

УДК 536.531

О.Кочан¹; Н.Васильків²; Р. Кочан³; В.Яскілка³¹Львівська національна академія ветеринарної медицини²Тернопільський національний економічний університет³Тернопільський державний технічний університет імені Івана ПулюяОЦІНКА МАКСИМАЛЬНОЇ ПОХИБКИ НЕОДНОРІДНИХ
ТЕРМОПАР

В статті розглянуто взаємозв'язок між похибкою дрейфу термопар (змінюючи характеристики перетворення під дією високої температури і часу експлуатації) і похибкою їх неоднорідності (змінюючи генеровану термо-с.р.с. при зміні профілю температурного поля вздовж термоелектродів). Показано, що через спільну причину виникнення (деградаційні процеси в термоелектродах термопар) максимальні значення згаданих похибок співпадають. За результатами експериментальних досліджень оцінено максимальне значення згаданих похибок для термопар хромель-алюмель.

О.Кочан, Н.Васильків, Р.Кочан, В.Яскілка

ERROR EVALUATION OF NONHOMOGENIC THERMOCOUPLES

In this paper the interrelation between an error of thermocouple drift (change of the characteristic transformation under action of high temperature and time of operation) and its error of non homogeneity (change by the generated e.m.f. of thermocouple at change of a profile of a temperature field lengthways its electrodes) is considered. It is shown, that because of the general (common) reason of occurrence (degradation processes in the thermocouple electrodes) the maximal value of the mentioned errors coincide. Behind results of experimental researches the maximal value of the mentioned errors for nichrome-nickel thermocouples is appreciated.

Умовні позначення

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

t_{k-1}, t_k – температури на межах k – тої ділянки термоелектрода;

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

l – координата довжини.

Вступ

Для вимірювання температури в промисловості, наукових дослідженнях та інших областях, особливо в діапазоні 500...1500°C, широко використовують термоелектричні перетворювачі на базі термопар. Сучасне технологічне обладнання вимагає високої точності, тому точність вторинних приладів для вимірювання температури невинно росте [1, 2]. Однак похибка вимірювання температури практично не зменшується через те, що у вимірювальному каналі домінуючою є похибка давачів – термопар. А точність термопар за останні десятиріччя практично не зростає [3, 4]. Тому сумарна похибка вимірювання температури залишається великою, а задача підвищення точності вимірювання температури з допомогою термопар не може бути вирішена без відповідного підвищення точності самих термопар або розробки ефективних методів корекції їх похибок.

Методи корекції похибок термопар традиційно відповідають окремим складовим похибкам, які коригуються. Для корекції індивідуальних початкових відхилень характеристик перетворення термопар від номінальної запропоновано використати результати їх повірки в лабораторних умовах [5]. Для корекції дрейфу

характеристик перетворення термопар від дії високої температури за час експлуатації запропоновано прогноз похибки дрейфу [6], перевірку термопар на місці експлуатації [7], їх калібрування з допомогою температурного калібратора [8, 9], а також комбінації перелічених методів [10, 11, 12].

Однак, згідно з [13], ніяка корекція похибок термопар у процесі експлуатації неможлива через те, що при цьому наростає набута термоелектрична неоднорідність їх електродів, яка пов'язана з нерівномірною (неоднорідною) зміною хімічного складу і фізичного стану ділянок електродів термопар під час тривалого перебування в процесі експлуатації при різних температурах. Дослідженню похибки неоднорідності присвячено ряд публікацій [14, 15], але вони в основному розглядають початкову періодичну неоднорідність і її вплив на результат вимірювання температури. Тільки деякі публікації [16, 17] присвячені оцінці похибок термопар у робочих умовах за рахунок впливу набутої в процесі тривалої експлуатації неоднорідності, однак вони не вирішують питання оцінки максимальної похибки термопар, яку може викликати неоднорідність їх термоелектродів, а також не встановлюють зв'язку між похибкою від неоднорідності електродів термопар і похибкою, викликану дрейфом характеристик перетворення термопар під дією високої температури і часу експлуатації. Слід відзначити також, що в роботах [18, 19, 20] запропоновано методи корекції похибок, викликаних власне термоелектричною неоднорідністю електродів термопар, однак ці методи вимагають дослідження дрейфу термопар в умовах, які відповідають умовам експлуатації.

Метою даної статті є оцінка максимального значення похибки термопар, викликаних термоелектричною неоднорідністю їх електродів та виявлення зв'язку цієї похибки з похибкою дрейфу характеристики перетворення термопар. Для цього необхідно вивести аналітичні залежності між е.р.с. термопар і параметрами профілю температурного поля вздовж її термоелектродів і з їх допомогою оцінити похибки термопар на основі результатів експериментальних досліджень дрейфу окремих термоелектродів, наведених в [21].

Залежність похибки неоднорідності від дрейфу термоелектродів

Допустимо, що термоелектроди термопар ТП експлуатуються в температурному полі, яке описується монотонною залежністю. Тоді, якщо розбити кожен термоелектрод на ділянки $i = \overline{1, n}$, електрорушійну силу (е.р.с.) E_k для k -тої ділянки можна записати як

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

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

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

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

де $E_{\Sigma N}$ – номінальне значення е.р.с., яке генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур $t_k - t_0$. Інтеграл визначає сумарну похибку термоелектрода.

В процесі експлуатації, під дією високих температур, міняється хімічний склад термоелектродів (окислення, міграція) і їх кристалічний стан, причому інтенсивність змін сильно залежить від температури, при якій дана ділянка перебувала під час експлуатації [21]. В результаті накопичення цих змін Δe_k окремих ділянок термоелектродів стає неоднаковою, тобто сумарна е.р.с. стає залежною від розподілу

температурного поля вздовж термоелектродів. Для оцінки рівня похибки термоелектрода від неоднорідності задамо:

- Закон зміни температури t_e вздовж термоелектродів (профіль температурного поля) при експлуатації

$$t_e = f(l), \quad (3)$$

де l – поточна координата довжини.

В цьому випадку градієнт температурного поля вздовж термоелектродів можна виразити як

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial l}. \quad (4)$$

- Закон зміни Δe_k від температури для заданого часу експлуатації ділянки термоелектрода при даній температурі експлуатації

$$\Delta e_k = \Delta e(t_e, \tau). \quad (5)$$

Таким чином, на основі (2), з врахуванням (3)...(5) запишемо вираз, який визначає сумарну похибку ΔE_Σ термоелектрода при лінійному температурному полі експлуатації

$$\Delta E_\Sigma = \int_0^{l_k} \Delta e_k dt = \int_0^{l_k} \Delta e(t_e, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl = \Delta e(t_e, \tau) \int_0^{l_k} \frac{\partial t}{\partial l} dl. \quad (6)$$

Якщо профіль температурного поля прийняти сталим, тобто $\nabla t = \text{const}$, то вираз (6) набуде вигляду

$$\Delta E_\Sigma = \Delta e(t_e, \tau) \times \frac{\partial t}{\partial l} \times l. \quad (7)$$

З (7) випливає, по-перше, відомий висновок: якщо $\frac{\partial t}{\partial l} \rightarrow 0$, то $\Delta E_\Sigma \rightarrow 0$. Таким чином, якщо термопара, наприклад, експлуатується в температурному полі, представленому у вигляді кривої А на рис. 1, то дрейф питомої термо-с.р.с ділянок $l_0...l_3$ та $l_4...l_7$ не вносить похибки в результат вимірювання. По-друге, якщо температура експлуатації ділянки нижча за деяке мінімальне значення, при якому дрейф можна вважати неістотним, тобто $\Delta e(t_e, \tau) \rightarrow 0$, то $\Delta E_\Sigma \rightarrow 0$ (ділянки $l_0...l_3$ не можуть створювати похибки від набутої термоелектричної неоднорідності). По-третє, якщо залежність (5) описується функцією, що монотонно змінюється (в дійсності – наростає) при збільшенні температури, то сумарна похибка дрейфу термоелектродів, згідно з (6), буде мати значення, що формується не тільки ділянками з максимальним дрейфом, а і ділянками з усіма проміжними значеннями дрейфу.

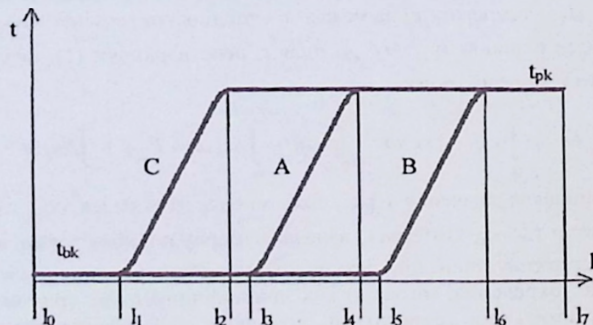


Рисунок 1 – Профілі температурного поля вздовж термоелектродів термопари.

З викладеного можна зробити наступні висновки:

- 1) значення похибки дрейфу, виміряне при незмінному положенні електродів термопар (тобто в температурному полі експлуатації, що відповідає кривій А рис. 1), не відповідає максимально можливій похибці дрейфу тому, що частина сумарної термо-с.р.с. термопари створюється ділянками, які експлуатувалися при невисоких температурах, при яких зміни хімічного складу і кристалічного стану термоелектродів незначні;
- 2) максимально можливе значення дрейфу даної термопари можна визначити, перемістивши її термоелектроди в температурне поле, представлене у вигляді кривої В на рис. 1, де всі ділянки, які створюють термо-с.р.с. термопари, експлуатувалися при максимальній температурі, тобто температурі робочого кінця t_{pk} , а тому мають максимальне відхилення питомої термо-с.р.с. Δe_k від свого індивідуального значення (тобто характеристики перетворення цієї ж термопари перед експлуатацією), тобто $\Delta e_k \rightarrow \max$;
- 3) при переміщенні електродів термопари в температурне поле, представлене у вигляді кривої С на рис. 1, всі ділянки, які створюють термо-с.р.с. термопари, експлуатувалися при мінімальній температурі (температурі вільних кінців t_{bk}), а тому фактично не мають набутого в процесі експлуатації відхилення питомої термо-с.р.с. Δe_k від свого індивідуального значення, тобто $\Delta e_k \rightarrow 0$. Тому результат вимірювання температури в цьому випадку буде вільний від дрейфу.

Таким чином, максимальну похибку від дрейфу характеристики перетворення термопари (при умові монотонної зміни $\Delta e(t_e, \tau)$) можна знайти як різницю результатів вимірювання термо-с.р.с. термопари в температурних полях В і С рис. 1 (згідно з пп. 2 і 3 попереднього переліку). Умовами знаходження максимального значення похибки дрейфу є

$$l_3 - l_2 > 0 \text{ і } l_5 - l_4 > 0. \quad (8)$$

Але слід відзначити, що переміщення електродів термопари з поля В в поле С рис. 1 (або навпаки) відповідає максимально можливій зміні профілю температурного поля вздовж цих електродів. Збільшення віддалей $l_3 - l_2$ або $l_5 - l_4$ не вносить нічого нового з точки зору виконання залежності (7), тобто ділянки $l_3 - l_2$ і $l_5 - l_4$ через те, що

їх градієнт $\frac{\partial t}{\partial l} \rightarrow 0$, не створюють ні термо-с.р.с., ні відповідно її похибки $\Delta e(t_e, \tau)$.

Тому умова (8) є необхідною і достатньою для отримання максимально можливої зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів, а, значить, і максимальної похибки неоднорідності. Таким чином, можна зробити висновок, що для термопар існує тісний зв'язок між значеннями похибок від дрейфу характеристики перетворення під дією умов експлуатації та від неоднорідності. Цей зв'язок полягає в тому, що максимальна похибка від дрейфу характеристики перетворення даної термопари дорівнює її ж максимальній похибці від неоднорідності.

Окремо похибка дрейфу є функцією часу і температури експлуатації, а похибка набуті неоднорідності – функцією зміни глибини занурення. Тому формально ці похибки різні. Однак вони мають одну і ту ж причину – деградаційні процеси в матеріалах термоелектродів. Тісний зв'язок між цими похибками проявляється власне в співпадінні їх максимально можливих значень. Тому оцінка цих максимальних значень має практичне значення для проєктування підсистем корекції похибок термоелектричних перетворювачів.

Оцінка максимального значення похибок дрейфу та набуті неоднорідності

Для визначення максимальних похибок дрейфу та набуті неоднорідності необхідно знати залежність (5) – закон зміни Δe_k від температури для заданого часу експлуатації ділянки термоелектрода при даній температурі експлуатації. Для оцінки

максимальних значень цих похибок для найбільш розповсюджених термопар типу хромель-алюмель (ХА) використасмо усереднені дані результатів досліджень [21].

Дрейф характеристики перетворення хромелевого електрода діаметром 0,7 мм при його експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С можна апроксимувати поліномом третього степеня $\Delta E_x = a_x \cdot t^3 + b_x \cdot t^2 + c_x \cdot t$, де $a_x = -4,315 \times 10^{-7} \mu V / K^3$, $b_x = 1,34 \times 10^{-5} \mu V / K^2$, $c_x = 0,5494 \mu V / K$. Результати апроксимації представлено на рис. 2.

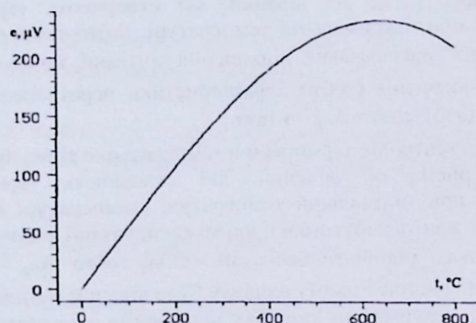


Рисунок 2 – Дрейф характеристики перетворення хромелевого електрода діаметром 0,7 мм при експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С.

Дрейф характеристики перетворення хромелевого електрода діаметром 1,2 мм при його експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С можна апроксимувати поліномом третього степеня $\Delta E_x = a_x \cdot t^3 + b_x \cdot t^2 + c_x \cdot t$, де $a_x = -4,315 \times 10^{-7} \mu V / K^3$, $b_x = 2,366 \times 10^{-4} \mu V / K^2$, $c_x = 0,2744 \mu V / K$. Результати апроксимації представлено на рис. 3.

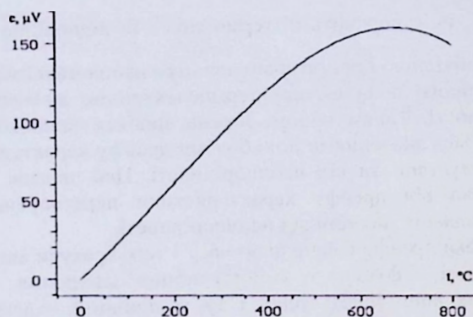


Рисунок 3 – Дрейф характеристики перетворення хромелевого електрода діаметром 1,2 мм при експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С.

Дрейф характеристики перетворення алюмелевого електрода діаметром 0,7 мм при його експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С можна апроксимувати поліномом четвертого степеня $\Delta E_a = a_a \cdot t^4 + b_a \cdot t^3 + c_a \cdot t^2 + d_a \cdot t$, де

$a_a = -5,838 \times 10^{-9} \mu V / K^4$, $b_a = 1,13 \times 10^{-5} \mu V / K^3$, $c_a = -6,948 \times 10^{-3} \mu V / K^2$,
 $d_a = 1,436 \mu V / K$. Результати апроксимації представлено на рис. 4.

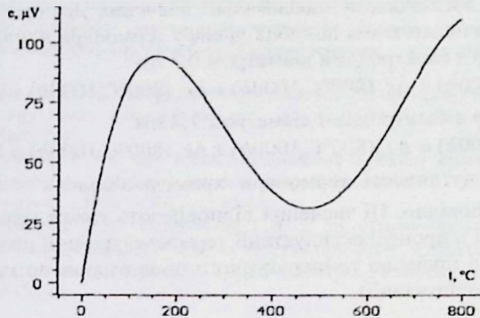


Рисунок 4 – Дрейф характеристики перетворення алюмелевого електрода діаметром 0,7 мм при експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С.

Дрейф характеристики перетворення алюмелевого електрода діаметром 1,2 мм при його експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С можна апроксимувати поліномом четвертого степеня $\Delta E_a = a_a \cdot t^4 + b_a \cdot t^3 + c_a \cdot t^2 + d_a \cdot t$, де $a_a = -3,65 \times 10^{-9} \mu V / K^4$, $b_a = 7 \times 10^{-6} \mu V / K^3$, $c_a = -4,192 \times 10^{-3} \mu V / K^2$, $d_a = 0,8864 \mu V / K$. Результати апроксимації представлено на рис. 5.

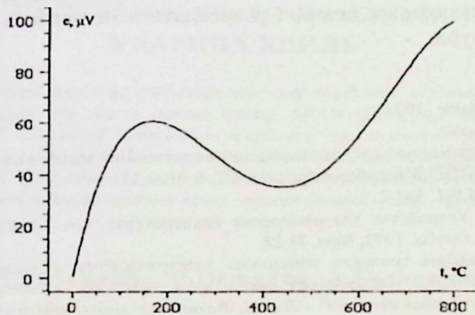


Рисунок 5 – Дрейф характеристики перетворення алюмелевого електрода діаметром 1,2 мм при експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800 °С.

Максимальна похибка апроксимації у всіх випадках не перевищує 14 мкВ.

Таким чином, максимальне значення дрейфу (зміни характеристики перетворення) за 10000 годин експлуатації при температурі 800 °С для хромелю діаметром 0,7 мм приблизно складає $\Delta e_x(0,7) \approx 210 \mu V$, а для хромелю діаметром 1,2 мм – $\Delta e_x(1,2) \approx 150 \mu V$. Такі ж значення будуть і максимальної похибки неоднорідності (змін вихідного сигналу термопар, яку вносить хромелевий термоелектрод). Максимальне значення похибки дрейфу для алюмелю діаметром 0,7 мм при аналогічних умовах експлуатації приблизно складає $\Delta e_a(0,7) \approx 120 \mu V$, а для алюмелю

діаметром 1,2 мм – $\Delta e_s(1,2) \approx 100 \mu V$. Такі ж значення будуть мати максимальні значення похибок неоднорідності.

Слід відзначити, що дрейф як хромелевого, так і алюмелевого термоелектродів збільшує сумарну термо-с.р.с. термопари (тому полярність дрейфів, показана на рис. 2...5, є умовною). Визначивши максимальні значення дрейфів для обох електродів, знайдемо максимальне значення похибок дрейфу термопари в цілому:

для термопар з електродами діаметром 0,7 мм

$$\Delta e(800^\circ C, 1000h) = \Delta e_s(800^\circ C, 1000h) + \Delta e_o(800^\circ C, 1000h) \approx 210 + 120 = 330 \mu V,$$

для термопар з електродами діаметром 1,2 мм

$$\Delta e(800^\circ C, 1000h) = \Delta e_s(800^\circ C, 1000h) + \Delta e_o(800^\circ C, 1000h) \approx 150 + 100 = 250 \mu V,$$

що, при середній чутливості термопари хромель-алюмель $s \approx 40 \mu V/^\circ C$ становить $8,25^\circ C$ і $6,25^\circ C$ відповідно. Ці значення відповідають також максимальним значенням похибки від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності, яка може виникнути при зміні профілю температурного поля вздовж електродів термопари (для даних умов і часу експлуатації).

Висновки

Як видно з викладеного, в процесі експлуатації термоелектричних перетворювачів, внаслідок деградаційних процесів у матеріалах електродів їх термопар, виникають похибки, які викликають дрейф їх характеристик перетворення і залежність вихідного сигналу не тільки від різниці температур робочого і вільних кінців, а і від зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів (похибку неоднорідності). Ці похибки формально незалежні, аргументи функціональних залежностей, якими їх можна описати, – різні. Однак спільна причина викликає тісний взаємозв'язок між цими похибками. Цей зв'язок проявляється в співпаданні максимальних значень похибок від дрейфу характеристик перетворення і від зміни профілю температурного поля для даних умов і часу експлуатації. Таким чином, методи дослідження та корекції або компенсації цих похибок повинні розроблятися не окремо, а разом, вони можуть мати спільні процедури.

Література

1. Fluke and Philips Catalog. 1992.
2. www.thermo-electra.com.
3. Куритник И.И. Современное состояние термоэлектрических преобразователей. – М.: 1985. – 56 с. (Обзор информ./ ПНИИТЭИ приборостроения. ТС-6. Вып.1).
4. International standard IEC 584-2.
5. А.с. 352152 СРСР. Устройство для измерения температуры. А.А. Саченко, К.М. Обелевская, Л.В. Заничковская и др., Опубл. 1972, Бюл. № 28.
6. А. Саченко. Повышение точности измерения электрическими методами высоких температур в промышленных условиях. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.05 – "приборы и методы измерения электрических и магнитных величин" – Львов, Физико-механический институт АН УССР, 1978.
7. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis. – Vulkan-Verlag, Essen, 1981. S. 498.
8. 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.
9. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
10. 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. – 278с.
11. Березький О.М. Засоби вимірювання температури з елементами штучного інтелекту. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.04 – Львів, Державний університет "Львівська політехніка", 1996.
12. Кочан Р. В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.16 – "Інформаційно-вимірювальні системи" – Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005.
13. Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности//Исследование в области температурных измерений: Сб.тр. – М.: ВНИИМ.-1976.-С.11-15.
14. Гришков А.Я., Сирота А.М. Влияние неоднородности термоэлектродов на показания термопар// Исследования сплавов для термопар. – М.: Металлургия, 1969. – С.107-115.

15. Левин И.Я., Рогельберг И.Л. Термоэлектрическая неоднородность прополок и методы ее измерения // Исследование сплавов для термопар. - М.: Металлургия, 1971. Вып.32. - С. 93-105.
16. Павлов Б.П., Лижевская Л.И., Сермягина Л.П. Графический метод расчета погрешности термопар из-за неоднородности электродов // Измерительная техника. - 1985. - №7. - С.43-45.
17. Тартаковский Д.Ф. Расчет погрешности термопары от термоэлектрической неоднородности ее электродов // Труды метролог. ин-тов СССР. - 1969. - Вып.105(165). - С.107-114.
18. Мишелько В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из благородных металлов. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.15 - М., ВНИИФТРИ, 1984. - 25 с.
19. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.04 - Львів, Державний університет "Львівська політехніка", 1997.
20. М.І.Чирка, Н.М.Васильків, Р.В.Кочан. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів. // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. - 1999. - №6. - С.37-42.
21. Рогельберг Н.А., Пигидина Э.Н., Покровская Г.Н. и др. Изменения термоэлектрической силы прополок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°C продолжительностью до 10000 ч. // В сб. Исследование сплавов для термопар. Труды института Гипроцветметобработка. Том III. - М.: Металлургия, 1969. - С.33-41.

Одержано 17.01.2007 р.

УДК 531.374; 539.213

В.Турченко, канд. техн. наук; В.Демчук; А.Саченко, докт. техн. наук

Тернопільський національний економічний університет

ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ МІЖПЛАНЕТНИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ

У статті розглянуто підхід до прогнозування часу прибуття міжпланетних ударних хвиль за допомогою нейронних мереж на основі одного каналу EPAM (Electron, Proton and Alpha Monitor) космічного апарату ACE (Advanced Composition Explorer), що знаходиться в точці L1. Наведено короткий опис космічного апарату ACE та проаналізовані дані, що поступають від нього у мережу Інтернет у реальному часі. Обґрунтовано вибір даних для проведення експериментальних досліджень та наведено результати імітаційного моделювання прогнозування часу прибуття ударної хвилі в середовищі MATLAB.

V.Turchenko, V.Demchuk, A.Sachenko

AN APPROACH TO INTERPLANETARY SHOCKS PREDICTION

An approach to prediction of the arrival time of interplanetary shocks using neural networks based on the data gathered from single EPAM (Electron, Proton and Alpha Monitor) channel of NASA's ACE (Advanced Composition Explorer) spacecraft is proposed in this paper. A short description of ACE spacecraft and the data, published online on the appropriate web-site, are considered. A data choice to fulfill a prediction of interplanetary shocks is proven and structure of neural network is described. The results of simulation modeling in MATLAB are considered in the end of the paper.

Умовні позначення

- | | |
|----------|--|
| N | - кількість нейронів у схованому рівні нейронної мережі; |
| w_{ij} | - вагові коефіцієнти від i -го нейрона схованого рівня до вихідного нейрона; |
| h_i | - вихід i -го нейрона; |
| T | - поріг вихідного нейрона; |