

## МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДИК РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ШКАЛИ БАГАТОТОЧКОВИМ МЕТОДОМ ДЛЯ ТЕРМОМЕТРІВ ВИПРОМІНЕННЯ

© Гоц Н., 2012

Розглянутий багатоточковий метод реалізації температурної шкали. На основі комп'ютерного моделювання проведений порівняльний аналіз різних методик її побудови. Обґрунтовано переваги застосування комбінованого методу для реалізації температурної шкали.

**Ключові слова:** температурна шкала, похибка, багатоточковий метод побудови шкали.

**In the article the method of multipoint temperature scale. Based on computer modeling of the comparative analysis of different methods conducted. The advantages of the use of the combined method for the realization of the temperature scale.**

**Key words:** temperature scale, error, multipoint method for realisation the temperature scale.

### Актуальність

У світі розвиваються два основних напрямки побудови температурної шкали, закладені ще на початку XVIII сторіччя в роботах Амонтоні і Фаренгейта. Перший з них базується на єдиній фіксованій точці і не залежить від властивостей термометричної речовини, що використовується та веде до створення термодинамічної температурної шкали. Другий шлях, заснований на використанні певних фіксованих точок і інтерполяційних термометрів, веде до створення практичних температурних шкал, еволюція яких наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Еволюція розвитку міжнародних практичних температурних шкал

№	Назва шкали	Температурні діапазон	Прилад для реалізації	Чинність
1	Normal Hydrogen scale NHS	-25 °С.....100 °С	Газовий термометр	Не чинна
2	Міжнародна температурна шкала МТШ-27	-198 °С.....660 °С	Платиновий термометр опору	Не чинна
		660 °С.....1063 °С	Платино-ренієва термопара	
		1063 °С.....	Термометр випромінення	
3	Міжнародна практична температурна шкала МПТШ-48	-183.....660 °С	Платиновий термометр опору	Не чинна
		660 °С.....1063 °С	Платино-ренієва термопара	
		1063 °С.....	Термометр випромінення	
4	Міжнародна практична температурна шкала МПТШ-68	13,81 К.....660,74 °С	Платиновий термометр опору	Не чинна
		660,74 °С...1064,43°С	Платино-ренієва термопара	
		1064,43 °С.....	Термометр випромінення	
5	Тимчасова температурна шкала ТТШ-76	13,81 К.....660,74 °С	Платиновий термометр опору	Не чинна
		660,74 °С...1064,43 °С	Платино-ренієва термопара	
		1064,43 °С.....	Термометр випромінення	
6	Міжнародна температурна шкала МТШ-90	0,65 К...5 К	Вимірювання тиску газів	Чинна
		3К.....24,5561 К	Газовий термометр	
		13,803 К...961,78 °С	Платиновий термометр опору	
		961,78 °С.....	Термометр випромінення	
7	Тимчасова міжнародна низько-температурна шкала ТМНШ-2000	0,902 мК К до 1 К	Вимірювач тиску газу	Чинна

Міжнародним бюро мір та ваг визначені такі напрями розвитку температурної шкали [1]:

- збереження і модернізація Міжнародної температурної шкали – 1990 (МТШ-90);
- відмова від практичних шкал і відтворення термодинамічної температурної шкали за допомогою первинних термометрів;

Міжнародний консультативний комітет з термометрії рекомендує такі основні напрямки досліджень з вдосконалення МТШ-90 [1]:

1. Удосконалити інтерполяційні прилади для діапазону температур від точки тверднення алюмінію до точки тверднення срібла, можливо, на основі золото-платинової термопари, оскільки надійність звичайних високотемпературних термометрів опору в цих умовах низька.

2. Досліджувати можливості використання нових математичних методів для створення точніших інтерполяційних функцій.

3. Завершити дослідження наявних реперних точок в МТШ-90 і провести дослідження з метою створення нових реперних точок, зважаючи на обмеження у використанні з цієї метою ртуті.

Отже, можна вважати, що сучасним напрямком реалізації температурної передачі її контактним термометрам та термометрам випромінення є розвиток методів первинної термометрії, що базуються на використанні природних закономірностей, зокрема на законі випромінення Планка.

### Мета дослідження

Тому метою статті є дослідження можливостей реалізації температурної шкали (ТШ) на засадах первинної термометрії, а саме термометрії випромінення. Це дасть можливість реалізувати температурну шкалу незалежно від властивостей засобів вимірювання на основі природних законів, зокрема закону Планка. Цей метод міг би існувати паралельно з методом, визначеним МТШ-90, та слугувати для передачі температурної шкали термометрам випромінення.

### Аналіз публікацій.

У температурному діапазоні, в якому функціонують термометри випромінення, згідно з МТШ-90 температура визначається в двох основних температурних інтервалах: від 0°C до 961,78°C та від 961,78°C і вище. Розглянемо докладніше методи реалізації температурної шкали.

МТШ-90 від 0 °C до 961,78 °C визначає температуру між потрійною точкою води та точкою тверднення срібла (961,78 °C) за допомогою еталонного платинового термометра опору, який калібрується в реперних точках (потрійній точці води, точці плавлення галію, точках тверднення індію, олова, цинку, алюмінію, срібла) на основі інтерполяційної залежності (1).

$$T - 273,15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[ \frac{W_r(T_{90}) - 2,64}{1,64} \right], \quad (1)$$

де  $T$  – температура;  $D_i$  – сталі;  $W_r(T_{90})$  – відносний опір платинового термометра.

Аналіз показує, що такий підхід не може забезпечити підвищені вимоги до точності реалізації шкали, оскільки вона значно залежить від варіації властивостей платинових термометрів опору. Причинами непевності при реалізації температурної шкали є: варіації властивостей різних термометрів опору, ефект окислення платини, зміна концентрації вакансій кристалічної ґратки, напруження та деформації чутливого елемента, довготривалий дрейф опору тощо [2].

Вище від точки тверднення срібла 961,78°C побудова температурної шкали відбувається відповідно до МТШ-90 [3] оптичними методами на основі рівняння Планка та ґрунтується на випромінювачі типу абсолютно чорне тіло та основних реперних точках тверднення срібла  $T_{90}(\text{Ag})$ , золота  $T_{90}(\text{Au})$  або міді  $T_{90}(\text{Cu})$ . Згідно з МТШ-90 температура  $T_{90}(x)$  визначається за таким виразом:

$$\frac{b(T_{90})}{b(T_{90}(x))} = \frac{\exp\left(\frac{C_2}{IT_{90}(x)} - 1\right)^{-1}}{\exp\left(\frac{C_2}{IT_{90}} - 1\right)^{-1}}, \quad (2)$$

де  $T_{90}(x)$  – одна із альтернативних реперних точок ;  $C_2 = 0,014388 \text{ м}\cdot\text{К}$ ,  $b(T_{90})$  та  $b(T_{90}(x))$  – потік випромінення відповідно при температурах реперної точки та шуканої.

Цей метод побудови температурної шкали має деякі особливості, а саме для побудови температурної шкали використовуються високоточні термометри випромінення та абсолютно чорні тіла, які можна зарахувати до засобів первинної термометрії. Але він не враховує немонохроматичності спектральних каналів та спектральної чутливості термометра випромінення (ТВ). Основною перевагою цього методу є те, що основою для побудови шкали потрібна лише одна реперна точка.

### Постановка задачі

На базі проведеного аналізу можна стверджувати, що актуальним є дослідження таких питань:

- розвиток багатоточкового методу побудови температурної шкали на базі еталонних абсолютно чорних тіл (АЧТ) з реперними точками, як методу первинної термометрії;
- розвиток методик інтерполяції температурної шкали на основі закону Планка з врахуванням немонохроматичності спектральних каналів та спектральної чутливості (ТВ);
- моделювання та порівняльний аналіз методик реалізації багатоточкового методу реалізації ТШ.

### Виклад основного матеріалу

Щоб уникнути вищезгаданих проблем для реалізації ТШ, запропоновано багатоточковий метод передачі температурної шкали. Він базується на п'яти реперних точках тверднення металів Zn, Sb, Al, Ag, Cu та використанні інтерполяційних рівнянь [4], які дозволяють відтворити всю множину температур температурної шкали в діапазоні від 419,527 °С до 1084,62 °С. Згідно з цим методом, термометром випромінення візують еталонні АЧТ при декількох (від трьох до п'яти) реперних точках тверднення металів. Отримані вихідні сигнали опрацьовують за відповідним інтерполяційним рівнянням.

З метою аналізу методик реалізації багатоточкового методу реалізації температурної шкали проведено математичне моделювання з використанням програми MathCad різних методик реалізації багатоточкового методу. Дослідження проведені в діапазонах, наведених в табл. 2.

Таблиця 2

### Границі відповідних спектральних та температурних діапазонів моделювання методів реалізації температурної шкали

№	Температурний діапазон, К	Спектральний діапазон, мкм
1	273,16 ÷ 429,748	10 ÷ 14
2	429,748 ÷ 692,677	3 ÷ 3,5
3	692,677 ÷ 1234,93	1 ÷ 2

Для реалізації температурної шкали багатоточковим методом можна використовувати інтерполяційне рівняння Сакума-Хатторі, яке має вигляд (3), згідно з рівняннями Віна та Планка [4]:

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{C_2}{AT+B}\right)} \quad \text{та} \quad S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{C_2}{AT+B}\right) - 1}, \quad (3)$$

де А, В і С – параметри, які підбираються методом найменших квадратів по результатах градування в реперних точках; S(T) – вихідний сигнал термометра випромінення [5].

У результаті проведеного моделювання з використанням програми MathCad було встановлено, що абсолютна похибка побудови температурної у високотемпературній області на основі рівняння Сакума-Хатторі та закону Віна не перевищує 1,5 °С. У низькотемпературній області похибка реалізації температурної шкали на основі рівняння Сакума-Хатторі та закону Планка зростає до декількох десятків градусів. Це пояснюється залежністю результатів вимірювання температури від ширини робочого спектрального каналу при побудові шкали у дальній

інфрачервоній області спектра. Визначено, що рівняння Сакума-Хатторі на основі закону Планка не у всій області значень має розв'язки.

Для врахування ширини спектрального каналу запропоновано використання температурної залежності середніх довжин хвиль для конкретного температурного та спектрального інтервалу. За законом Планка для спектрального інтервалу  $\lambda_1 \div \lambda_2$  та певної температури  $T_i$  існує така довжина хвилі  $\lambda_{ci}$ , для якої виконується рівність, потік випромінювання  $b(I_{ci}, T_i)$  визначається згідно з (4):

$$b(I_{ci}, T_i) = \frac{1}{I_2 - I_1} \int_{I_1}^{I_2} b(I, T_i) dI \quad . \quad (4)$$

Графік температурної залежності значень середніх довжин хвиль для спектрального інтервалу  $\lambda_1 \div \lambda_2$  та температурного діапазону  $T_1 \div T_i$  наведений на рис.1.

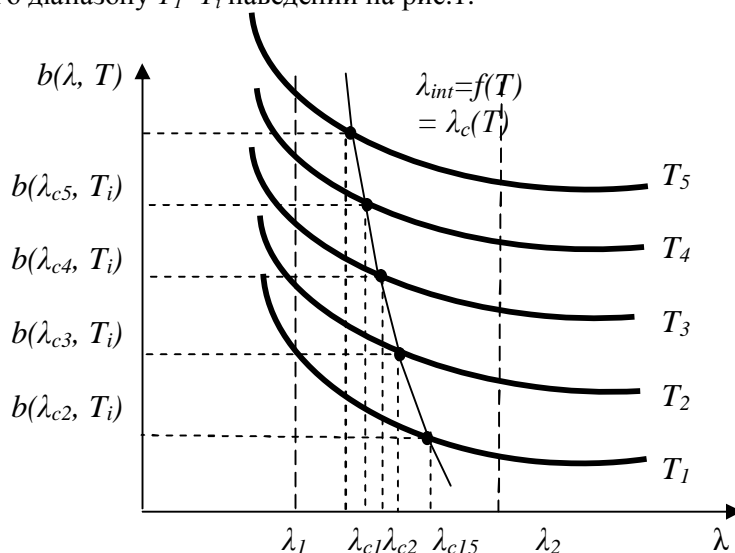


Рис. 1. Схематичне представлення температурної залежності значень середніх довжин хвиль для спектрального інтервалу  $\lambda_1 - \lambda_2$  та температурного діапазону  $T_1 - T_i$

Під час побудови та передачі температурної шкали для певного температурного діапазону середні значення довжини хвилі змінюватимуться зі значенням температури. І ця зміна тим значніша, чим більша ширина спектрального та температурного інтервалу. Однак, визначивши середні значення довжини хвилі в декількох точках цього діапазону, можемо побудувати функціональну залежність середніх довжин хвиль від температури. На базі даних про значення усереднених довжин хвиль для реперних температур ми можемо побудувати апроксимаційну залежність  $\lambda_{int} = f(T)$  методом найменших квадратів.

Умовою побудови цієї залежності є послідовне зростання або спадання значень середніх довжин хвиль  $\lambda_{cn}$ , що визначає ширину температурного та спектрального діапазону під час реалізації ТШ.

$$\lambda_{c1} < \lambda_{c2} < \lambda_{cn} \quad \text{або} \quad \lambda_{c1} > \lambda_{c2} > \lambda_{cn} \quad . \quad (5)$$

Цю залежність можна визначити для двох та більше реперних температурних точок. Температурна залежність довжини хвилі може мати лінійний, гіперболічний, степеневий або експоненційний характер (залежно від значення похибки апроксимації) та бути використана в інтерполяційному рівнянні шкали на основі закону Планка залежності вихідного сигналу термометра випромінювання  $S_{int}(T)$  від температури:

$$S_{int}(T) = \frac{C_1 I_c(T)^{-5}}{\frac{C_2}{e^{I_c(T) T}} - 1} \quad . \quad (6)$$

Результати моделювання різних видів температурних залежностей середньої довжини хвилі наведені в табл. 3.

## Результати моделювання різних видів температурних залежностей середньої довжини хвилі

№	Температурний діапазон, К	Види визначених температурних залежностей температурної залежності середньої довжини хвилі
1	273,16 ÷ 429,748	$\lambda = -2,724 \times 10^{-10} \times T + 1,814 \times 10^{-6}$
		$\lambda = 2,308 \times 10^{-4} \cdot T + 1,298 \times 10^{-6}$
		$\lambda = -1,981 \times 10^{-12} \times T^2 + 3,618 \times 10^{-9} \times T$
2	429,748 ÷ 692,677	$\lambda = -7,78 \times 10^{-11} \times T + 3,291 \times 10^{-6}$
		$\lambda = 2,354 \times 10^{-5} \cdot T + 3,204 \times 10^{-6}$
		$\lambda = -1,049 \times 10^{-11} \times T^2 + 1,192 \times 10^{-8} \times T$
3	692,677 ÷ 1234,93	$\lambda = -2,369 \times 10^{-9} \times T + 1,291 \times 10^{-5}$
		$\lambda = 2,928 \times 10^{-4} \cdot T + 1,121 \times 10^{-5}$
		$\lambda = -1,055 \times 10^{-10} \times T^2 + 7,292 \times 10^{-8} \times T$

Запропоновано критерій вибору виду інтерполяційного рівняння на основі температурної залежності середньої довжини хвилі: найкраще інтерполяційне рівняння буде в тому разі, коли для  $n$  точок всієї множини досліджуваних температур сума квадратів відхилень інтерполяційної функції від розрахунку за законом Планка буде мінімальною:

$$\left[ \sum_{i=1}^n (S_{int}(I, T_i) - S_{Pl}(I, T_i))^2 \right] \min, \quad (7)$$

де  $S_{int}(I, T_i)$  – інтерполяційне рівняння температури;  $S_{Pl}(I, T_i)$  – рівняння закону Планка для цього температурного та спектрального інтервалу; за умови  $n \rightarrow n_{\max}$ .

Проведене моделювання методики побудови температурної шкали згідно з рівнянням (6) та критерієм (7) для різних видів температурної залежності середньої довжини хвилі. Визначено доцільність використання лінійної та гіперболічної залежностей для різних спектральних діапазонів.

Під час моделювання розглядали можливості застосування різних типів математичних співвідношень інтерполяційних рівнянь для реалізації температурної шкали. Визначено доцільність реалізації температурної шкали за відношенням вихідних сигналів у двох точках з врахування лінійної температурної залежності середніх довжин хвиль у цьому температурному та спектральному діапазоні згідно з (8).

Ця методика дає можливість побудувати температурну з врахуванням ширини спектрального інтервалу термометра випромінення, він не потребує інформації про спектральну чутливість термометра випромінення і враховує немонохроматичність робочого спектрального інтервалу. За відношення вихідних сигналів приймача випромінення в реперній точці та точці, в якій визначається значення температури та відношення виразів інтерполяційних рівнянь, можна визначити значення температури:

$$m = \frac{S_{\lambda}(T_P)}{S_{\lambda}(T_X)} = \frac{\int_{I_1}^{I_2} C_1 I_{int}^{-5} \left( \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_{int} T_P}\right) - 1 \right)^{-1} dI}{\int_{I_1}^{I_2} C_1 I_{int}^{-5} \left( \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_{int} T_X}\right) - 1 \right)^{-1} dI}. \quad (8)$$

Згідно з проведеним моделюванням похибка реалізації температурної шкали комбінованим методом для різних температурних та спектральних діапазонів наведена на рис. 2. Для розглянутих температурного та спектрального діапазонів її значення не перевищує 1 °С.

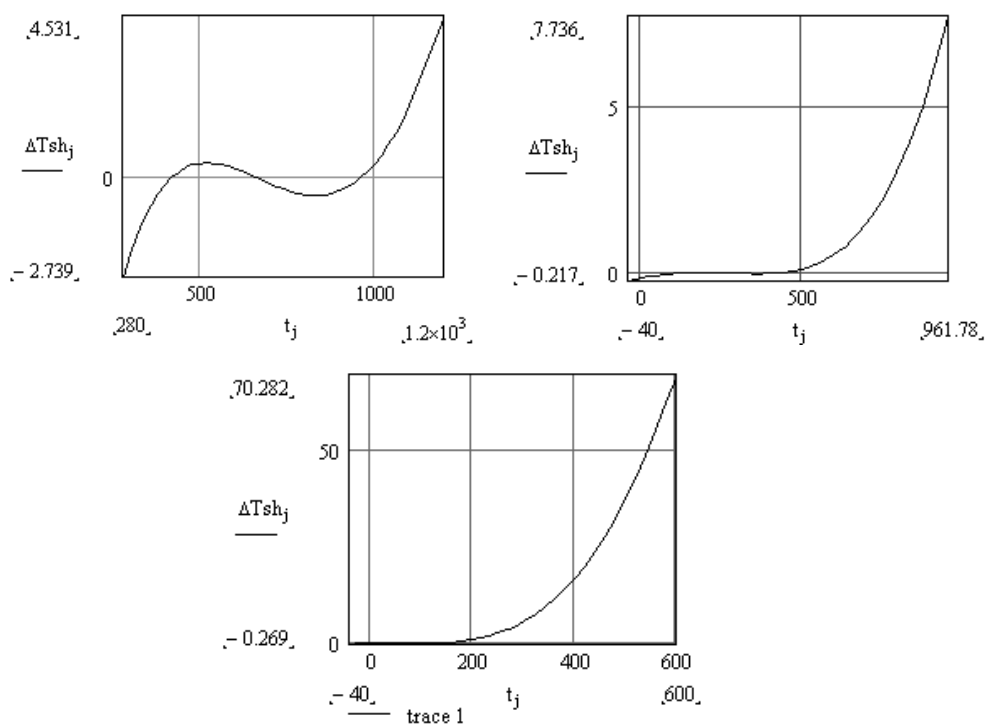


Рис. 2. Температурні залежності абсолютної похибки побудови температурної шкали комбінованим методом для різних температурних та спектральних діапазонів: а – для діапазону 1 – 2 мкм; б – для діапазону 3 – 3,5 мкм; в – для діапазону 10 – 14 мкм

## Висновки

Використання інтерполяційного рівняння на основі закону Планка дає можливість реалізувати температурну шкалу на засадах первинної термометрії, що дозволяє позбутися впливу таких характеристик, як спектральна чутливість та ширина робочого спектрального інтервалу засобів вимірювання на точність побудови шкали. Проведене моделювання показало, що тільки дві методики реалізації температурної шкали дають можливість однозначної її побудови у широкому температурному та спектральному інтервалі – це метод на основі рівняння Сакума-Хатторі та комбінованого методу відношення інтерполяційних рівнянь. Точність побудови температурної шкали в широкому температурному діапазоні від 0 до 1500 °С не перевищує 1 °С. На точність визначення температури значний вплив має математичний метод обчислення.

Запропоновано визначення температурної залежності різних видів довжини хвилі з використанням багатоточкового методу побудови температурної шкали. Це дозволяє в інтерполяційному рівнянні користуватися реальною залежністю довжини хвилі від температури для різних спектральних і температурних діапазонів вимірювання. Використання поняття інтерполяційної довжини хвилі дає змогу реалізувати температурну шкалу для різних спектральних та температурних діапазонів та калібрувати термометри випромінювання, які мають декілька робочих спектральних каналів. Запропонований комбінований метод побудови температурної шкали дозволяє будувати температурну шкалу для визначених температурних та спектральних інтервалів з використанням лише двох реперних точок, не потребує інформації про спектральну чутливість термометра випромінювання, оскільки використовує інтерполяційні рівняння на базі інтерполяційної довжини хвилі, що не вимагає обов'язкової лінійності функції перетворення приймача термометра випромінювання.

1. [www.bipm.org](http://www.bipm.org). 2. [www.temperaturas.ru](http://www.temperaturas.ru). 3. Preston-Thomas H. *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, *Metrologia*, 1990, 27(1), p. 3–10. 4. Sakuma F., Hattori S., *In Temperature : Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 5 (Edited by J. F. Schooley)*, New York, American Institute of Physics, Monograph, 1982, p. 421–427. 5. *Interpolation errors for radiation thermometry* / P. Saunders and R White. *Metrologia*, 2004. – № 41. – P. 41–46.