 0, \tau_{Ei} = 0 \right. \quad (3)$$

Умови (3) означають, що, якщо ТП не експлуатувалася, то ніяких змін ФП її ділянок не відбувалося.

Для побудови графіка функції (2) по осі абсцис відкладемо температуру експлуатації ділянки T_{Ei} , по осі ординат – температуру діапазону T_{Di} , а по осі аплікату – значення похибки Δe_i^{NEOD} . Дискретним значенням часу експлуатації τ_{Ei} будуть відповідати поверхні, побудовані у вказаних координатах. Узагальнений графік залежності значення похибки Δe_i^{NEOD} ділянки ТП або ТП в цілому від T_{Ei} та T_{Di} для ряду часів експлуатації τ_{Ei} подано на

рис. 2. Кожному часу експлуатації τ_{Ei} відповідає інша поверхня.

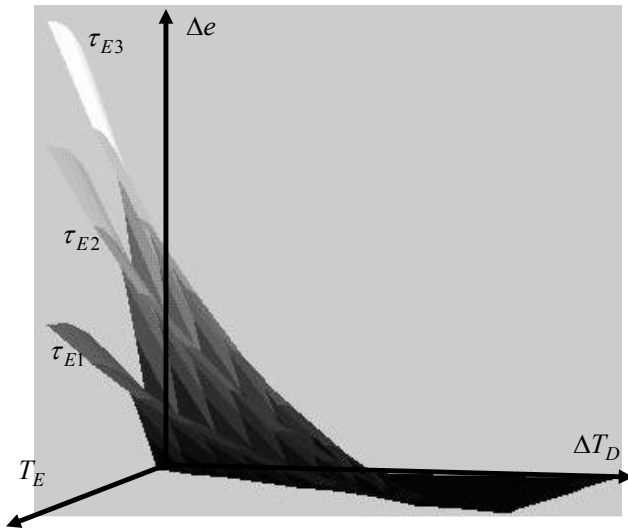


Рис. 2. Залежність похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ділянки ТП від температури експлуатації, температури діапазону та фіксованих часів експлуатації.

Траєкторію дрейфу ФП ділянки ТП (або ФП ТП у цілому) у сталому профілі температурного поля можна відобразити на графіку рис. 2 як вертикальну пряму, що відповідає сталим координатам температури експлуатації T_{Ei} та температури діапазону T_{Di} , причому $T_{Ei} = T_{Di}$, а $\Delta T_{Di} = 0$. Тоді, для ТП в цілому, значення температури експлуатації T_E та температури діапазону T_D стають параметрами кривої, що є функцією однієї змінної – часу експлуатації τ_E . Якщо спроектувати вертикальну пряму дрейфу ФП ТП на площину, отримаємо одномірну функцію дрейфу ФП ТП, показану на рис. 3. Саму у такому режимі працює головна ТП у ТЕП з КПТП.

При зміні профілю температурного поля залежність зміни похибки Δe_{TP}^{NAB} від зміни температури діапазону ΔT_D для фіксованих температури T_E та часу τ_E експлуатації відповідає перерізу поверхні, що відповідає даному поточному часу експлуатації. Графік кривої, що відповідає цьому перерізу подано на рис. 4.

Як видно з рис. 2 і 4, до зміни профілю температурного поля, коли $\Delta T_D = 0$, похибка Δe_i^{NAB} проявляє себе лише як дрейф ФП ТП (точка Δe_{MAX}^{DR}). Коли змістити профіль температурного поля вліво (див. рис. 1, 2) до

AB2C2D, то у зону градієнту температури потраплять ділянки, що не експлуатувалися при високій температурі (постійно перебували при температурі вільних кінців), то очевидно, що тоді $\Delta e_i^{DR} = 0$. Для цього випадку $\Delta T_D \rightarrow \max$, а зміна термо-е.р.с. ТП буде визначатися похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності Δe_i^{NEOD} . Подальше зміщення профілю температурного поля вліво (див. рис. 1, 2) вже не приведе до зміни термо-е.р.с. ТП (у зоні профілю температурного поля будуть і надалі перебувати ділянки ТП, що не деградували), а це означає, що похибка Δe_i^{NEOD} буде мати максимальне значення Δe_{MAX}^{NEOD} .

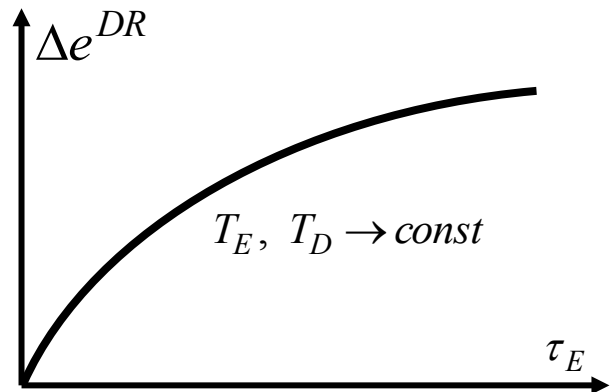


Рис. 3. Узагальнений графік залежності значення похибки дрейфу ФП ТП від часу експлуатації

Усі зміни поточної термо-е.р.с. ТП будуть проходити у межах однієї поверхні (див. рис. 2), яка відповідає поточному часу τ_E експлуатації ТП. Таким чином, як це видно з рис. 4, при зміні профілю температурного поля, проходить поступове витіснення поточної похибки дрейфу ФП ТП Δe_{POT}^{DR} похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності Δe_{POT}^{NEOD} . Тобто можна записати

$$\Delta e_{MAX}^{DR} = \Delta e_{MAX}^{NEOD} = \Delta e_{POT}^{DR} + \Delta e_{POT}^{NEOD} \quad (4)$$

Слід відзначити, що залежність (4) є важливим розвитком висновку, зробленого у [5]. Вона підтверджує тісний зв'язок між похибками від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності як проявами од-

нієї причини – деградації термоелектродів. Ці прояви відрізняються умовами, при яких вони виникають. Але тісний зв'язок між похибками дає змогу розробити методи визначення похибки ТП [6] та діагностування стану їх електродів [7] під час її експлуатації.

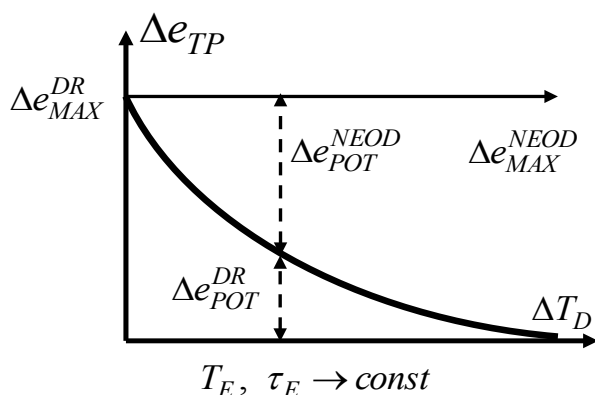


Рис. 4. Залежність похибки ТП від зміни температури діапазону.

Згідно рис. 4, для ТЕП з КПТП поточну похибку Δe_{POT}^{DR} його головної ТП (що вимірює температуру об'єкта) можна визначити тимчасово змістивши профіль температурного поля від ABCD до AB2C2D (див. рис. 1) та вимірявши зміну поточної термо-е.р.с ТП ΔE_{POT} . При цьому похибка Δe_{POT}^{NEOD} витіснить Δe_{POT}^{DR} . А Δe_{POT}^{NEOD} у свою чергу рівна ΔE_{POT} . Тому $\Delta e_{POT}^{DR} = \Delta E_{POT}$. У цьому і полягає суть методу [6] – основі періодичного визначення Δe_{POT}^{DR} у процесі експлуатації ТЕП з КПТП можна вести корекцію дрейфу ФП його головної ТП та забезпечити з високу точність вимірювання температури.

Однак метод визначення похибки ТП [6] не дає змоги під час експлуатації діагностувати стан її електродів по всій довжині. Слід зауважити, що індивідуальні особливості деградації має кожна ділянка ТП. Тому, для підвищення точності прогнозу похибки ТП, уже у [11] було запропоновано коригувати математичні моделі похибок ділянок за результатами визначення похибки ТП. Тоді математичні моделі похибок ділянок стають індивідуальними. Цього можна добитися при поступовій зміні профілю температурного поля. Але спочатку

необхідно визначити міру ступеня деградації електродів ТП.

Міра ступеня деградації ділянок електродів термопар

У загальному мірою ступеня деградації електродів ТП може бути одна з похибок – від дрейфу ФП ТП або від набутої термоелектричної неоднорідності. Але вони характеризують ТП у цілому. А у складних умовах експлуатації можлива пришвидшена деградація деяких ділянок електродів ТП. Крім того, згадані похибки не дають змогу прогнозувати вплив можливих змін профілю температурного поля на похибку вимірювання температури. Вибір як міри деградації електродів ТП температури експлуатації T_{Ei} їх ділянок теж не доцільний – вона не дає змоги врахувати індивідуальні особливості їх деградації.

Тому пропонується для оцінки ступеня деградації електродів ТП вибрати еквівалентний час її експлуатації τ_{EKV} . Він рівний фізичному часу τ_E експлуатації ТП, тобто $\tau_{EKV} = \tau_E$, якщо умови експлуатації близькі до умов експериментальних досліджень змін ФП однотипних ТП під дією основних впливаючих величин (температур експлуатації T_E та діапазону T_D , а також часу експлуатації τ_E). Однак при інших умовах експлуатації $\tau_{EKV} \neq \tau_E$. Якщо умови сприятливі, то $\tau_{EKV} < \tau_E$. Якщо умови жорсткі, то $\tau_{EKV} > \tau_E$. В загальному τ_{EKV} даної ТП повинен вказувати її місце у загальній математичній моделі змін ФП ТП, побудованій на базі результатів експериментальних досліджень, наприклад, [2 - 4]. Тоді τ_{EKV} є комплексною оцінкою стану електродів ТП. Якщо математична модель поєднує дію основних впливаючих величин, τ_{EKV} дає змогу оцінити похибки ТП, що можуть виникнути при її подальшій експлуатації, а також обґрунтувати рішення про доцільність або необхідність заміни ТП або ТЕП.

Метод визначення індивідуальних похибок ділянок електродів термопар у процесі експлуатації

У ТЕП з КПТП профіль температурного поля стабілізований, тому $T_{Ei} = T_{Di}$, а

$\Delta T_{Di} \rightarrow 0$ (тому $\Delta e_{POT}^{NEOD} \rightarrow 0$, тобто набула термоелектрична неоднорідність не може себе проявити). Якщо перемістити профіль температурного поля максимально вліво (у профіль АВ2С2D, див. рис. 1), то $T_{Di} \rightarrow 0$ (точніше до температури вільних кінців). Тоді $\Delta T_{Di} = T_{Ei}$,

а $\Delta e_{POT}^{NEOD} \rightarrow \Delta e_{MAX}^{NEOD}$ згідно (4) та рис. 4. Це означає, що Δe_i^{NEOD} повністю витіснить Δe_i^{DR} . Тоді, згідно (4), можна визначити сумарну похибку дрейфу ФП всіх ділянок головної ТП Δe_{Σ}^{DR} за зміною генерованої ТП термо-е.р.с., яка рівна Δe_{Σ}^{NEOD} .

Однак, якщо перемістити профіль температурного поля вліво (див. рис. 1) у проміжне положення між профілями АВCD та АВ2С2D, то змінюються температури діапазону T_{Di} для всіх ділянок. Але, на відміну від попереднього варіанту, $0 < T_{Di} < T_{Ei}$. Тоді $\Delta T_{Di} \neq T_{Ei}$, а $\Delta e_{POT}^{NEOD} \neq \Delta e_{MAX}^{NEOD}$, тобто Δe_i^{NEOD} не повністю витіснить Δe_i^{DR} .

У такому випадку діє залежність (4). Цей стан ілюструє рис. 5, де показано процес неповного витіснення. Рис. 5 побудовано аналогічно до рис. 4. У рис. 5 прийнято, що профіль температурного поля поступово пересувається вправо (див. рис. 1) кожен раз на одну ділянку. Кожна наступна зміна профілю температурного поля ΔT_{Di} виводить чергову ділянку у зону рівномірного профілю температурного поля АВ (див. рис. 1). Така ділянка перестає, згідно (1), генерувати термо-е.р.с., тому її похибка зникає – вона перестає входити у вимірювану сумарну зміну термо-е.р.с. ТП. Це показано на рис. 5 як зміну нижнього індексу суми. При початковому профілі температурного поля ТЕП з КПТП (профілі експлуатації АВCD) у термо-е.р.с. ТП входять похибки всіх ділянок, на які розбита зона ВС (див. рис. 1) головної ТП, тобто $i = \overline{1, k}$. Після першої зміни профілю температурного поля перша ділянка потрапляє у рівномірний профіль температурного поля, тобто температуру, що відповідає зоні АВ (див. рис. 1). Ця ділянка ТП, згідно (1) перестає генерувати термо-е.р.с., тому індекси наступної суми її не враховують, тобто $i = \overline{2, k}$. При наступних змінах профілю

температурного поля наступні ділянки перестають генерувати термо-е.р.с., що враховують індекси наступних сум. В кінці залишається похибка останньої, k -тої ділянки. Подальше пересування профілю температурного поля втрачає зміст – у зону градієнту потрапляють лише ділянки, які експлуатувалися при температурі вільних кінців, тобто не деградували.

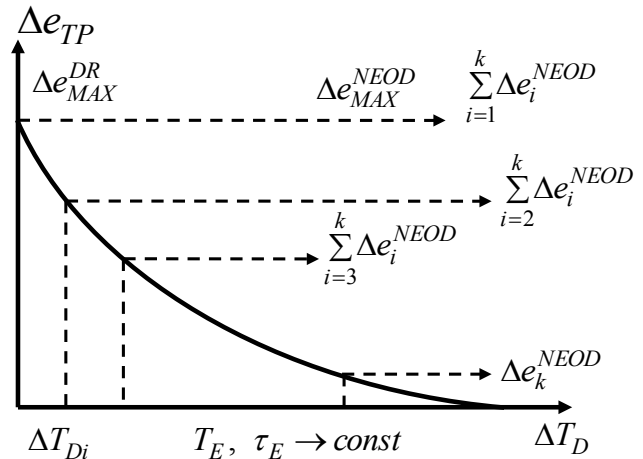


Рис. 5. Графік залежності значення похибки ділянок ТП, що входять у склад ТЕП з КПТП.

Детальніше зміни профілю температурного поля ділянок при пропонованому методі діагностування стану електродів ТП показано на рис. 6. Для спрощення на рис. 6 зміни профілю температурного поля ΔT_{Dj} чітко відповідають k ділянкам, на які розбита ТП. На рис. 6 позначено температури експлуатації окремих ділянок $T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{Ek+1}$ та похибки дрейфу ФП ділянок $\Delta e_1^{DR}, \Delta e_2^{DR}, \dots, \Delta e_{k+1}^{DR}$, що цим температурам відповідають. Нижче за $T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{Ek+1}$ показано зміни температури діапазону $\Delta T_{D1}, \Delta T_{D2}, \dots, \Delta T_{Dk}$, куди потраплять ділянки після змін профілю температурного поля. При цьому прийнято, що

$$\begin{aligned} T_{E1} - T_{E2} &= \Delta T_{D1}, \quad T_{E2} - T_{E3} = \\ &= \Delta T_{D2}, \quad \dots, \quad T_{Ek} - T_{Ek+1} = \Delta T_{Dk}. \end{aligned} \quad (5)$$

Зверху рис. 6 показані також відповідні похибки від набутої термоелектричної неоднорідності.

рідності ділянок ТП $\Delta e_1^{NEOD}, \Delta e_2^{NEOD}, \dots, \Delta e_k^{NEOD}$ для окремих ділянок. Кожна з похибок від набутої термоелектричної неоднорідності відповідає своїй зміні температури діапазону $\Delta T_{D1}, \Delta T_{D2}, \dots, \Delta T_{Dk}$.

Як видно з рис. 6, виміряна термо-е.р.с. одночасно містить похибки всіх ділянок, що потрапляють у зону градієнту профілю температурного поля (див. рис. 1). Тому сумарну термо-е.р.с. E_{Σ}^{PROF1} для першого (прилегло до точки В) профілю температурного поля можна визначити як суму термо-е.р.с. окремих ділянок E_i^{PROF1}

$$E_{\Sigma}^{PROF1} = \sum_{i=1}^k E_i^{PROF1} \quad (6)$$

При цьому термо-е.р.с. кожної ділянки у деякому профілі температурного поля можна визначити як

$$E_i^{PROF} = (e_i + \Delta e_i) \cdot (T_{Ei} - T_{Di}) = (e_i + \Delta e_i) \cdot (T_{Ei} - T_{Ei+1}) = e_i \cdot (T_{Ei} - T_{Ei+1}) + \Delta e_i \cdot (T_{Ei} - T_{Ei+1}) = E_i^{NOM} + \Delta e_i^{NEOD} \quad (7)$$

Як було вказано, при переміщенні профілю температурного поля від профілю ABCD до профілю AB2C2D (див. рис. 1), ділянки, які у даний момент знаходяться справа від поточного профілю температурного поля потрапляють у рівномірне температурне поле ABi. Тому для цих ділянок $(T_{Ei} - T_{Ei+1}) \rightarrow 0$, тобто, згідно (7), для цих ділянок $E_i^{PROF1} \rightarrow 0$. Для ділянок, які експлуатувалися при температурі вільних кінців (у зоні CD профілю температурного поля ABCD) $\Delta e_i = 0$. Тому всі ці ділянки не змінюють термо-е.р.с. ТП під час переміщення профілю температурного поля від T_{E1} до T_{Ek+1} . Таким чином, на основі (6) і (7), можна скласти рівняння, яке буде відображати результат вимірювання термо-е.р.с. ТП E_i^{VYM} при поступовій зміні профілю температурного поля згідно рис. 6

$$E_{\Sigma}^{PROFi} = \sum_i^k (E_i^{NOM} + \Delta e_i^{NEOD}) = E_i^{VYM} \quad (8)$$

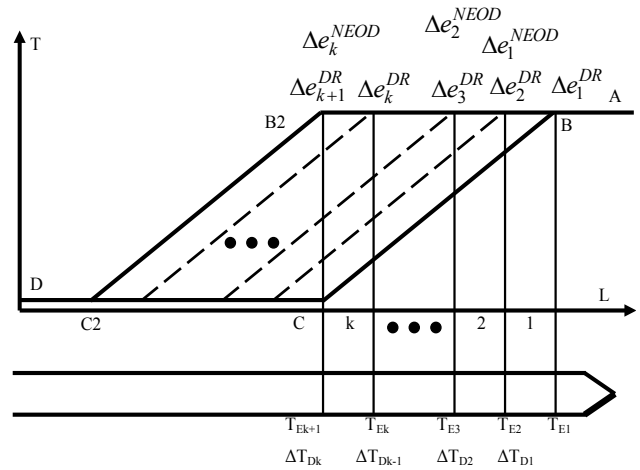


Рис. 6. Профілі температурного поля при діагностуванні термоелектродів.

На основі (8) можна скласти систему рівнянь, яка буде об'єднувати результати вимірювань на протязі всього процесу переміщення профілю температурного поля з профілю ABCD у профіль AB2C2D (див. рис. 1), тобто процес діагностування термоелектродів головної ТП, що входить у ТЕП з КПТП

Систему рівнянь (9) можна переписати у матричній формі

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k (E_i^{NOM} + \Delta e_i^{NEOD}) = E_1^{VYM} \\ \sum_{i=2}^k (E_i^{NOM} + \Delta e_i^{NEOD}) = E_2^{VYM} \\ \dots \\ \sum_{i=k}^k (E_i^{NOM} + \Delta e_i^{NEOD}) = E_k^{VYM} \end{cases} \quad (9)$$

Таку систему дуже зручно рішати методом Гауса.

$$\begin{pmatrix} E_1^{NOM} + \Delta e_1^{NEOD} & E_2^{NOM} + \Delta e_2^{NEOD} & E_3^{NOM} + \Delta e_3^{NEOD} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta e_k^{NEOD} & E_1^{VYM} \\ 0 & E_2^{NOM} + \Delta e_2^{NEOD} & E_3^{NOM} + \Delta e_3^{NEOD} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta e_k^{NEOD} & E_2^{VYM} \\ 0 & 0 & E_3^{NOM} + \Delta e_3^{NEOD} & \dots & E_k^{NOM} + \Delta e_k^{NEOD} & E_3^{VYM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & E_k^{NOM} + \Delta e_k^{NEOD} & E_k^{VYM} \end{pmatrix}$$

У результаті рішення систем рівнянь (9) або (10) отримаємо дійсні поточні значення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності окремих ділянок ТП $\Delta e_1^{NEOD}, \Delta e_2^{NEOD}, \dots, \Delta e_k^{NEOD}$. Як видно з рис. 6, максимальна зміна профілю температурного поля переводить всі ділянки ТП, що експлуа-

тувалися при високих температурах, у зону рівномірного температурного поля, тобто вони перестають генерувати термо-е.р.с. У такому випадку похибка від набутої термоелектричної неоднорідності сягає максимального значення. Однак, згідно (4), максимальні значення похибок від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності рівні. Таким чином, згідно (4), за результатами розрахунку Δe_1^{NEOD} , Δe_2^{NEOD} , ... Δe_k^{NEOD} можна розрахувати поточні значення похибок від дрейфу ФП для всіх ділянок ТП Δe_1^{DR} , Δe_2^{DR} , ... Δe_k^{DR} . Ці значення можна безпосередньо використати для корекції математичних моделей похибок, викликаних індивідуальним характером деградації всіх ділянок електродів ТП.

Метод визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок електродів термопар у процесі експлуатації

Для знаходження еквівалентного часу експлуатації τ_{EKV} головної ТП, що входить у склад ТЕП з КПТП, спочатку визначаємо описаним вище методом максимальне значення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності Δe_{MAX}^{NEOD} , потім, згідно (4), обчислюємо похибку від дрейфу ФП ТП Δe_{MAX}^{DR} . Далі, за допомогою математичної моделі дрейфу ФП ТП обчислюємо прогнозовану похибку Δe_{MM}^{DR} для фізичного часу експлуатації τ_E . Коефіцієнт K_{MM} , що відображає невідповідність математичної моделі похибки ТП реальній деградації електродів, та еквівалентний час експлуатації τ_{EKV} знаходимо за формулами

$$K_{MM} = \Delta e_{MAX}^{DR} / \Delta e_{MM}^{DR}, \quad \tau_{EKV} = K_{MM} \cdot \tau_E. \quad (11)$$

Еквівалентний час експлуатації τ_{EKVi} ділянок головної ТП знаходимо аналогічно. Шляхом рішення системи рівнянь (9) або (10) знаходимо похибки неоднорідності Δe_{MAXi}^{NEOD} всіх ділянок електродів ТП, потім згідно (4) їх похибки від дрейфу ФП ТП Δe_{MAXi}^{DR} . Далі, за допомогою математичної моделі дрейфу ФП ТП обчислюємо прогнозовані похибки ділянок Δe_{MMi}^{DR} для фізичного часу експлуатації τ_E . Коефіцієнти K_{MMi} та еквівалентні часи ек-

сплуатації ділянок τ_{EKVi} знаходимо згідно (11). Значення K_{MMi} або τ_{EKVi} можна використовувати для врахування індивідуальних особливостей деградації ділянок ТП.

Висновки

Проведені теоретичні дослідження дали змогу обґрунтувати можливість використання властивостей похибок ТП від дрейфу її ФП та від набутої термоелектричної неоднорідності як основи для розроблення бездемонтажних методів визначення похибки ТП та оцінки стану її термоелектродів безпосередньо у процесі експлуатації. Метод визначення похибки ТП дає змогу створювати індивідуальні моделі похибки ТП в цілому та підвищити точність корекції її похибки в умовах сталого профілю температурного поля, формованого ТЕП з КПТП. Метод оцінки стану електродів ТП дає змогу обґрунтовано вирішити питання про доцільність або необхідність заміни ТП або ТЕП у цілому. Крім того, цей метод дає змогу оцінити не лише похибку ТП в цілому, а і визначити похибки окремих її ділянок. Це у свою чергу, дає змогу створювати індивідуальні моделі похибок окремих ділянок ТП та підвищити точність корекції її похибки за методом, запропонованим у [11], тобто в умовах змін профілю температурного поля.

Список використаної літератури

- [1]. Entsyklopediya termometriyi / Ya.Lutsyk, L. Bunyak, Yu. Rudavs'kyu, B. Stadnyk. – L'viv: NU «L'vivs'ka politehnika», 2003. – 428 s. (in Ukrainian).
- [2]. Rogelberg I. Izmeneniya termoelektricheskoy sily provolok iz khromelya i alyumelya pri nagreve na vozdukh pri 800°S prodolzhitelnostyu do 10000 ch. Tom III. / Rogelberg I., Pigidina N., Pokrovskaya G. i dr. – Sb. Issledovaniye splavov dlya termopar. – Trudy instituta Giprotsvetmetobrabotka. – Moskva: Metallurgiya. 1969. (in Russian).
- [3]. Datchiki dlya izmereniya temperatury v promyshlennosti / G.V.Samsonov, A.I.Kits, O.A.Kyuzdeni i dr. – Kiev.: Naukova dumka, 1972. – 223 s. (in Russian).
- [4]. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis /

- Kortvelyessy L. – Vulkan-Verlag, Essen, 1981. S. – 498.
- [5]. Kochan O.V. Otsinka maksimal'noyi pokhybky neodnorodnykh termopar / O.V. Kochan, R.V. Kochan, V.Ya. Yaskilka, N.M. Vasyl'kiv // Visnyk Ternopil's'koho Derzhavnogo Tekhnichnoho Universytetu. – 2007. – N. 1 - S. 122-129. (in Ukrainian).
- [6]. Pat. 102981 Ukrayina, MPK G01K 7/02. Sposib korektsiyi pokhybky holovnoyi termopary / O.V.Kochan, R.V.Kochan; vlasnyk zayavnyky. N a201213268; zayavl. 21.11.2012; opublik. 10.08.13, Byul. N 16. (in Ukrainian).
- [7]. Pat. 104952 Ukrayina, MPK G01K 13/00. Sposib samodiahnostyky termopar na misti ekspluatatsiyi ta prystryi dlya yoho realizatsiyi / O.V.Kochan; vlasnyk zayavnyk. N a201213269; zayavl. 21.11.2012, opublik. 27.08.13, byul. N 16 (in Ukrainian).
- [8]. Sachenko A.A. Sovershenstvovaniye metodov izmereniya temperatury / A.A. Sachenko. E.Ya. Tverdyy. – K.: Tekhnika. 1983. – 104 s. (in Russian).
- [9]. Sachenko A.A. Razrabotka metodov povysheniya tochnosti i sozdaniye sistem pretsizionnogo izmereniya temperatury dlya promyshlennykh tekhnologiy: dis. doktora tekhn. nauk : 05.11.16 / Sachenko Anatoliy Alekseyevich. – Leningrad. 1988. – 278 s. (in Russian).
- [10]. Turchenko V.O. Neyromerezhevi metody i zasoby pidvyshchennya efektyvnosti dystrybutyvnykh merezh zboru ta obrobky sensorykh danykh: avtoref. dys. na zdotuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.13.13 «Obchyslyval'ni mashyny, systemy, merezhi» / V.O. Turchenko. – L'viv, 2001. – 16 s. (in Ukrainian).
- [11]. Vasyl'kiv N.M. Pidvyshchennya tochnosti vymiryuvannya temperatury termoparamy v protsesi ekspluatatsiyi: dysertatsiya na zdotuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.11.04 «Prylady ta metody vymiryuvannya teplovykh velychyn»/ N.M. Vasyl'kiv - L'viv, 2010. – 158 s. (in Ukrainian).
- [12]. Pat. 97464 Ukrayina, MPK G01K 15/00. Termoelektrychnyy peretvoryuvach / Kochan O.V., Kochan R.V. - zayavl. 22.02.2007. (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 28.08.2017 р.

UDC 536.532

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109115>

THEORETICAL FUNDAMENTALS OF ESTIMATION OF THERMOCOUPLE LEG CONDITIONS DURING OPERATION

O. Kochan

Research Institute of Intelligent Information Systems of Ternopil National Economic University, 46004, 3 Peremoha Square, Ternopil, Ukraine, (0352) 43-6038.

Department of measuring information technologies at Lviv polytechnic national university, 79013, S. Bandera str. 28A, Lviv, Ukraine. (032)-258-26-19. orestvk@gmail.com

Summary

The goal of this paper is to develop the theoretical basis for the use of the properties of errors due to drift of thermocouple (TC) conversion characteristic (CC) and due to acquired during operation thermoelectric inhomogeneity of TC legs to develop the method for evaluating the state of TC legs during operation. The paper considers the influence of degradation processes in TC legs on the appearance of

the error due to drift and the error due to inhomogeneity. The conditions in which these errors manifest themselves are analyzed. This makes it possible to determine the variables on which these errors depend. It is shown that the error due to drift manifests itself as a change in the emf developed by the TC with time in unchanged operating conditions. Thus, this error is a function of time. The error due to inhomogeneity manifests itself when the temperature field along TC legs changes even at constant temperatures of the measuring and reference junctions. Thus, this error is a function of the operating temperature, operating time and the instantaneous temperature at which a certain measurement is carried out. The paper reveals the interdependence between these errors and investigates the process of gradual substitution of the error due to drift by the error due to inhomogeneity. The theoretical basis of the interaction of the TC errors due to drift and due to inhomogeneity studied to create the methods for determining the error of TCs in situ and diagnosing the state of TC legs during operation. On the basis of the studies carried out in this paper, the method of determination of the errors of individual sections of TC legs during operation is suggested. There is proposed the measure of degradation of TC legs. This measure is the equivalent operating time. The method of determination of the equivalent operating time for TC sections during operation is proposed.

Keywords: thermocouple, drift of conversion characteristics, acquired thermoelectric inhomogeneity, determination of error in situ, diagnosis of TC leg conditions, equivalent operating time

УДК 536.532

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109115>

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ СТАНУ ЕЛЕКТРОДІВ ТЕРМОПАР У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Кочан

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

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Реферат

Метою даної статті є розвиток теоретичних основ використання властивостей похибок від дрейфу функції перетворення (ФП) термопари (ТП) та від набутої термоелектричної неоднорідності для розроблення методу оцінки стану електродів ТП у процесі експлуатації. У статті розглянуто вплив деградаційних процесів у електродах ТП на появу похибки від дрейфу функції перетворення і похибки від набутої у процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів ТП. Проаналізовано умови, в яких проявляються ці похибки. Це дало змогу визначити величин від впливу яких залежать ці похибки. Показано, що похибка від дрейфу функції перетворення проявляється як зміна генерованої термопарою е.р.с. в часі у незмінних умовах експлуатації. Тобто ця похибка є функцією часу. Похибка від набутої у процесі експлуатації неоднорідності проявляється при змінах температурного поля вздовж електродів ТП навіть при постійних температурах робочого та вільних кінців. Таким чином ця похибка є функцією температури експлуатації, часу експлуатації і поточної температури, при якій проводиться вимі-

рювання. А також показано взаємозалежність між цими похибками і досліджено процес поступового витіснення похибки від дрейфу похибкою від неоднорідності. Досліджено теоретичні основи взаємодії похибок термопар від дрейфу та від набутої термоелектричної неоднорідності для створення методів визначення похибки ТЕР на місці експлуатації та бездемонтажного діагностування стану електродів ТП. На базі проведених у статті досліджень запропоновано метод визначення індивідуальних похибок ділянок електродів термопар у процесі експлуатації. Запропоновано міру деградації електродів ТП – еквівалентний час експлуатації. Запропоновано метод визначення еквівалентного часу експлуатації ділянок електродів термопар у процесі експлуатації.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, термопара, дрейф функції перетворення, набута неоднорідність термоелектродів, визначення похибки на місці експлуатації, діагностування стану електродів ТП, еквівалентний час експлуатації