

УДК 536.53

С. Аугустін, Ф. Бернгард, Н.М. Дорожовець*

Інститут вимірювальної та сенсорної техніки, Ільменау, Німеччина,

*Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра “Інформаційно-вимірювальна техніка”

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ТЕРМОРЕЗИСТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Аугустін С., Бернгард Ф., Дорожовець Н.М., 2002

Наведено результати розрахунку температурних полів платиного терморезистивного перетворювача. Досліджено залежності температур чутливих елементів від різних факторів. Запропоновано використати квадратичне наближення температурного профілю термоперетворювача. Експериментально і теоретично розраховано похибку визначення вимірюваної температури для різної глибини занурення і виду досліджуваного середовища.

In the article the results of the sensor temperature fields calculating are given. The dependences of the distribution of temperatures of sensing elements on different factors are investigated. The quadratic approximation of the temperature of sensor profile is proposed. The temperature determination errors depended from the different submersion depths and form of the medium kind are calculated theoretically and experimentally.

1. Вступ. Внаслідок впливу різних факторів (скінченної теплопровідності матеріалів елементів конструкції терморезистивного перетворювача, зміни теплофізичних властивостей досліджуваного середовища, різної глибини занурення, тепловіддачі в навколишнє середовище через незанурену частину, а також інших факторів) температура чутливих елементів перетворювача за скінченний проміжок часу не досягає температури досліджуваного середовища, тому виникає похибка вимірювання температури. Для обґрунтування можливості корекції цієї похибки (принаймні часткової) необхідно встановити залежності просторового розподілу температури перетворювача від найважливіших аспектів:

- параметрів досліджуваного і навколишнього середовищ;
- конструкції та матеріалів елементів перетворювача, зокрема від похибок його виготовлення;
- глибини занурення.

Необхідні для цього дослідження були виконані у Технічному університеті м. Ільменау (Німеччина), де для фірми TMG був розроблений принципово новий платиновий термометр опору з трьома чутливими елементами. Цей термометр планується застосовувати для вимірювання температури на промислових об'єктах зі зміною рівня досліджуваного середовища, а також інших його теплотехнічних характеристик у широкому діапазоні. Оскільки це нова розробка (рис. 1), то важливо також оцінити похибки вимірювання температури внаслідок можливих неточностей виготовлення і встановлення термометра. Для визначення необхідних залежностей були виконані імітаційні й експериментальні дослідження температурних полів сенсора в різних умовах його використання.

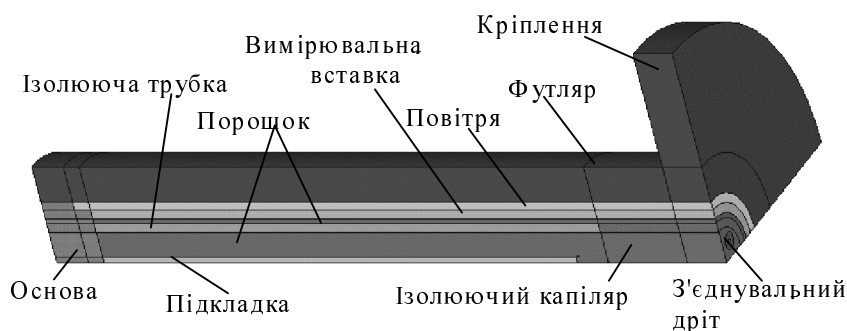


Рис.1. Будова термометра опору

2. Математична основа досліджень. Математичною основою всіх розрахунків є закон теплопровідності Фур'є, який описується диференціальним рівнянням [1]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v,$$

де T – температура; ρ – щільність, c – питома теплоємність матеріалу, λ – теплопровідність, q_v – об'ємна щільність теплового потоку; x, y, z – просторові координати.

Для розв'язання цього рівняння повинні бути задані форма і розміри конструкційних елементів термометру, теплофізичні параметри досліджуваного і навколишнього середовищ, а також матеріалів конструкційних елементів. Крім того, повинні бути описані крайові умови (Діріхле, Неймана, при конвекційному теплообміні – закон Ньютона, і умови сполучення [1]).

Теоретично це рівняння розв'язати важко, а в багатьох випадках практично неможливо. Тому розглядають або дуже спрощену модель терморезистивного перетворювача (одновимірна теплопередача в осьовому напрямку), що не дає повного уявлення про поширення і розподіл температури, або використовують числові методи, насамперед – метод скінченних елементів (МСЕ) [2].

3. Використання методу скінченних елементів на основі FE-програми ANSYS. У МСЕ для вивчення температурного поля використовують спеціальну апроксимацію диференціального рівняння теплопередачі з наступним розв'язуванням отриманих систем лінійних рівнянь. МСЕ базується на варіаційних формулюваннях польових задач і застосуванні фінітних апроксимуючих базисних функцій. Метод вимагає відповідного програмного забезпечення: у нашій роботі для розв'язування теплових задач був використаний програмний пакет ANSYS [3,4].

3.1. FE-програма ANSYS. Програмний пакет ANSYS має всі засоби, необхідні для моделювання і дослідження фізичних (у нашому випадку теплових) полів в інтерактивному режимі [3,4]: відповідні бази даних, інтерпретацію команд і графічне представлення результатів. Найскладнішими етапами роботи є: створення власної моделі, оптимальна дискретизація складових частин сенсора на скінченні елементи, оптимальне задання параметрів конструкційних матеріалів і граничних (крайових) умов. Інші роботи програма виконує цілком самостійно.

Користувач займається: оцінюванням результатів, що видаються в наочній формі у вигляді температурних полів, таблиць з числовими даними, графіків тощо, контролем (за отриманими результатами) правильності моделі, граничних умов, розбиття на елементи тощо.

3.2. Загальна схема досліджень. Для дослідження теплопередачі від досліджуваного середовища через конструкційні складові термоперетворювача до його чутливих елементів були створені математичні 2D- і 3D-моделі. З точністю до $\pm 0,05-0,10$ мм передана геометрія, характеристики матеріалів термометра (теплопровідність), а також досліджуваного середовища (крайові умови, коефіцієнти теплопередачі).

1. Розраховано МСЕ й отримано просторовий розподіл температур (температурне поле) усіх частин (зокрема чутливих елементів) перетворювача.

2. Отримані дані були порівняні з експериментальними, для чого виміряно температуру середовища термометрами – прототипами моделей.

3. Дослідження і порівняння виконані для різних умов, конструкційних параметрів і матеріалів термометра (розраховано близько 140 моделей).

4. На основі цих даних виведена апроксимуюча формула для температури досліджуваного середовища і зроблені висновки про конструкційні параметри термометра.

3.3. Характеристики моделі перетворювача і умов:

- Загальна довжина сенсора становить 400 мм.
- Глибина занурення в досліджуване середовище – 3 ступені: $L=40$ мм; 63 мм; 100 мм;
- Досліджуване середовище [5] (табл. 1).

Таблиця 1

Середовище	$\alpha, W/m^2K$	Середовище	$\alpha, W/m^2K$	$T_m, ^\circ C$ – температура досліджуваного середовища
Вода $v=0,2m/s$	3540	Повітря, $v=2m/s$	50	90
Олія	250	Повітря, $v=1m/s$	34,5	90

• Навколишнє середовище для верхньої частини перетворювача – повітря ($T=25^\circ C$, $\alpha=20W/m^2K$).

- Матеріали конструкційних елементів термоперетворювача [5] (табл. 2).

Таблиця 2

№	Позначення	$\lambda, W/m$	№	Позначення	$\lambda, W/mK$
1	Футляр, Сталь 1.4571	15	6	Al_2O_3 – Порошок	0,31
2	Повітряний прошарок	0,033	7	Ізолююча трубка, KER610	2
3	Вимірювальна вставка 1.4571	15	8	Підкладка, KER799	19
4	Ізолюючий капіляр, KER610	2	9	Срібна підставка (основа)	418
5	З'єднувальний дріт, NiSi	29,5			

Відповідно до конструкції термоперетворювача (рис. 1) була створена 3D-модель МСЕ для дослідження просторового розподілу температури в ньому. При апроксимації МСЕ в основному використовувалися кубічні скінченні елементи. Їхня загальна кількість сягає більше ніж кілька десятків тисяч.

4. Результати досліджень.

4.1. Результати розрахунку температурних полів терморезистивного перетворювача. Досліджені як теплові процеси у всьому перетворювачі, так і температурні профілі вздовж підкладки з чутливими елементами. Графічно визначено залежності температур чутливих елементів від глибини занурення сенсора, параметрів навколишнього середовища, конструктивних параметрів (матеріалів основи, товщини футляра), а також від похибок виготовлення та експлуатації (рис. 2).

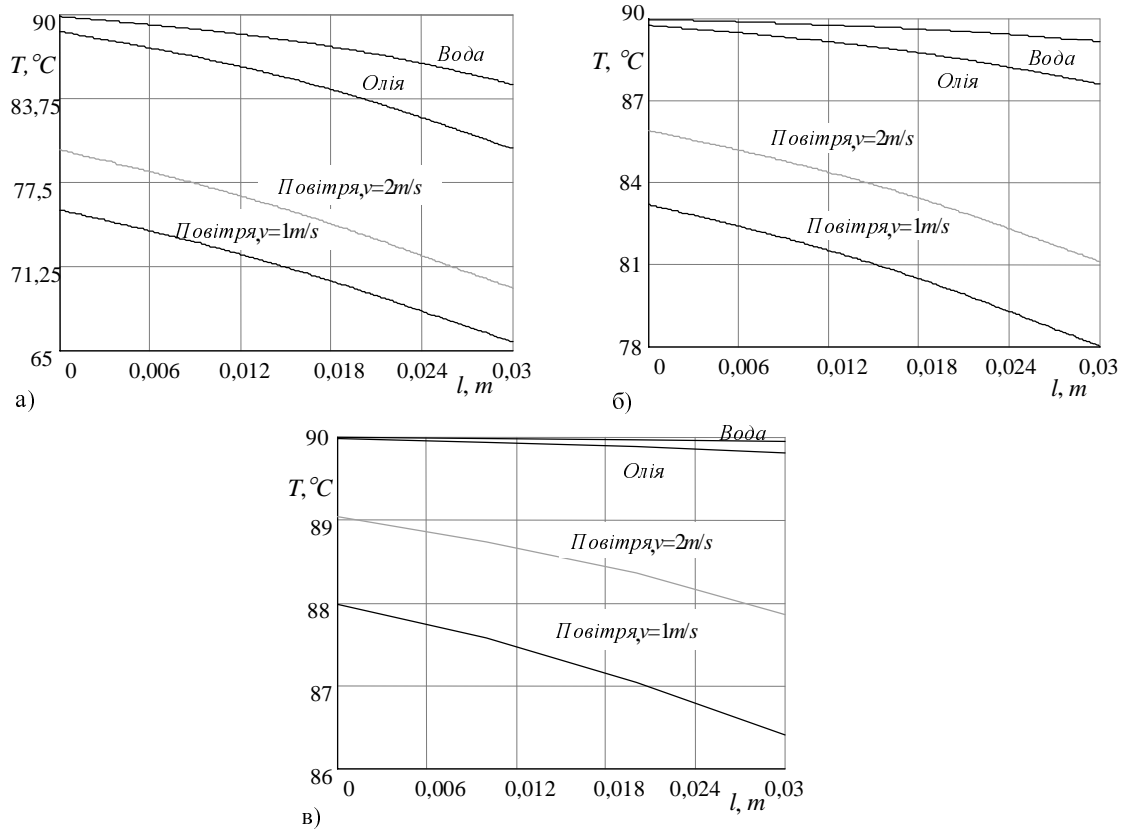


Рис. 2. Температурний профіль вздовж підкладки перетворювача.
Глибина занурення: а) 40 мм; б) 63 мм; в) 100 мм

4.2. Математична модель для корекції результату вимірювання температури. Для корекції показів термометра з врахуванням неоднорідності температурного профілю вздовж підкладки перетворювача розміщено 3 Pt100-чутливі елементи (рис. 3), які визначають три температури (рис. 4). За допомогою цих температур можна обчислити температуру основи термометра і далі – шукану температуру досліджуваного середовища.

На основі досліджень і експериментальних даних запропоновано з достатньою точністю використовувати просте квадратичне наближення температурного профілю:

$$T(S) = a \cdot S^2 + b \cdot S + c$$

Коефіцієнти a , b і c визначаються за допомогою відомих (вимірних або розрахованих) температур чутливих елементів. Відносна похибка апроксимації при основі перетворювача (термометра) не перевищує 1%.

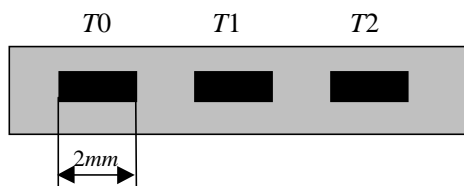


Рис. 3. Чутливі елементи перетворювача

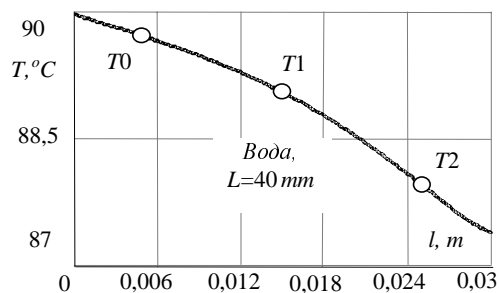


Рис. 4. Температурний профіль перетворювача з трьома чутливими елементами

На основі експериментальних даних показано, що шукана температура середовища відповідає екстремуму апроксимуючої функції:

$$T(S_{med}) = c - \frac{b^2}{4a}.$$

Розрахована за цим виразом температура виявляється значно ближчою до відповідної дійсної температури середовища (у цьому випадку 90 °C), вона вища, ніж максимальна температура чутливих елементів, і її легко розрахувати. Розрахунок не залежить від параметрів термометра, умов вимірювання і властивостей досліджуваного середовища. Це найважливіша перевага цього методу.

4.3. Відносні похибки для різних глибин занурення перетворювача і параметрів середовищ. Відносні похибки визначення температури запропонованим способом залежно від глибини занурення сенсора, а також від виду досліджуваного середовища:

$$\delta_{T(S_{med})} = \frac{|T(S_{med}) - 90|}{90} \cdot 100\%,$$

де 90 – дійсна температура середовища.

Числові значення похибки наведені нижче в табл. 3.

Таблиця 3

<i>L</i> , mm	Повітря, $v=1m/s$, %	Повітря, $v=2m/s$, %	Олія, %	Вода, %
40	7,6	3,8	0,14	0,05
63	4,0	1,9	0,03	0,008
100	1,2	0,5	0,003	0,00003

5. Висновки

- При моделюванні з точністю до $\pm 0,05-0,10$ мм передана геометрія термометра.
- За коректно заданих умов за допомогою 3D-моделі можна з високою точністю розрахувати температурні поля, і зокрема, температури чутливих елементів.
- Отримані дані перевірені експериментально.
- Виведена квадратична апроксимуюча формула для температури досліджуваного середовища.
- Дослідження виконані для близько 140 моделей.
- Порівнянням моделей з основою футляра з високоякісної сталі та срібла показано, що застосування сталі не веде до істотного збільшення похибки вимірювання.
- Можливі невідомі зміщення як підкладки термперетворювача, так і окремих чутливих елементів спричиняють великі похибки вимірювання.
- Досліджено моделі термометра з різними стандартними захисними футлярами.

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., 1972.
 2. Зенкевич О.К., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. Л., 1986. 3. Groth, C., Müller, G.: FEM für Praktiker – Temperaturfelder: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zur Methode der Finiten Elementen mit dem FE-Programm ANSYS 5.3: Temperaturfeldberechnungen, 2. Auflage; expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1998. 4. Einleitung zum FE-Programm ANSYS 5.3. 5. VDI – WÄRMEATLAS Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Sechste, erweiterte Auflage, Düsseldorf, 1991.