

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ ОБЛІКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ВОДНИХ СИСТЕМАХ ОПАЛЮВАННЯ

Аміров Р.З., Китаєв І. М.

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк  
кафедра електронної техніки  
E-mail: kaf-et@kita.dgtu.donetsk.ua

### Abstract

*Amirov R.Z., Kitaev I. M. The accuracy of measurement of temperature in account of heat energy in the water systems of heat supply. There are considering questions concerning laps of means of measurement of temperature in this article. The means of measurement of temperature are critical analyzed. Methods of increase of accuracy of measurement of temperature are considered.*

**Загальна постановка проблеми.** Створення та впровадження систем контролю та обліку енергоресурсів в Україні, у тому числі теплової енергії – це шлях до зниження витрат на енергоресурси, а також шлях до підвищення коректності взаємовідносин між постачальниками та споживачами енергоресурсів.

Існуючі теплові системи проектувалися та створювалися без урахування можливостей, що з'явилися на теплоенергетичному ринку на протязі останніх 10 років. Масовий розвиток обчислювальної техніки зумовив появу в цей час величезної кількості технологічних нововведень, які докорінно змінили ситуацію в енергозбереженні. Також з появою сучасних вимог до вимірювальних процесів усі методи й засоби вимірювання, що використовувалися з'явилися недостатніми.

**Постановка завдань дослідження.** Інструментальний облік теплової енергії потребує регулярних вимірювань температур у трубопроводах системи водяного теплопостачання. При цьому систематична складова похибки вимірювань температур несе істотний, а в умовах малого перепаду температур між подаваним і зворотнім трубопроводами (3-20 °С) навіть визначаючий внесок у точність обліку теплоспоживання.

Для підвищення точності вимірювання температури необхідно вирішити наступні завдання:

- провести критичний аналіз засобів вимірювання температури теплоносія;
- визначити фактори, які найбільш істотно впливають на точність вимірювання температури;
- запропонувати метод зменшення похибки виміру температури.

**Рішення завдань і результати досліджень.** В якості чутливих елементів для вимірювання температури найбільше розповсюдження отримали термоперетворювачі опору, дія яких полягає у температурній залежності електричного опору. Цією властивістю володіє багато матеріалів, але лише небагато з них задовольняють вторинним експлуатаційним вимогам, пов'язаним зі стабільністю властивостей та чутливості до зовнішнього впливу по іншим фізичним параметрам (тиск, щільність магнітного потоку та ін.). Усьому комплексу метрологічних та експлуатаційних вимог задовольняє відносно вузька номенклатура матеріалів, представлених різними видами речовин, здібних проводити електричний струм: металами, напівпровідниками, електролітами.

**Мідні термоперетворювачі опору.** Звичайна мідь, що поставляється системою постачання й торгівлі у вигляді дроту та проводів усіх розмірів, недефіцитна, дешева, чиста та гомогенна – задовольняє усім вимогам, що пред'являються до матеріалу чутливих елементів термоперетворювачів опору для вимірювання помірних температур. Суттєвий практичний недолік міді – при температурі більш 300 °С вона починає активно окислюватися. Тому мідь

застосовується в чутливих елементах термоперетворювачів опору для вимірювання температур не більш  $200^{\circ}\text{C}$ . До числа недоліків міді слід віднести і її малий питомий опір ( $\rho=1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м).

*Нікелеві термоперетворювачі опору.* Переваги нікелю перед міддю – високі температурні коефіцієнти опору ( $\alpha=6,4 \cdot 10^{-3}$ ) та питомий опір ( $\rho=12,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м), недолік – великий вплив забруднення на температурний коефіцієнт опору.

*Напівпровідникові термоперетворювачі опору.* Володіють екстремальними характеристиками, що піддаються конструктивній варіації у широких межах. Тому вони поряд з металевими термометрами ефективно використовуються у системах вимірювання, контролю та автоматизації у виробничих технологічних комплексах. Серійні напівпровідникові термоперетворювачі опору не володіють високою стабільністю характеристик.

*Платинові термоперетворювачі опору.* Задовольняють усім вимогам, що пред'являються до матеріалу чутливих елементів термоперетворювачів опору та володіють досить надійними характеристиками. Мають широкий діапазон вимірювальних температур. Тому в якості датчиків температури в теплолічильниках вони знайшли найбільш широке застосування.

Застосовуються термоперетворювачі із номінальним опором при  $0^{\circ}\text{C}$  ( $R_0$ ), що дорівнює 100 і 500 Ом, та номінальним відношенням ( $W_{100}$ ) опору при  $100^{\circ}\text{C}$  ( $R_{100}$ ) до опору  $R_0$  для вітчизняних термоперетворювачів опору – 1,3911, а для імпорتنих – 1,3851 (табл. 1).

Таблиця 1 – Основні параметри технічних термоперетворювачів опору

Тип	Номінальне значення опору при $0^{\circ}\text{C}$ , Ом	Умовне позначення	Клас допуску	Номінальне значення відношень опорів $W_{100}$	Діапазон вимірювальних температур, $^{\circ}\text{C}$	Допустима похибка вимірювання, $^{\circ}\text{C}$
Платинові	100	100П (Pt 100)	A	1.3911	-260...+750	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$
			B	1.3851	-200...+650	$\pm(0,3+0,005 \cdot  t )$
	500	500П (Pt 500)	A	1.3911	-200...+1000	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$
			B	1.3851	-200...+650	$\pm(0,3+0,005 \cdot  t )$
			A	1.3911	-260...+300	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$
			B	1.3851	-200...+300	$\pm(0,3+0,005 \cdot  t )$

З таблиці видно, що застосовуючи навіть самі точні термоперетворювачі, можливо отримати дуже неточні результати вимірювань тепла.

Встановлено, що середнє квадратичне відхилення результату вимірювання  $\Delta R_0$  для платинових термоперетворювачів опору класу В, що мають номінальну статичну характеристику 100П складає:  $s=0,025$ ,  $\Delta R_0=0,1=4s$  [1]. Також встановлено, що номінальне значення  $W_{100}$ , що дорівнює 1,3911 не відповідає дійсному значенню  $W_{100}$  і дорівнює 1,3916. У зв'язку з цим для платинових термоперетворювачів опору характерна систематична похибка, яка повинна бути урахована при визначенні точності вимірювання температури.

Також встановлено, що на похибку вимірювання температури впливає нелінійність характеристики перетворення термоперетворювача, та у діапазоні від  $60$  до  $90^{\circ}\text{C}$  цей вклад до абсолютної похибки вимірювання може досягати  $0,27^{\circ}\text{C}$ .

Тому були розглянуті методи, які застосовуються для усунення цих недоліків [2]. Перший є той, при якому встановлюються дійсні характеристики термоперетворювачів опору при їх виготовленні й виконується перевірка з наступним урахуванням у результатах вимі-



рювань виправлень на фактичні значення характеристик засобів вимірювань. При цьому застосовується декілька видів корекції:

- Корекція результатів вимірювань температур, що зроблені без урахування виправлень.
- Корекція результатів вимірювань опору датчиків температури.
- Корекція результатів обчислювань  $W_f$  (відношення вимічених значень опору до фактичного опору датчика температури при  $0^\circ\text{C}$ ).
- Корекція коефіцієнтів алгоритму зворотного перетворення інтерполяційного рівняння термоперетворювача опору.

Також корекція може полягати на індивідуальному налаштуванні кожного вимірювального каналу температури теплообчислювача на фактичні характеристики конкретного термоперетворювача опору.

Зрозуміло, що така корекція може бути реалізована при випуску з виробництва або ремонту практично любого типу сучасного теплообчислювача. Але вона веде до прив'язки термоперетворювача опору до конкретного входу теплообчислювача, додатковій перевірці при заміні термоперетворювача опору та важкості методики перевірки теплообчислювача.

Результати розрахунку похибки при корекції результатів вимірювань температур  $\Delta t_k$  та результатів вимірювань опору датчиків температури  $\Delta t_{Rk}$  в діапазоні температур  $0...150^\circ\text{C}$  наведені на рис. 1.

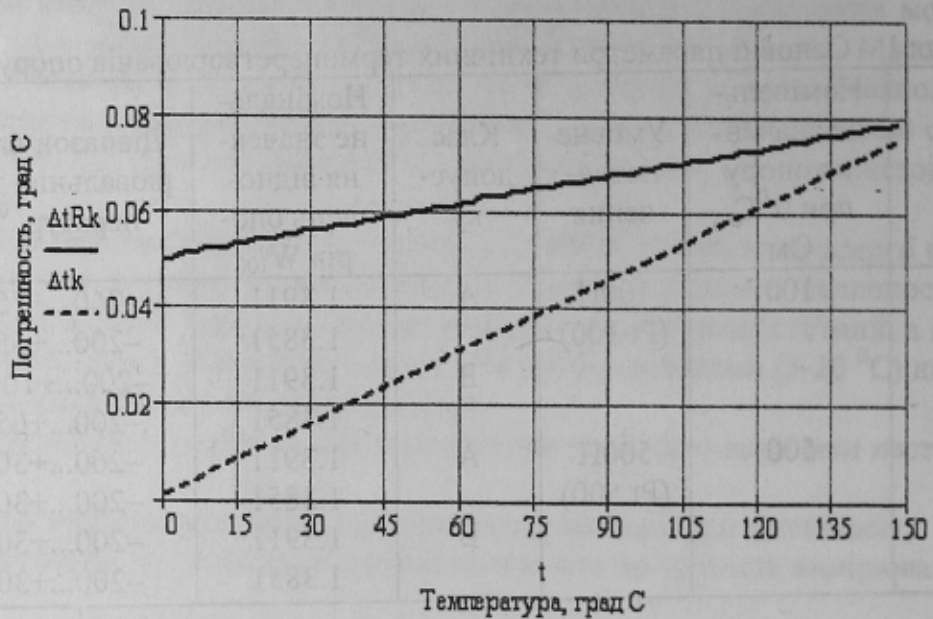


Рисунок 1 – Похибки вимірювань температур при урахуванні виправлень

Як видно з рисунка 1 корекція результатів вимірювань термоперетворювачем опору класу А може знизити абсолютну похибку вимірювання температури до значення  $0,03...0,04^\circ\text{C}$  (при корекції результатів вимірювань температур) та  $0,063...0,066^\circ\text{C}$  (при корекції результатів вимірювань опору датчиків температури) у заданому діапазоні температур.

Моделювання вимірювання температури при корекції результатів вимірювань температур та результатів вимірювань опору датчиків температури показало, що абсолютна похибка вимірювання температури значно знижується.

Максимальне значення абсолютної похибки вимірювання температури при корекції результатів вимірювань температур дорівнює  $0,15^\circ\text{C}$ , а при корекції результатів вимірювань опору датчиків температури –  $0,36^\circ\text{C}$ . Як видно, абсолютна похибка вимірювання температури знижується, але цей метод потребує періодичної перевірки термоперетворювачів, що не зовсім зручно, та не забезпечує достатньої точності.

Тому була розглянута можливість використання тестових методів [3, 4] для підвищення точності вимірювання температури, які дозволяють виключити вплив на результат вимірювання параметрів термоперетворювачів опору й ряду інших складових похибки вимірювання шляхом перетворення спеціальних тестів, функційно пов'язаних з вимірювальною величиною, й обробки результатів перетворень за заданим алгоритмом. Була застосована реляційна модель вимірювального каналу (рис. 2).

Опір терморезистора 1 за допомогою вимірювального каналу, який складається з перетворювача 2, нормуючого підсилювача 3, керованого випрямлювача 5 та АЦП 8 перетворюється в код. На виході каналу формується код опору терморезистора

$$N_1 = A \cdot R_0(1 + S \cdot t),$$

де  $A$  – результуючий коефіцієнт прямого перетворення каналу;

$R_0$  – номінальний опір термоперетворювача при  $0^\circ\text{C}$ ;

$S$  – крутизна перетворення, що відповідає температурі  $t$ .

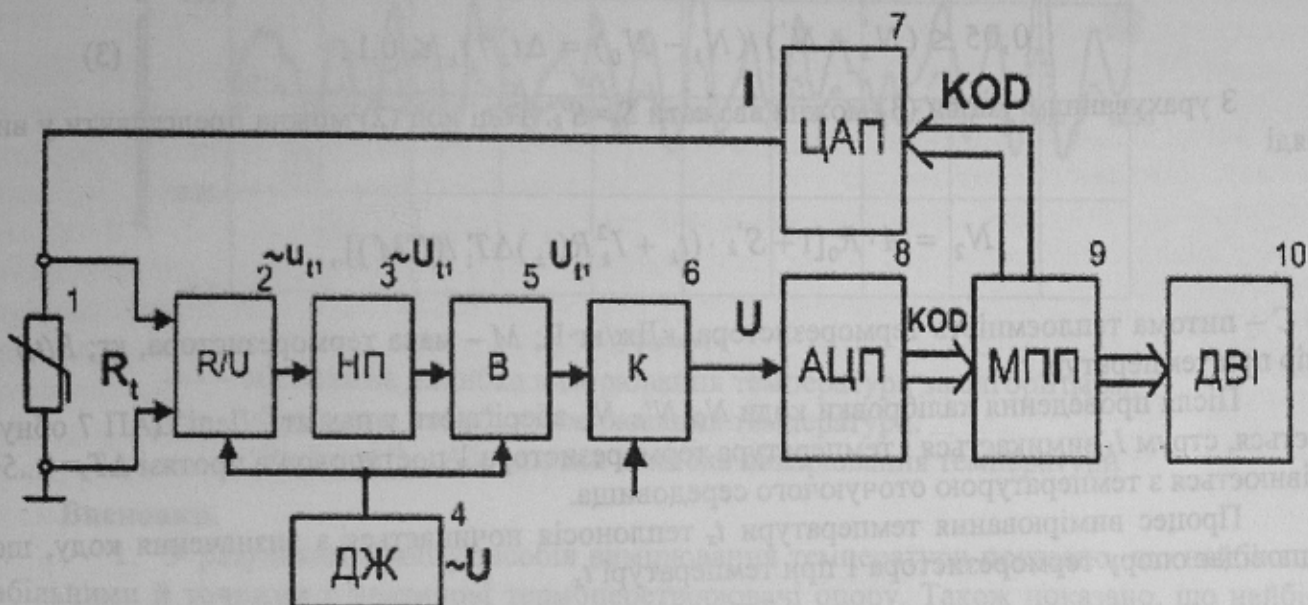


Рисунок 2 – Реляційна модель вимірювального каналу температури

Перед початком експлуатації каналу необхідно зробити його калібровку разом із термометром опору. Для цього температура калібровки обирається зі співвідношення

$$t_k = \sqrt{t_{\min} \cdot t_{\max}}. \quad (1)$$

У пам'яті мікропроцесорного пристрою 9 фіксується код, що відповідає каліброваній температурі  $t_k$

$$N_1' = A \cdot R_0(1 + S_k \cdot t_k),$$

де  $S_k$  – крутизна перетворення, що відповідає температурі  $t_k$ .

Додатково фіксується код при  $t_k=0^\circ\text{C}$

$$N_0 = A \cdot R_0$$

За допомогою цифро-аналогового перетворювача 7 коду в струм створюється на його виході постійний струм, квадрат якого є пропорційним каліброваній температурі  $t_k$

$$I_k^2 = B(N_1' - N_0),$$

де  $B$  – коефіцієнт зворотного перетворення коду вимірювального каналу.

Струм  $I_k$  протікає через терморезистор 1 і викликає його додаткове нагрівання. У результаті цього температура терморезистора 1 при часі нагріву  $\Delta T_1$  зростає.

За спливанням часового інтервалу  $\Delta T_1$  фіксується код на виході вимірювального каналу

$$N_2' = A \cdot R_0 [1 + S_k' \cdot (t_k + \Delta t_k')], \quad (2)$$

де  $S_k'$  – крутизна перетворення, яка відповідає температурі  $(t_k + \Delta t_k')$ .

Значення коефіцієнта зворотного перетворення  $B$  вибирається таким, щоб відносне збільшення коду  $N_2'$  по відношенню до первинного коду  $N_1'$  знаходилося б у межах 5...10 %:

$$0,05 \leq (N_2' - N_1') / (N_1' - N_0) = \Delta t_k' / t_k \leq 0,1. \quad (3)$$

З урахуванням умови (3) можна вважати  $S_k = S_k'$ . Тоді код (2) можна представити у вигляді

$$N_2' = A \cdot R_0 [1 + S_k' \cdot (t_k + I_k^2 R(t_k) \Delta T_1 / (CM))],$$

де  $C$  – питома теплоємність терморезистора, кДж/кг·К;  $M$  – маса терморезистора, кг;  $R(t_k)$  – опір при температурі  $t_k$ .

Після проведення калібровки коди  $N_0$ ,  $N_1'$ ,  $N_2'$  зберігають у пам'яті. Далі ЦАП 7 обнуляється, струм  $I_k$  вимикається і температура терморезистора 1 поступово на протязі  $\Delta T_2 = 4...5 \tau$  зрівнюється з температурою оточуючого середовища.

Процес вимірювання температури  $t_x$  теплоносія починається з визначення коду, що відповідає опору терморезистора 1 при температурі  $t_x$

$$N_1'' = A \cdot R_0 [1 + (S_k + \Delta S_x) t_x],$$

де  $\Delta S_x$  – змінення крутизни перетворення терморезистора через відмінності температури  $t_x$  від  $t_k$ .

Потім за командою мікропроцесора 9 у ЦАП створюється струм, квадрат якого є пропорційним вимірювальній температурі

$$I_x^2 = B(N_1'' - N_0),$$

Нагрів терморезистора 1 відбувається також на протязі часового інтервалу  $\Delta T_1$ . За ви-током  $\Delta T_1$  фіксується код

$$N_2'' = A \cdot R_0 [1 + (S_k + \Delta S_x) \cdot (t_x + I_x^2 R(t_x) \Delta T_1 / (CM))].$$

Після одержання коду  $N_2''$  ЦАП обнуляється і температура терморезистора 1 зрівнюється з температурою контрольованого середовища за час  $\Delta T_2$ .

Остаточно отримуємо



$$t_x = \frac{(N_2' - N_1')(N_1'' - N_0)''^2 N_1''}{(N_2'' - N_1'')(N_1' - N_0)''^2 N_1''} \cdot t_k.$$

З виразу витікає, що вимірювана температура  $t_x$  не залежить від змінної крутизни перетворення, а значить, ступеня нелінійності перетворювальної характеристики.

На етапі калібровки термометра опору з вимірювальним каналом вибирається час його нагріву  $\Delta T_1$  та час охолодження  $\Delta T_2$ , обирається каліброчна температура  $t_k$  згідно з виразом (1). З результатами калібровки визначають та запам'ятовують у мікропроцесорі коди  $N_0, N_1', N_2''$ .

Моделювання роботи алгоритму підвищення точності вимірювання температури показало, що максимальна абсолютна похибка вимірювання температури не перевищує  $0,13 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3).

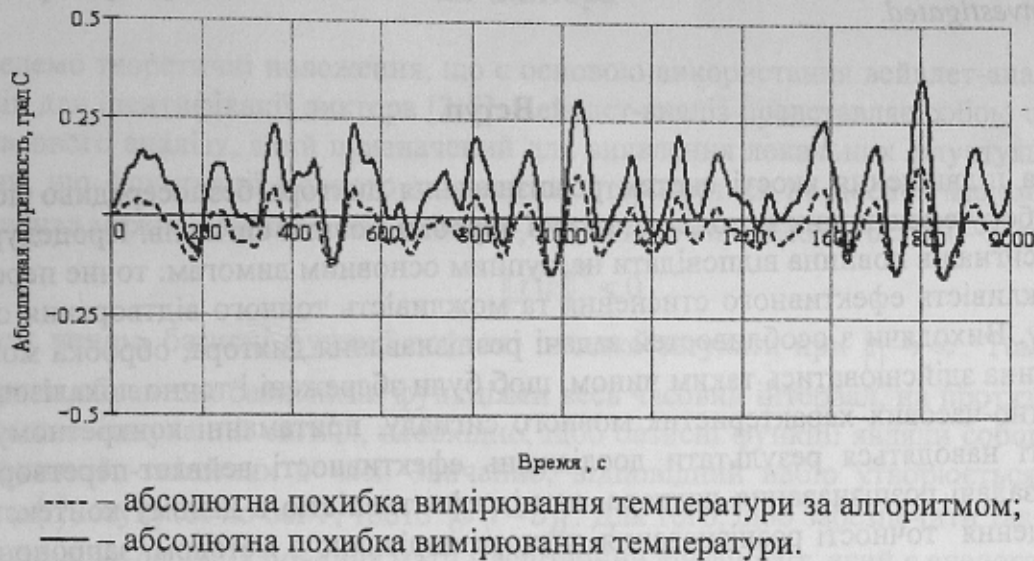


Рисунок 3 – Абсолютна похибка вимірювання температури

### Висновки.

1. У результаті аналізу засобів вимірювання температури показано, що найбільш стабільними й точними є платинові термоперетворювачі опору. Також показано, що найбільший внесок у похибку вимірювання температури вносить нелінійність характеристики перетворення термоперетворювача.

2. Виконаний аналіз методів по підвищенню точності вимірювання температури показав, що найбільш доцільним є метод програмної корекції похибок від нелінійності та нестабільності самого термоперетворювача опору при використанні реляційної моделі вимірювального каналу з додатковим підігрівом терморезистора для одержання інформації про поточні значення крутизни перетворення температури в зміни опору терморезистора.

### Література

1. Геращенко О.А., Гордов А.Н. и др. Температурные измерения: Справочник; Ин-т проблем энергосбережения. - Киев: Наук. думка, 1989. - 704 с.
2. Лачков В.И. Об эффективности учета поправок на фактические характеристики термопреобразователей.;
3. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. - М.: Мир, 1978. - 176 с.;
4. Головка Д.Б., Скрипник Ю.О., Хімичева Г.І. Структурно-алгоритмічні методи підвищення точності вимірювання температури. - К.: ФАДА, ЛТД, 1999. - 206 с.