

КАЛІБРУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

В.П. Бабак*, член-кор. НАН України, **С.І. Ковтун****, канд.техн.наук
Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна.
E-mail: vdoe@ukr.net; sveta.kovtun@ukr.net

Розглянуто перспективи та наведено особливості застосування термоелектричних сенсорів теплового потоку в системах діагностування теплового стану електричних машин. Вдосконалено спосіб калібрування сенсорів шляхом реалізації поетапної процедури, в результаті чого проведення перевірки не потребує демонтажу сенсора та може здійснюватися за місцем експлуатації. Визначено поправку для корекції коефіцієнта перетворення в умовах експлуатації, яка по суті є характеристикою сенсора теплового потоку і залежить від конструктивних, технологічних та теплофізичних параметрів конкретного екземпляра сенсора, поставленого у характерні для об'єкта дослідження умови теплообміну. Бібл. 8, рис. 1.

Ключові слова: термоелектричний сенсор теплового потоку, коефіцієнт перетворення, контроль теплових параметрів.

Діагностування теплового стану електричних машин є одним із пріоритетних завдань при забезпеченні безаварійного та ефективного функціонування, адже їхня робота, як і будь-яких перетворювачів енергії, пов'язана із втратами енергії. Теплота, що виділяється внаслідок таких втрат, спричиняє підвищення температури окремих вузлів. При підвищенні температури відбувається прискорення процесів старіння та погіршення властивостей діелектриків, що врешті-решт призводить до теплового або електричного пробою, критичні значення температури впливають на роботу підшипників, колекторно-щіткових вузлів тощо [1, 5, 8].

Для діагностування теплового стану електричних машин одним із першорядних інформативних параметрів є значення теплового потоку, оскільки температурних даних недостатньо для визначення характеристик середовища. Вимірювання теплового потоку надає якісно нову інформацію стосовно перебігу теплового процесу, адже на відміну від температури, яка є скалярною величиною, тепловий потік є величиною векторною, яка окрім числового вираження має напрямок, що дає змогу аналізувати не лише інтенсивність теплообміну, а й направленість перебігу процесу. В системах керування зі зворотним зв'язком перевагою застосування засобів вимірювання безпосередньо теплового потоку є те, що при контролі параметрів об'єкта за температурою фіксується лише результат теплової дії, а визначення теплового потоку дає змогу виявити вплив збурення на початковій стадії, прогнозувати його розвиток та своєчасно коригувати режим роботи машини, щоб уникнути критичного підвищення температури відповідальних елементів конструкції [6, 7]. Тому є очевидною доцільність застосування сенсорів теплового потоку під час діагностування теплового стану електричних машин за тепловим потоком.

Сенсори теплового потоку, що розглядаються в рамках даної публікації, є термоелектричними перетворювачами виду допоміжної стінки, принцип дії яких ґрунтується на ефекті Зеебека [4]. Елементарна теорія таких сенсорів побудована на розв'язанні першої крайової задачі теплопровідності у стаціонарній постановці для необмеженої пластини, згідно з якою густина теплового потоку у будь-якому перетині пластини пропорційна різниці температури на її протилежних поверхнях. Реалізація сенсора виду допоміжної стінки передбачає два обов'язкових елементи: власне "допоміжну стінку" та вимірювач різниці температури, реалізований як диференціальна термопара. Чутливий елемент складається з певної кількості (від декількох десятків до декількох тисяч) ідентичних термоелементів, з'єднаних послідовно за електричним сигналом, що генерується, та паралельно – за напрямком теплового потоку. Кожен термоелемент представляє собою виток спіралі з металевого термоелектродного дроту, частина якого гальванічно вкрита іншим термоелектричним матеріалом.

Достовірність діагностування теплового стану електричних машин за тепловим потоком забезпечується калібруванням відповідних засобів вимірювання. Калібрування сенсорів теплового потоку полягає у визначенні коефіцієнта перетворення, який є величиною, оберненою до чутливості та відповідає величині вхідного теплового потоку, що спричинює генерування чутливим елементом сенсора вихідного електричного сигналу в 1 мВ.

Калібрування термоелектричних сенсорів проводять абсолютним методом із застосуванням спеціального обладнання та еталонного джерела теплової енергії [3], за допомогою яких у стаціонарному тепловому режимі підтримують тепловий потік незмінним у часі та однаковим по всій поверхні сенсора $q(x,y,t)=const$. Ця процедура здійснюється у лабораторних умовах і потребує демонтажу сенсора, що в ряді практичних реалізацій, як у випадку застосування сенсорів в електричних машинах, є ускладненим або ж неможливим взагалі.

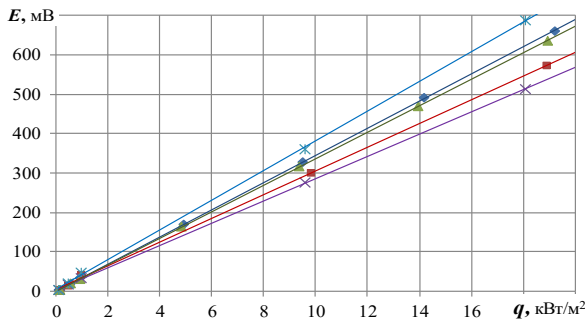
Метою роботи є вдосконалення способу калібрування термоелектричних сенсорів теплового потоку шляхом визначення величини поправки на коефіцієнт перетворення сенсорів, що не потребує демонтажу сенсора для проведення процедури повірки та забезпечує підвищення точності вимірювання поверхневої густини теплового потоку у разі експлуатації за рахунок корекції коефіцієнта перетворення в умовах, відмінних від лабораторних.

Теоретична залежність величини вихідного сигналу сенсора, яка відповідає певній величині вхідного теплового впливу, іншими словами – чутливість термоелектричного сенсора теплового потоку, визначається за формулою

$$\frac{E}{q} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_{\text{бм}}) \cdot h}{\chi}, \quad (1)$$

де E – значення вихідного сигналу сенсора, мВ; α_1 – термоелектрична чутливість матеріалу термоелектродного дроту, мВ/К; $\alpha_{\text{бм}}$ – термоелектрична чутливість біметалічної ділянки термоелемента (термоелектродного дроту з гальванічним покриттям), мВ/К; h – висота термоелемента, м; χ – параметр, що відображає співвідношення теплопровідності, електропровідності матеріалів елементів сенсора та їхніх геометричних параметрів (площ перерізу термоелементів та чутливої зони, заповненої термоелементами); q – питоме значення теплового потоку (поверхнева густина теплового потоку), Вт/м².

Величини, що входять до правої частини виразу (1), з огляду на особливості технологічного процесу виготовлення термоелементів, мають розкид значень, а отже властиві для конкретного екземпляра сенсора. Як



приклад, на рисунку показано графік, побудований за експериментальними даними дослідження залежності вихідного сигналу партії однотипних сенсорів, виконаних на базі константан-нікелевої спіралі термоелементів і компаунда зі смоли УП-610 з наповненням порошкоподібним корундом у формі диска діаметром 60 мм, товщиною 1,5 мм і ефективним коефіцієнтом теплопровідності 1,5 Вт/(м·К), від значень підведеної густини теплового потоку. З представлених результатів випливає, що розкид значень чутливості в партії однотипних сенсорів може сягати 30%. Це вимагає проведення процедури індивідуального калібрування кожного сенсора, що вводиться в експлуатацію.

Таке калібрування дає змогу визначати коефіцієнт перетворення з максимальною точністю за рахунок підведення теплової потужності відомого значення та вимірювання значень термоелектрорушійної сили із застосуванням прецизійних засобів вимірювання напруги. Під час експлуатації внаслідок процесів старіння відбувається зміна коефіцієнта перетворення, що потребує періодичної повірки засобу вимірювання.

У відповідності до сформульованої мети авторами вдосконалено спосіб калібрування шляхом коригування коефіцієнта перетворення сенсора в умовах експлуатації внесенням поправки. Спосіб реалізується поетапно. На першому етапі проводять калібрування сенсорів теплового потоку в стаціонарних умовах шляхом розташування сенсора на термостатованому тепловідводі, підведення до його теплосприймальної поверхні теплової потужності нормованого значення, вимірюванні термоелектрорушійної сили, що генерується при цьому сенсором. Розраховують коефіцієнт перетворення сенсора за формулою

$$K_0 = q / E \quad (2)$$

та записують його з індексом «0», що відповідає початковим (стаціонарним) умовам його визначення.

На другому етапі сенсор розташовують на об'єкті дослідження, при цьому умови теплообміну можуть значно відрізнятись від умов, що створюють під час процедури калібрування сенсора, проведеної на першому етапі. Для створення теплового потоку крізь сенсор за відсутності еталонного джерела теплової дії до його вихідних контактів підводять електричну енергію змінного струму через роздільну ємність. Електрична енергія розсіюється на внутрішньому опорі сенсора і, перетворившись на теплову, відводиться до теплостоку. Тепловий потік спричинює на виводах сенсора електрорушійну силу постійного струму, значення якої після проходження через RC-фільтр вимірюють прецизійним цифровим вольтметром.

Таким чином, застосовуючи методи частотної фільтрації, визначають змінну та сталу складові напруги на виводах сенсора та розраховують величину A за формулою

$$A = \Delta E / W, \quad (3)$$

де $\Delta E = E_2 - E_1$, E_1 – значення термоелектрорушійної сили, виміряне без пропускання змінного струму через сенсор, мВ; E_2 – значення постійної складової напруги, визначене у разі пропускання змінного струму через сенсор, мВ; $W = I \cdot U$ – потужність змінного струму, що підводиться до сенсора, Вт; I – значення величини змінного струму, що пропускається через сенсор; U – значення змінної складової напруги, визначене у разі пропускання змінного струму через сенсор.

Величина A є характеристикою сенсора теплового потоку, яка залежить від конструктивних, технологічних та теплофізичних параметрів конкретного екземпляра сенсора, що знаходиться у певних умовах теплообмі-

ну, характерних для об'єкта дослідження. Коефіцієнт перетворення сенсора залежить від тих самих параметрів і також є індивідуальною характеристикою конкретного екземпляра сенсора теплового потоку. Отже, справедливим є твердження, що відношення коефіцієнта перетворення сенсора до величини A є величиною сталою

$$K_0 / A = B = \text{const} . \quad (4)$$

У роботі [2] запропоновано цю властивість використовувати для підвищення продуктивності калібрування партії сенсорів у лабораторних умовах із використанням спрощеної калібрувальної апаратури. У даній роботі запропоновано цю властивість використовувати для компенсації зміни коефіцієнта перетворення сенсора в процесі експлуатації.

Під час експлуатації сенсорів теплового потоку можуть відбуватися процеси старіння, окиснення чи дифузії атомів термоелектродних матеріалів, що призводить до зміни як коефіцієнта перетворення сенсора, так і величини A , причому зміни цих величин відбуваються одночасно й пропорційно, а отже їхнє відношення залишається сталим.

На наступному етапі та всіх подальших (i -их етапах) для визначення коефіцієнта перетворення сенсора в умовах експлуатації достатньо провести визначення величини A за описаною вище послідовністю дій без демонтажу сенсора та розрахувати коефіцієнт перетворення сенсора за формулою

$$K_i = B \cdot A_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

де K_i – коефіцієнт перетворення сенсора, отриманий при калібруванні на i -му етапі; B – стала сенсора, визначена при його встановленні на об'єкті дослідження одразу після калібрування на першому етапі; A_i – величина, що відображає можливі зміни параметрів сенсора на i -му етапі в процесі експлуатації; n – порядковий номер i -го етапу визначення коефіцієнта перетворення сенсора в умовах експлуатації.

Слід зазначити, що такий алгоритм визначення коефіцієнта перетворення сенсора в умовах експлуатації може реалізовуватися через довільний проміжок часу експлуатації (наприклад, при закінченні міжповірного інтервалу чи у разі необхідності перевірки стабільності метрологічних характеристик у часі) будь-яку кількість разів з будь-якою періодичністю.

Експериментальні дослідження проводилися на сенсорах, які були встановлені на поверхні огорожувальних конструкцій, при цьому штучно змінювалася температура поверхні, на якій встановлювалися сенсори. Дослідження, проведені впродовж трьох років, показали, що за рахунок процесів старіння коефіцієнт перетворення термоелектричних сенсорів змінюється на 5–15% у залежності від температури експлуатації.

Отже, введенням поправки на коефіцієнт перетворення сенсора теплового потоку, що поставлений у певні умови теплообміну, характерні для об'єкта дослідження, враховується зміна параметрів сенсора теплового потоку в процесі експлуатації, що дає змогу підвищити точність вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

Висновки. Застосування запропонованого авторами вдосконаленого способу калібрування термоелектричних сенсорів теплового потоку дає змогу підвищити точність вимірювання поверхневої густини теплового потоку шляхом проведення калібрування у два етапи та введенням поправки на коефіцієнт перетворення сенсора теплового потоку, яка враховує зміну коефіцієнта перетворення в процесі експлуатації та через особливості теплообміну на об'єкті дослідження.

Визначення поправки, яка відображає зміну параметрів сенсора теплового потоку та має однозначний зв'язок із його коефіцієнтом перетворення, дає змогу проводити періодичну повірку сенсорів безпосередньо на об'єкті дослідження без його демонтажу з будь-якою періодичністю.

1. Грищенко М.А. Анализ теплового состояния обмотки якоря тягового электродвигателя постоянного тока. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2009. № 3. С. 73-78.

2. Громов Г.Г. Способ калибровки термоэлектрических датчиков тепловых потоков. Патент 2577389 RU. 2016.

3. Артемчук В.О., Білан Т.Р., Блінов І.В. Теоретичні та прикладні основи економічного, екологічного та технологічного функціонування об'єктів енергетики. Київ: Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, 2017. 312 с.

4. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Вороб'єв Л.И. Теплометрия: теория, метрология, практика. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока. Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017. 438 с.

5. Howey D.A., Childs P.R.N., Holmes A.S. Air-gap convection in rotating electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. No 3. Pp. 1367–1375.

6. Jussila H.K., Mityakov A.V., Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Pyrhönen J. Local Heat Flux Measurement in a Permanent Magnet Motor at No Load. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60. Issue 11. Pp. 4852–4860.

7. Lartz D.J., Cudney H.H., Diller T.E. Heat flux measurement used for feedforward temperature control. Proc. 10th Inter. *Heat Transfer Conference*. Brighton, UK, 1994. Vol. 2. Pp. 261-266.

8. Pontt J. Diagnostics of Insulation Condition and Risk Evaluation of Electrical Machines Employed in Mining Application. *IEEE Conferences Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2009. Houston, TX, USA. Pp. 1–3.

КАЛИБРОВКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.П. Бабак, член-корр. НАН Украины, **С.И. Ковтун**, канд.техн.наук

Институт технической теплофизики НАН Украины,

ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина.

E-mail: vdoe@ukr.net; sveta_kovtun@ukr.net

Рассмотрены перспективы и особенности применения термоэлектрических сенсоров теплового потока в системах диагностики теплового состояния электрических машин. Усовершенствован способ калибровки сенсоров путем реализации поэтапной процедуры, в результате чего проведение поверки не требует демонтажа сенсора и может осуществляться на месте эксплуатации. Определена поправка для уточнения коэффициента преобразования в условиях эксплуатации, которая по сути является характеристикой сенсора теплового потока и зависит от конструктивных, технологических и теплофизических параметров конкретного экземпляра сенсора, поставленного в характерные для объекта исследования условия теплообмена. Библ. 8, рис. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический сенсор теплового потока, коэффициент преобразования, контроль тепловых параметров.

CALIBRATION THERMOELECTRIC HEAT FLUX SENSOR IN THE DIAGNOSTIC SYSTEM OF THERMAL STATE OF ELECTRIC MACHINES

V.P. Babak, S.I. Kovtun

Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine,

str. Zheliabova, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: vdoe@ukr.net; sveta_kovtun@ukr.net

Prospects and specific features of the application of thermoelectric heat flow sensors in the systems of diagnostics of the thermal state of electric machines are considered. A method for calibrating sensors is improved by implementing a step-by-step procedure, in resulting the verification procedure without demounting the sensor and can be carried out at the site of operation. The correction factor for the refinement of the conversion factor under operating conditions was determined. The correction is a characteristic of the heat flow sensor and depends on the design, technological and thermophysical parameters of a particular sensor instance that was placed to the heat exchange conditions characteristic for the study object. References 8, figure 1.

Key words: thermoelectric heat flux sensor, conversion factor, monitoring of thermal parameters.

1. Grishchenko M.A. Analysis of the thermal state of the winding of the armature of the traction electric motor of direct current. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia*. 2009. No 3. Pp. 73-78. (Rus)
2. Gromov G.G. Method for calibrating thermoelectric heat flow sensors. Patent 2577389 RU. 2016. (Rus)
3. Artemchuk V.O., Bilan T.R., Blinov I.V. Theoretical and applied bases of economic, ecological and technological functioning of energy objects. Kyiv: Department of Physical and Technical Problems of Power Engineering NAS of Ukraine, 2017. 312 p. (Ukr)
4. Grischenko T.G., Dekusha L.V., Vorobev L.I. Heatmetry: theory, metrology, practice. Book.1: Methods and means of heat flow measuring. Kyiv: Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, 2017. 312 p. (Rus)
5. Howey D.A., Childs P.R.N., Holmes A.S. Air-gap convection in rotating electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. No 3. Pp. 1367–1375.
6. Jussila H.K., Mityakov A.V., Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Pyrhönen J. Local Heat Flux Measurement in a Permanent Magnet Motor at No Load. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60. Issue 11. Pp. 4852 – 4860.
7. Lartz D.J., Cudney H.H., Diller T.E. Heat flux measurement used for feedforward temperature control. Proc. 10th Inter. *Heat Transfer Conference*. Brighton. UK, 1994. Vol. 2. Pp. 261-266.
8. Pontt J. Diagnostics of Insulation Condition and Risk Evaluation of Electrical Machines Employed in Mining Application. IEEE Conferences *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. 2009. Houston, TX, USA. Pp. 1-3.

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 01.08.2018