

ЕВРИСТИЧНИЙ АЛГОРИТМ ЕКСТРАПОЛЯЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ У ДВОЕЛЕМЕНТНОМУ РЕЗИСТИВНОМУ СЕНСОРІ

©Дорожовець Н.М., 2004

Запропоновано алгоритм екстраполяції температури досліджуваного середовища при застосуванні двоелементного резистивного сенсора температури. Ефективність алгоритму залежить від апіорної інформації про теплотехнічні властивості середовища і практично не потребує даних про глибину занурення сенсора.

In the article the algorithm of the temperature extrapolation of the investigated medium with the use of two element resistance sensor of temperature is proposed. The effectiveness of algorithm is depended on the a priori information about the thermotechnical properties of medium and practically it does not require the data about the submersion depth of sensor.

1. Вступ. Для зменшення впливу теплофізичних властивостей як конструкції самого сенсора, так і досліджуваного середовища, зокрема глибини занурення, запропоновано [1–4] багатоеlementні резистивні сенсори температури, які на основі вимірювань температури окремих чутливих елементів дають змогу здійснювати екстраполяцію температури середовища. Основною проблемою застосування таких перетворювачів є необхідність вимірювань температури елементів з високою точністю і роздільною здатністю. Це пояснюється тим, що для врахування нелінійності профілю температури вздовж сенсора в алгоритмах екстраполяції необхідно обчислювати перші та другі похідні профілю [1–4], що, як відомо, супроводжується посиленням впливу похибок та завад, які наявні під час вимірювань.

Для уникнення цих небажаних ефектів нами запропоновано алгоритм екстраполяції температури, для якого достатньо лише двох значень профілю температури і не потрібно обчислення похідних профілю. Однак для реалізації цього алгоритму необхідна апіорна інформація про різновид середовища (наприклад, олія, вода, повітря, орієнтовна швидкість руху середовища щодо термометра), температуру якого вимірюємо.

Отже, **мета досліджень** – обґрунтувати застосування двоелементного сенсора для належної екстраполяції температури середовища, деякі теплофізичні властивості якого апіорно задані та встановити оптимальні параметри лінійної екстраполяції температури.

2. Екстраполяційна формула для двох чутливих елементів. Проаналізувавши велику кількість експериментальних профілів температури вздовж сенсорів різного конструктивного виконання, для різної глибини занурення (40 мм, 63 мм та 100 мм, загальна довжина сенсора 400 мм), а також різних теплових властивостей середовища (олія, вода, повітря – швидкість руху 1 м/с та 2 м/с) ми встановили, що для заданого типу середовища нелінійний профіль температури можна з належною точністю апроксимувати прямою лінією (рис. 1). Ця лінія описується через температури $\Theta(l_1) = \Theta_1$, $\Theta(l_2) = \Theta_2$ у спеціально визначених двох точках l_1 та l_2 фактичного нелінійного профілю $T(x)$

$$\Theta_{lin}(x) = \Theta_1 + \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{x_2 - x_1}(x - x_1). \quad (1)$$

Зауважимо, що у цій апроксимації з'являється ще одна величина – координата x_e , для якої власне шукають екстрапольовану температуру Θ_x . Ця координата не обов'язково безпосередньо пов'язана з геометрією сенсора. Остаточо, оскільки відомими є температури чутливих елементів Θ_1 та Θ_2 , результат відтворення температури є зваженою сумою цих температур

$$\Theta_e = \Theta_1 g_1 + \Theta_2 g_2, \quad (2)$$

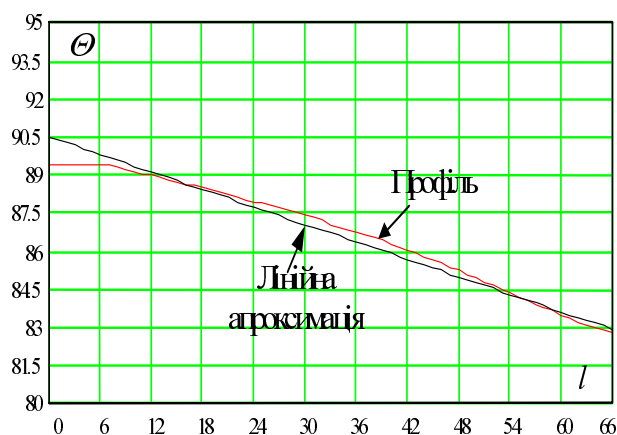
причому вагові коефіцієнти g_1 та g_2 повинні якнайкраще задовольняти умову відтворення температури для різних глибин занурення сенсора.

Очевидно, що для зменшення похибки від неточного визначення крутості апроксимуючої прямої (1) необхідно збільшувати відстань між точками розташування чутливих елементів. Однак ця відстань обмежена конструктивними особливостями, насамперед розмірами сенсора, самих чутливих елементів і властивостями нелінійного профілю температури. Зокрема, для довжини чутливого елемента h з урахуванням товщини стінки кожуха сенсора мінімальна відстань від середини елемента до краю має бути не меншою за довжину елемента. З іншого боку, хоча найінформативнішою частиною профілю температури є кінцева частина сенсора, яка найбільше занурена, тобто також біля його торця, однак у цьому місці якраз найбільше проявляється нелінійність профілю (див. рисунок).

Ця проблема була вирішена так. Для заданої температури певного середовища Θ_c і різних глибин занурення l_j сенсора були знайдені профілі температури [1,2]. Використовуючи множину цих профілів визначили дві точки розміщення чутливих елементів з координатами, для яких лінійна апроксимація одночасно була доброю для профілів з різною глибиною занурення сенсора. Експериментально було встановлено, що координати для базових температур повинні розміщуватись приблизно симетрично відносно середини робочої частини сенсора з деяким зміщенням від робочого кінця, щоб уникнути сильної початкової нелінійності профілю (див. рисунок). Враховуючи сказане, були вибрані такі координати: відступ першого елемента від робочого кінця $l_1 \cong (1/4)L$, та відступ другого – $l_2 \cong (3.5/4)L$. Оскільки експериментально досліджували три глибини занурення, то вагові коефіцієнти лінійної апроксимації і далі вагові коефіцієнти екстраполяційної формули (2) знаходили, застосовуючи МНК

$$\sum_{i=1}^3 (g_{1,j} \Theta_{i,j}(l_1) + g_{2,j} \Theta_{i,j}(l_2) - \Theta_c)^2 \Rightarrow \min \quad (3)$$

де i – номер профілю, що відповідає відповідній глибині занурення сенсора (40 мм ($i = 1$), 63 мм ($i = 2$) та 100 мм ($i = 3$)); j – номер досліджуваного середовища (у нас це повітря при швидкості 1 м/с ($j = 1$) та 2 м/с ($j = 2$), олія ($j = 3$) і вода ($j = 4$)).



Профіль температури та його лінійна апроксимація
(середовище олія, $\Theta_c = 90^\circ\text{C}$, глибина занурення сенсора 63 мм)

Температури чутливих елементів сенсора для різних глибин занурення у різні середовища з температурою $\Theta_c = 90^\circ C$ наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Температури чутливих елементів сенсора при температурі середовища $\Theta_c = 90^\circ C$

Середов.	Повітря, 1 м/с		Повітря, 2 м/с		Олія		Вода	
	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2
Глибина занурення								
40 мм	76.756	70.194	80.818	74.154	88.629	84.043	89.636	87.274
63 мм	83.857	80.580	86.340	83.447	89.754	88.821	89.954	89.658
100 мм	88.242	87.287	89.180	88.516	89.985	89.927	89.998	89.988

Для зазначених у табл.1 температур, розв'язавши рівняння (3), отримали вагові коефіцієнти, значення яких наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Вагові коефіцієнти лінійної екстраполяції температури середовища

Середовище $\Theta_c = 90^\circ C$	Повітря, 1 м/с	Повітря, 2 м/с	Олія	Вода
g_1	3.044402	2.39535	1.301711	1.153921
g_2	-2.04828	-1.397789	-0.301904	-0.153916

3. Дослідження методичної похибки екстраполяції. Методичну похибку екстраполяції знайдемо за виразом

$$\Delta\Theta_{e,i,j} = \Theta_{e,i,j} - \Theta_c, \text{ } ^\circ C \quad (4)$$

Екстрапольовані температури та знайдені за виразом (4) методичні похибки екстраполяції наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Екстрапольовані температури ($\Theta_c = 90^\circ C$) і методичні похибки екстраполяції

Середовище $\Theta_c = 90^\circ C$	Глибина занурення	Повітря, 1 м/с	Повітря, 2 м/с	Олія	Вода
$\Theta_{cx}, \text{ } ^\circ C$	40 мм	89.90	89.94	89.996	90.000
	63 мм	90.24	90.17	90.018	90.000
	100 мм	89.86	89.89	89.985	90.000
$\Delta\Theta_{cx}, \text{ } ^\circ C$	40 мм	-0.10	-0.06	-0.004	-0.000
	63 мм	0.24	0.17	0.018	0.000
	100 мм	-0.14	-0.11	-0.015	-0.000

Як бачимо з отриманих результатів (табл. 3), запропонована екстраполяція температури дає добрі результати у різних середовищах на різних глибинах занурення сенсора, оскільки у найгіршому випадку методична похибка екстраполяції температури у повітрі не перевищує кількох десятих градуса Цельсія. Відзначимо, що використання інших екстраполяційних формул [3, 4] дає у такому разі похибку у кілька градусів.

Зауважимо, що сума вагових коефіцієнтів незалежно від виду середовища приблизно дорівнює одиниці. Зокрема, для повітря, 1 м/с – $g_1 + g_2 = 0.996122$, для повітря, 2 м/с – $g_1 + g_2 = 0.997561$; для олії $g_1 + g_2 = 0.999807$ і для води $g_1 + g_2 = 1.000005$. Тому, прийнявши номінально

цю суму такою, що дорівнює одиниці: $g_1 + g_2 = 1$, в інтерполяційній формулі можна перейти до одного вагового коефіцієнта g_2 :

$$\Theta_e = \Theta_1 g_1 + \Theta_2 g_2 = \Theta_1 (g_1 + g_2) + (\Theta_2 - \Theta_1) g_2 \cong \Theta_1 + (\Theta_2 - \Theta_1) g_2 \quad (5)$$

Для такої екстраполяційної формули максимальна методична похибка не перевищує 0.57°C при вимірюванні температури у повітрі зі швидкістю руху 1 м/с та 0.38°C – при швидкості 2 м/с , а у рідинах ця похибка не перевищує кількох сотих градуса.

Доцільно отримати відповідь на запитання: що відбуватиметься, якщо температура досліджуваного середовища зміниться? З фізичних міркувань зміна температури середовища не повинна істотно змінити форму профілю температури всередині сенсора, хіба що слід очікувати зміни масштабу профілю. Тобто можна очікувати, що знайдені коефіцієнти лінійної екстраполяції для температури середовища $\Theta_c = 90^\circ\text{C}$ повинні давати добрі результати також і для інших температур середовища.

Для дослідження цього питання були знайдені температурні профілі при температурі середовища 80°C . Температури у точках розміщення чутливих елементів наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Температури чутливих елементів сенсора при температурі середовища $\Theta_c = 80^\circ\text{C}$

Середов.	Повітря, 1 м/с		Повітря, 2 м/с		Олія		Вода	
	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2
Глибина занурення								
40 мм	68.74	63.22	72.28	66.67	78.99	75.35	79.68	77.67
63 мм	74.74	72.01	76.93	74.51	79.83	79.14	79.96	79.71
100 мм	78.49	77.67	79.31	78.75	79.99	79.95	79.998	79.988

Використовуючи ці температури у екстраполяційному виразі (4) із знайденими раніше ваговими коефіцієнтами (табл. 2), були визначені шукані температури і на основі яких за виразом (5) (для $\Theta_c = 80^\circ\text{C}$) були розраховані методичні похибки екстраполяції. Результати наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Екстрапольовані температури ($\Theta_c = 80^\circ\text{C}$) і методичні похибки екстраполяції

Середовище $\Theta_c = 80^\circ\text{C}$	Глибина занурення	Повітря, 1 м/с	Повітря, 2 м/с	Олія	Вода
$\Theta_{cx}, ^\circ\text{C}$	40 мм	79.780	79.945	80.074	79.9898
	63 мм	80.042	80.125	80.023	79.9989
	100 мм	79.865	79.899	79.987	79.9999
$\Delta\Theta_{cx}, ^\circ\text{C}$	40 мм	-0.220	-0.055	0.074	-0.0102
	63 мм	0.042	0.125	0.023	-0.0011
	100 мм	-0.135	-0.101	-0.013	-0.0001

Як бачимо, запропонована екстраполяція температури працює добре також і для температури середовища $\Theta_c = 80^\circ\text{C}$.

Оскільки найбільші методичні похибки виникають при екстраполяції температури у повітряному середовищі, то додатково була досліджена інтерполяційна формула для температури повітря $\Theta_c = 70^\circ\text{C}$ (1 м/с). Температури чутливих елементів, результати екстраполяції та значення методичних похибок наведені у табл. 6.

Температури чутливих елементів ($\Theta_c = 70^\circ C$), екстрапольовані температури та методичні похибки екстраполяції температури

Середов.	Повітря, 1 м/с			
Глибина занурення	Θ_1	Θ_2	Θ_{ex}	$\Delta\Theta_e$
40 мм	62.88	58.82	70.952	0.952
63 мм	66.88	64.96	70.553	0.553
100 мм	69.18	68.66	69.977	-0.023

Отже, і для температури повітря $\Theta_c = 70^\circ C$ придатна лінійна екстраполяційна формула працює належно.

4. Висновки

Показано, що використовуючи лише два чутливі елементи при відповідному їх просторовому розміщенні можна знайти належну лінійну апроксимацію профілю температури.

Лінійна екстраполяція температури здійснюється через зважене додавання температур чутливих елементів.

Вагові коефіцієнти лінійної екстраполяції залежать лише від виду середовища і практично не залежать від глибини занурення сенсора та температури середовища.

1. Аугустин С., Бернгард Ф., Дорожовець Н. Результати дослідження температурних полів терморезистивних перетворювачів // Вісник НУ "Львівська політехніка". № 445. С. 32–36. 2002.
2. Бернгард Ф., Дорожовець М., Дорожовець Н. Модель похибки екстраполяції температури при застосуванні трьохелементного резистивного перетворювача // Вимірювальна техніка та метрологія. Львів. 2002. Вип.59.
3. Аугустин С., Бернгард Ф., Дорожовець Н. Результаты исследования температурных полей терморезистивных преобразователей // Metody i technika przetwarzania sygnałów w pomiarach fizycznych. Elektrotechnika z.22. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów, 2002. – S. 9–14.
4. Бернгард Ф., Дорожовець М., Дорожовець Н. Исследование погрешности определения температуры среды при измерениях трехэлементным резистивным сенсором // Metody i technika przetwarzania sygnałów w pomiarach fizycznych. Elektrotechnika z.24. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów, 2002. – S. 9–16.