

Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры

СУ ЦЗЮНЬ¹, О. В. КОЧАН², В. С. ЙОЦОВ³

¹ School of Computer Science, Hubei university of technology, Hubei, China, e-mail: sjhosix@gmail.com

² Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина, e-mail: orestvk@gmail.com

³ Университет библиотековедения и информационных технологий, София, Болгария, e-mail: bgimcssmc@gmail.com

Проанализировано влияние погрешности термоэлектрических преобразователей, обусловленной термоэлектрической неоднородностью электродов термопар, приобретенной во время длительной эксплуатации, на результат измерений температуры с использованием известных методов коррекции. Намечены пути разработки новых методов коррекции и компенсации погрешности.

Ключевые слова: термопара, приобретенная термоэлектрическая неоднородность, коррекция временного дрейфа функции преобразования термопар.

One of the most dangerous errors of thermocouples is the error caused by thermoelectric inhomogeneity acquired during long term operation of thermoelectrodes. The properties of that error the known methods of conversion characteristic drift correction are considered. The improved to decrease the impact on temperature measurements results are proposed.

Key words: thermocouple, acquired thermoelectric inhomogeneity, correction of time drift of thermocouples' conversion function.

В [1] было показано, что игнорирование погрешности термоэлектрических преобразователей (ТЭП) из-за приобретенной термоэлектрической неоднородности электродов в процессе длительной эксплуатации может привести к значительным погрешностям измерений температуры. Использование структурно-алгоритмических методов коррекции погрешностей ТЭП, разработанных в [2—5], не всегда дает положительный эффект. Необходимо исследовать существующие методы снижения погрешности измерений температуры с помощью ТЭП для выявления их защищенности от влияния указанной погрешности [6—8], а также рассмотреть пути их совершенствования.

Погрешность из-за приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар. Согласно [1], если каждый электрод ТЭП разбить на i элементарных участков, номинальные значения удельной термоЭДС (ТЭДС) которых равны $e_{\text{ном}i}$, а ее отклонения — $\Delta e_{\text{ном}i}$, то ТЭДС i -го участка с температурами T_i , T_{i-1} на концах можно определить как

$$E_i = (e_{\text{ном}} + \Delta e_{\text{ном}i})(T_i - T_{i-1}). \quad (1)$$

Преобразовав (1) при стремлении разницы $T_i - T_{i-1}$ к нулю, можно получить суммарную ТЭДС каждого термоэлектрода

$$E_{\Sigma} = \int_0^{t_{\text{PK}}} (e_{\text{ном}} + \Delta e_{\text{ном}i}) dT = E_{\Sigma_{\text{ном}}} + \int_0^{t_{\text{PK}}} \Delta e_{\text{ном}i}(T) dT, \quad (2)$$

где T — текущее значение температуры вдоль электродов ТЭП; t_{PK} — температура рабочего конца; $E_{\Sigma_{\text{ном}}}$ — номинальное значение ТЭДС.

Последний член равенства (2) представляет погрешность ТЭДС электрода ТЭП. Для перехода от интегрирования по температуре T к интегрированию по длине L электродов введем градиент профиля температурного поля вдоль электродов ТЭП $\nabla t = \partial T / \partial L$. В таком случае, преобразовав (2), определим погрешность ΔE_{Σ} в температурном поле эксплуатации:

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^{t_{\text{PK}}} \Delta e_{\text{ном}i}(T) dT = \int_0^{l_m} \Delta e_{\text{ном}i}(T) \frac{\partial T}{\partial L} dL = \int_0^{l_m} \Delta e_{\text{ном}i}(T) \nabla t dL, \quad (3)$$

где l_m — максимальная длина термоэлектрода.

Таким образом, ТЭДС при длительной эксплуатации ТЭП зависит от градиента профиля температурного поля вдоль термоэлектродов ∇t . Это обусловлено тем, что отклонение ТЭДС каждого участка ТЭП является функцией многих переменных, из которых можно выделить три главных: продолжительность τ и температуру $T_{\text{э}}$ эксплуатации, а также температуру $T_{\text{д}}$ диапазона, в который участок ТЭП попадает в результате изменения профиля температурного поля вдоль термоэлектродов, т. е. $\Delta e_{\text{ном}i} = f(\tau, T_{\text{э}}, T_{\text{д}})$ [1].

Классификация методов коррекции погрешностей термопар. Для классификации известных методов снижения погрешностей ТЭП (из-за временного дрейфа и приобретенной неоднородности) выделим в градиенте ∇t постоянную $\nabla t_{\text{=}}$ и переменную $\nabla t_{\text{=}}$ составляющие:

$$\nabla t = \nabla t_{\text{=}} + \nabla t_{\text{=}}. \quad (4)$$

Преобразуем (3) с учетом (4):

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^{l_M} \Delta e_{\text{норм}i}(T) \nabla t_{\Sigma} dL + \int_0^{l_M} \Delta e_{\text{норм}i}(T) \nabla t_{\Sigma} dL. \quad (5)$$

Слагаемые в (5) характеризуют деградационные процессы, происходящие в электродах ТЭП: первое соответствует временному дрейфу, а второе — погрешности от приобретенной неоднородности. При этом можно выделить пять вариантов коррекции погрешностей ТЭП.

1. Если $\Delta e_{\text{норм}i} \rightarrow 0$, то, очевидно, $\Delta E_{\Sigma} \rightarrow 0$. Это значит, что при отсутствии деградационных процессов ни дрейфа, ни приобретенной неоднородности нет, слагаемые в (5) равны нулю, изменения функции преобразования (ФП) ТЭП отсутствуют. Такой случай соответствует эксплуатации ТЭП при низких (комнатных) температурах. Начальный разброс ФП определяется относительно небольшой неоднородностью термоэлектродов [9].

2. Если $\nabla t_{\Sigma} \rightarrow 0$, то погрешность ТЭП ΔE_{Σ} определяется первым слагаемым в (5). Данный случай соответствует эксплуатации ТЭП в стационарном температурном поле, при этом $\Delta e_{\text{норм}i} = f(\tau, T_{\Sigma} = T_d)$, т. е. деградационные процессы в термоэлектродах проявляются исключительно в виде временного дрейфа ФП ТЭП. Тогда без ограничений можно использовать все методы коррекции дрейфа, обобщенные в [2—5]: периодическую поверку с помощью ТЭП (эталонной или принятой в качестве опорной для данного технологического оборудования [10, 11]) или калибровку с помощью температурного калибратора [12, 13]. Для снижения количества проверок целесообразно применить индивидуальный прогноз погрешности дрейфа ФП ТЭП, используя математическую модель, построенную по результатам периодической поверки или калибровки [14]. Однако следует отметить, что для выполнения условия $\nabla t_{\Sigma} \rightarrow 0$ недостаточно неизменности профиля температурного поля. Периодическую поверку ТЭП в этом случае следует выполнять не в поверочной лаборатории, а на месте эксплуатации [10, 11] или в специальной печи, имитирующей температурное поле объекта [15].

3. Если допустить, что деградационные процессы в термоэлектродах ТЭП не зависят от температуры: т. е. $\Delta e_{\text{норм}i} \neq f(\tau, T_{\Sigma}, T_d)$, то уже из (2) следует, что погрешность термоэлектродов обусловлена только разностью температур рабочего и свободных концов. В таком гипотетическом случае погрешности неоднородности отсутствуют — термоэлектроды дрейфуют равномерно, поэтому деградационные процессы в них также проявляются исключительно в виде временного дрейфа ФП. Это возможно, если главной причиной дрейфа является не температура, а например, проникающая радиация.

4. Если изменение градиента ∇t_{Σ} мало, то погрешность ΔE_{Σ} определяется, в основном, первым слагаемым в (5). Этот случай соответствует эксплуатации ТЭП в температурном поле, близком к стационарному. При таких условиях можно использовать методы коррекции дрейфа, обобщенные в [2—5] и упомянутые в п. 2. Влияние второго слагаемого в (5) будет проявляться как методическая погрешность коррекции, снижающая ее эффективность.

5. Непосредственно после поверки ТЭП на месте эксплуатации или калибровки можно считать, что его погрешность для данных условий известна, т. е. некоторое время можно полагать $\Delta e_{\text{норм}i} \rightarrow \text{const}$. При этом деградационные процессы могут проявиться только как погрешность приобретен-

ной неоднородности ТЭП, определяемая вторым слагаемым в (5) и пропорциональная ∇t_{Σ} . Этот случай описан в [6], из которого сделан недостаточно обоснованный вывод о невозможности коррекции погрешности ТЭП. Однако, как показано в [15, 16], даже при значительных изменениях ∇t_{Σ} , которыми нельзя пренебречь, для ТЭП, имеющей значительную приобретенную термоэлектрическую неоднородность, возможен пересчет погрешности в одном профиле температурного поля (в частности, профиле температурного поля поверки) в погрешность другого профиля (в частности, профиля температурного поля эксплуатации). Предложенный в [15, 16] метод пересчета базируется на математических моделях погрешности каждого участка ТЭП, которые можно построить по результатам исследования дрейфа однотипных ТЭП в аналогичных условиях эксплуатации. В таком случае индивидуальные особенности каждого участка будут определять погрешность пересчета, возрастающую в процессе эксплуатации. В [16] предложено проводить коррекцию математических моделей погрешности каждого участка ТЭП по результатам периодической поверки. Однако при такой поверке получаем погрешность в целом, а не отдельных участков. Также предложено распределять между участками ТЭП отклонение прогнозируемой суммарной погрешности всех его участков от погрешности, полученной при поверке. Критерии распределения (пропорционально температуре участков, оценке их погрешности согласно исходным математическим моделям, дисперсии, полученной при исследовании дрейфа однотипных ТЭП), предложенные в [17], нельзя признать достоверными. Коррекция математических моделей погрешности каждого участка ТЭП на базе неправильного критерия может в результате не уменьшить, а увеличить погрешность коррекции.

Из изложенного следует, что методы коррекции погрешности ТЭП, обобщенные в [2—5], не учитывают погрешности из-за приобретенной термоэлектрической неоднородности электродов ТЭП, причем согласно [1] она быстрее возрастает при малых изменениях профиля температурного поля.

Перспективные методы коррекции погрешности из-за приобретенной неоднородности термопар. В последнее время на основе анализа зависимости (5) разработаны новые методы коррекции указанной погрешности [18, 19]. Рассмотрим возможности их использования для снижения погрешности.

Если изменение градиента ∇t_{Σ} нельзя считать малым, то погрешность ΔE_{Σ} определяется обоими слагаемыми в (5). Этот случай соответствует эксплуатации ТЭП в температурном поле, изменяющемся во время эксплуатации настолько, что влиянием изменений нельзя пренебречь. При этом обобщенные в [2—5] методы коррекции не дают существенного повышения точности, поскольку, как указано в п. 4, влияние второго слагаемого в (5) при больших изменениях градиента ∇t_{Σ} будет проявляться как погрешность из-за приобретенной неоднородности. Эта методическая погрешность коррекции может оказаться даже больше погрешности от влияния первого слагаемого — временного дрейфа ФП ТЭП, что согласно [1], во-первых, связано с равенством максимальных значений погрешностей, а во-вторых, погрешность из-за временного дрейфа в целом является суммой дрейфов отдельных участков, не все из которых имеют высокую температуру. Поэтому погрешность из-за временного дрейфа практически всегда меньше максимально возможного значения; для погрешности из-за приобретенной неоднородности

родности такого ограничения нет, так как она зависит от изменения $\nabla t_{\perp}$.

Метод коррекции, изложенный в п. 5 предыдущего раздела, имеет невысокую точность из-за недостоверности критерия распределения полученной суммарной погрешности ТЭП между отдельными участками его электродов. Если бы этот критерий был достоверным, то погрешность коррекции погрешности из-за приобретенной термоэлектрической неоднородности электродов была бы малой. Это означает, что, несмотря на высокую неоднородность электродов, генерируемая ТЭДС с учетом коррекции не зависела бы от профиля температурного поля вдоль электродов. На этом и базируется метод коррекции погрешности из-за приобретенной термоэлектрической неоднородности электродов [18, 19]. При его реализации поверку ТЭП проводят в некотором наборе профилей температурных полей, а критерий распределения суммарной погрешности между участками ТЭП выбирают так, чтобы при изменении профиля температурного поля коррекция была максимально эффективна.

Если количество профилей температурных полей равно количеству участков, на которые разбиты оба термоэлектрода, то распределение суммарной погрешности между участками сводится к решению системы линейных уравнений. Однако в этом случае имеется противоречие. Для повышения точности коррекции целесообразно увеличивать количество участков разбиения, но это существенно повышает трудоемкость поверки. Поэтому в [18, 19] предложено проводить поверку в меньшем количестве точек, а поправку определять с помощью нейронной сети. Нейронная сеть должна быть обучена по результатам исследования дрейфа однотипных ТЭП в аналогичных условиях эксплуатации. Во время обучения нейронная сеть обобщает закономерности распределения суммарной погрешности ТЭП между отдельными участками для минимизации зависимости ТЭДС от формы профиля температурного поля вдоль термоэлектродов. Эффективность такого метода коррекции погрешности из-за приобретенной неоднородности электродов может быть весьма высокой, поэтому его целесообразно исследовать детально.

Анализ зависимости (5) позволяет также сделать достаточно тривиальный вывод: при отсутствии изменений градиента $\nabla t_{\perp}$ приобретенная неоднородность электродов ТЭП, насколько большой она бы ни была, не может проявиться, т. е. вызвать погрешность измерений температуры. Эта погрешность носит случайный характер — соответствует случайному изменению $\nabla t_{\perp}$. При его постоянстве данная погрешность перешла бы в систематическую, которую можно учесть с помощью перечисленных в п. 2 методов коррекции временного дрейфа. Для реализации такого метода компенсации влияния приобретенной неоднородности необходимо вдоль электродов ТЭП стабилизировать профиль температурного поля. Это возможно с помощью набора подсистем стабилизации температуры [20, 21]. В таком случае в состав ТЭП должны входить головная термопара (измеряющая температуру объекта), а также нагреватели и дополнительные термопары, распределенные вдоль оси головной таким образом, чтобы стабилизировать ее температуру и скомпенсировать изменение профиля температурного поля объекта измерения. Такой ТЭП можно назвать термоэлектрическим преобразователем с управляемым профилем температурного поля (УПТП) [20, 21]. При его разработке необходимо уделить значительное внимание, во-первых, методам

управления температурным полем, поскольку между отдельными подсистемами стабилизации температуры (из набора, входящего в ТЭП с УПТП) возникают довольно сильные тепловые связи. Такие объекты называют многосвязными, из-за значительной инерционности тепловых процессов они склонны к самовозбуждению. Во-вторых, необходимо так конструировать ТЭП с УПТП, чтобы изменения внешнего профиля температурного поля объекта как можно меньше влияли на профиль температурного поля головной термопары.

Применение набора подсистем стабилизации температуры значительно усложнило обыкновенные ТЭП. Однако благодаря стабильному профилю температурного поля вдоль электродов головной термопары ТЭП с УПТП в соответствии с п.2 приведенной выше классификации для него приемлемы все методы снижения погрешности. При остаточной нестабильности профиля температурного поля к ТЭП с УПТП применимы методы п. 5. Дополнительные погрешности из-за остаточной нестабильности профиля температурного поля путем грамотного конструирования и соответствующей эксплуатации можно уменьшить до приемлемого уровня. Главная особенность ТЭП с УПТП состоит в том, что при его использовании разработчик приобретает возможность активно влиять на неисключенные погрешности.

Заключение. Исследование структурно-алгоритмических методов повышения точности измерения температуры с использованием ТЭП, обладающих значительной приобретенной термоэлектрической неоднородностью электродов, показало, что в отличие от выводов, сделанных в [6], существуют условия, при которых такая коррекция может повысить точность измерений температуры. Проведенный анализ позволил не только оценить достоинства и недостатки известных методов коррекции погрешностей ТЭП, но и наметить новые, перспективные, сочетающие как структурно-алгоритмические, так и конструктивно-технологические методы.

Л и т е р а т у р а

1. **Су Цзюнь, Кочан О. В.** Механизм возникновения приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар и его влияние на результат измерения температуры // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 38—42; **Su Jun, Kochan O. V.** The Mechanism of the Occurrence of Acquired Thermoelectric Inhomogeneity of Thermocouples and its Effect on the Result of Temperature Measurement // Measurement Techniques. 2014. V. 57. N. 10. P. 1160—1166.
2. **Саченко А. А.** Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. Л., 1988.
3. **Кочан В. В.** Электрические измерители температуры повышенной точности со встроенными калибраторами: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Киев, 1989.
4. **Березький О. М.** Средства измерения температуры с элементами искусственного интеллекта: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Львов, 1996.
5. **Турченко В. О.** Нейросетевые методы и средства повышения эффективности дистрибутивных сетей сбора и обработки сенсорных данных: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Львов, 2001.
6. **Кириков И. И.** Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Исследования в области температурных измерений: Труды ВНИИМ. Л., 1976. С. 11—15.

7. Павлов В. П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар. М.: Изд-во стандартов, 1979.
8. Sloneker K. C. Thermocouple inhomogeneity // Ceramic industry. 2009. V. 159. N. 4. P. 13—18.
9. Бейлин В. М. Влияние термоэлектрической неоднородности на градуировочную характеристику термопар // Исследование сплавов для термопар: Труды ин-та «Гипроцвет-метообработка», XXX. М.: Металлургия, 1976. С. 87—95.
10. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis. Essen: Vulkan-Verlag, 1981.
11. Каржавин В. А. Влияние термоэлектрической неоднородности на точность измерения температуры термопарами: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Обнинск, 2010.
12. Pat. 3.499.340 USA. Self calibrating temperature sensing proube and proube — indicator combination / A. Hundves, H. G. Buschfort.
13. Саченко А. А., Мильченко В. Ю., Кочан В. В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. М.: Энергоатомиздат, 1986.
14. Пат. 50830 Украины. Способ формирования учебной выборки прогнозирующего дрейфа устройства сбора данных нейронной сети / А. Саченко и др. // Бюл. 2002. № 11.

15. Мильченко В. Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 1984.
16. Чырка М. И. Повышение точности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями в неравномерных тепловых полях: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Львов, 1997.
17. Чырка М. И., Василькив Н. М., Кочан Р. В. Метод повышения точности прогнозирования нестабильности характеристик преобразования термоэлектрических преобразователей // Вестник ТАНГ. Экономико-математическое моделирование. (Тернополь). 1999. № 6. С. 37—42.
18. Пат. 92192 Украины. Способ коррекции погрешности неоднородности термопар / Н. М. Василькив, О. В. Кочан, В. В. Кочан // Бюл. 2009. № 21.
19. Василькив Н. М. Повышение точности измерения температуры термопарами в процессе эксплуатации: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Львов, 2010.
20. Пат. 97464 Украины. Термоэлектрический преобразователь / О. В. Кочан, Р. В. Кочан // Бюл. 2012. № 4.
21. Кочан О. В. Термоэлектрический преобразователь с регулируемым профилем температурного поля: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Львов, 2010.

Дата принятия 07.03.2014 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.391.26:629.7.05

Нелинейный компенсатор магнитных помех авиационной магнитометрической системы. Алгоритм АНН-2

И. Г. АНЦЕВ, В. В. АВЕРКИЕВ, Ю. М. ПЕТУХОВ

ОАО «НПП «Радар ммс», С.-Петербург, Россия, e-mail: averkiev_vv@radar-mms.com

Исследован упрощенный алгоритм нелинейной настройки компенсатора магнитных помех, создаваемых скалярному магнитометру авиационным носителем. Показано, что нелинейную задачу можно свести к линейной при учете и прямой компенсации нелинейной составляющей.

Ключевые слова: скалярный магнитометр, магнитные помехи носителя, нелинейный компенсатор магнитных помех.

A simplified algorithm of nonlinear funning of compensator of magnetic noise created by aircraft carrier and influencing the scalar magnetometer has been studied. It is shown that the solution for this nonlinear problem can be reduced to a linear at taking into account and direct compensation of nonlinear component in the compensator equation.

Key words: scalar magnetometer, carrier magnetic noise, nonlinear magnetic noise compensator.

В [1] исследован алгоритм нелинейной настройки АНН-1 компенсатора магнитных помех (КМП), который базируется на решении нелинейного уравнения

$$U_{\text{CM}} = |\mathbf{B}_{\Sigma}|_{\text{л}} + O(\eta^2), \quad (1)$$

где U_{CM} — показания скалярного магнитометра (СМ), $|\mathbf{B}_{\Sigma}|_{\text{л}}$ — линеаризованная составляющая модели его показаний; $O(\eta^2)$ — малая квадратичная поправка, пропорциональная η^2 ; $\eta = |\mathbf{B}_{\text{с}}|/|\mathbf{B}|$; $\mathbf{B}_{\text{с}}$, $\mathbf{B}$ — векторы индукции магнитного поля носителя и Земли, соответственно. Явные выражения для