

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-05>

УДК 536.62.088.6

ПОХИБКА КАЛІБРУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО КАЛОРИМЕТРА, ОБУМОВЛЕНА НЕРІВНОМІРНИМ РОЗПОДІЛОМ ТЕПЛА В ЙОГО ПРИЙМАЛЬНОМУ ЕЛЕМЕНТІ

К.І. Мунтян

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

E-mail: muntean@univer.kharkov.ua

Надійшла до редакції 9 жовтня 2018 р.

Актуальність. Добре відомо, що проблема підвищення точності вимірювань є основною в метрології і не втрачає своєї актуальності незалежно від успіхів, досягнутих в її вирішенні. У центрі цієї проблеми постійно знаходиться завдання підвищення точності державних еталонів одиниць вимірювань. Наукове і прикладне значення пошуків шляхів вирішення цієї проблеми істотно зростає в світлі сучасних вимог до забезпечення екологічності і зниження ресурсоемності перспективного промислового виробництва.

Мета роботи - дослідження шляхів вдосконалення методики обліку нееквівалентності заміщення оптичного сигналу електричним при калібруванні калориметричних вимірювальних перетворювачів, що входять до складу державних еталонів енергетичних одиниць лазерного випромінювання.

Матеріали та методи. Запропоновані та вивчені теоретично і експериментально теплофізична і математична моделі приймального елемента калориметричного вимірювального перетворювача, які, на відміну від відомих моделей на основі термічно тонкої пластини, дозволяють оцінити вплив нерівномірного розподілу тепла в приймальному елементі на похибку калібрування калориметричного вимірювального перетворювача. Коефіцієнт заміщення, відповідно до моделі, залежить тільки від геометрії приймального елемента і постійних часу його нагрівання та охолодження, які визначаються експериментально.

Результати. Теоретичний аналіз і експериментальна перевірка моделей, що запропоновані, підтвердили їх ефективність у зменшенні систематичної помилки калібрування вимірювальних перетворювачів.

Висновки. Теплофізичну і математичну моделі приймального елемента калориметричного вимірювального перетворювача, які запропоновано, доцільно використовувати в практиці атестації Державних еталонів України енергетичних одиниць лазерного випромінювання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лазерне випромінювання, ізоперіболічний калориметр, калібрування.

CALIBRATION ERROR OF LASER CALORIMETER DUE TO THE UNEQUAL DISTRIBUTION OF HEAT IN ITS RECEIVING ELEMENT

K.I. Muntean

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: It is well known that the problem of improving the accuracy of measurements is fundamental in metrology and does not lose its relevance, regardless of the successes achieved in its solution. The task of increasing the accuracy of state standards of measurement units is constantly at the center of this problem. The scientific and applied value of the search for ways to solve this problem is increasing significantly in the light of modern requirements for ensuring environmental friendliness and reducing the resource consumption of promising industrial production.

Objectives of the work is to study of ways to improve the methodology for taking into account the nonequivalence of replacing an optical signal with an electric one when calibrating calorimetric measuring transducers that are part of state standards for laser energy units.

Materials and methods: Theoretical and experimental thermophysical and mathematical models of the receiving element of the calorimetric measuring transducer are proposed and studied, which, unlike the known models based on the thermally thin plate, allow one to evaluate the effect of the uneven distribution of heat in the receiving element on the calibration error of the calorimetric measuring transducer. The substitution coefficient, according to the model, depends only on the geometry of the receiving element and the time constants of its heating and cooling, which are determined experimentally.

Results: Theoretical analysis and experimental verification of the proposed models have confirmed their effectiveness in reducing the systematic calibration error of the measuring transducers.

Conclusion: The proposed thermophysical and mathematical models of the receiving element of the calorimetric measuring transducer should be used in the certification practice of the State standards of Ukraine of laser energy units.

KEYWORDS: laser radiation, isoperibolic calorimeter, calibration.

ПОГРЕШНОСТЬ КАЛИБРОВКИ ЛАЗЕРНОГО КАЛОРИМЕТРА, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕПЛА В ЕГО ПРИЕМНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

К.И. Мунтян

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

Актуальность. Хорошо известно, что проблема повышения точности измерений является основной в метрологии и не теряет своей актуальности независимо от успехов, достигнутых в ее решении. В центре этой проблемы постоянно находится задача повышения точности государственных эталонов единиц измерений. Научное и прикладное значение поисков путей решения этой проблемы существенно возрастает в свете современных требований к обеспечению экологичности и снижению ресурсоемкости перспективного промышленного производства.

Цель работы - исследование путей совершенствования методики учета неэквивалентности замещения оптического сигнала электрическим при калибровке калориметрических измерительных преобразователей, входящих в состав государственных эталонов энергетических единиц лазерного излучения.

Материалы и методы. Предложены и изучены теоретически и экспериментально теплофизическая и математическая модели приемного элемента калориметрического измерительного преобразователя, которые, в отличие от известных моделей на основе термически тонкой пластины, позволяют оценить влияние неравномерного распределения тепла в приемном элементе на погрешность калибровки калориметрического измерительного преобразователя. Коэффициент замещения, согласно модели, зависит только от геометрии приемного элемента и постоянных времени его нагрева и охлаждения, которые определяются экспериментально.

Результаты. Теоретический анализ и экспериментальная проверка предложенных моделей подтвердили их эффективность в уменьшении систематической ошибки калибровки измерительных преобразователей.

Выводы. Предложенные теплофизическую и математическую модели приемного элемента калориметрического измерительного преобразователя целесообразно использовать в практике аттестации Государственных эталонов Украины энергетических единиц лазерного излучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лазерное излучение, изопериболический калориметр, калибровка.

ВСТУП

Переважна більшість лазерних технологій, що знайшли широке технічне застосування, таких як, наприклад, запис інформації, зміцнення поверхневого шару металевих деталей, зварювання та різання різних матеріалів засновані на тепловій дії лазерного випромінювання. У зв'язку з цим контроль енергетичних параметрів лазерного випромінювання є важливою складовою частиною метрології лазерів. Тепловою дією лазерного випромінювання за своєю фізичною суттю не відрізняється від інших видів нагрівання матеріалів, принаймні, для тривалості впливу більш 1 нс і щільності потоку оптичного випромінювання менш 10^{10} Вт / см². У цих межах однозначною характеристикою теплової дії лазерного випромінювання є температура, що дозволяє використовувати для контролю лазерного випромінювання великий парк існуючих приладів для теплових вимірів.

Головну частку парку засобів теплових вимірювань складають калориметри, що забезпечують найвищу досягну в даний час точність абсолютних вимірювань оптичного випромінювання в діапазоні потужностей порядку одиниць Вт. Тому головними елементами апаратури державних еталонів, які визначають точність відтворення і зберігання енергетичних одиниць лазерного випромінювання в цьому діапазоні, є калориметричні первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) [1, 2]. Калібрування калориметричних ПВП здійснюється так званним методом електричного заміщення, сутність якого полягає в порівнянні нагріву приймального елемента ПВП оптичним випромінюванням та його нагріву електричним підігрівачем, який вбудовано у приймальний елемент. Такий метод калібрування калориметричних ПВП дозволяє гармонізувати еталони енергетичних одиниць лазерного випромінювання з існуючими Державними еталонами одиниці напруги - Вольт та одиниці опору - Ома, що забезпечує підвищення точності відтворення одиниць лазерними еталонами.

Один з домінуючих вкладів в похибку абсолютного калібрування калориметричного ПВП вносить нееквівалентність заміщення лазерного випромінювання калібрувальним тепловим потоком.

Нееквівалентність заміщення зумовлюють такі джерела похибки:

- несиметричність конструкції ПВП для процесів вимірювання та калібрування;
- розбіг у просторі приймального майданчика, який висвітлюється пучком лазерного випромінювання, та калібрувального підігрівача ПВП;
- нерівність площі, яка висвітлюється випромінюванням, та площі, яка обігривається підігрівачем;
- нерівність обсягу поглинання випромінювання та обсягу підігрівача;
- відмінність механізмів тепловіддачі з поверхонь приймального елемента, яка опромінюється та яка обігривається;
- відмінність умов теплообміну для поверхонь, яка опромінюється та яка обігривається;
- відмінність часових характеристик тепловіддачі при опроміненні та обігріві;

- залежність теплофізичних характеристик матеріалу приймального елемента від температури;
- неоднаковість теплофізичних характеристик матеріалів приймального елемента і підігрівача;
- необхідність електроізоляції підігрівача;
- невизначеність розташування місця вимірювання ефективної температури приймального елемента.

Апробовані методики обліку нееквівалентності заміщення в даний час в літературі відсутні. Всі відомі методи розрахунку поправок до температурних показань калориметра явним або неявним чином базуються на моделі термічно тонкої пластини, зворотна сторона якої прогривається до тієї ж самої температури, що і лицьова, на яку падає випромінювання. Тому, починаючи з методу графа Румфорда [3] ще часів винаходу калориметра, класичних методів Реньо, Роуанда, Пфаундлера, Дикинсона [4 - 6] і до робіт теперішнього часу [7,8], автори відомих методів беруть до уваги тільки всілякі втрати тепла і пропонують той чи інший спосіб їх обліку.

Метою даного дослідження є вивчення шляхів вдосконалення методики обліку нееквівалентності заміщення при електричному калібруванні калориметричних ПВП. Беручи до уваги, що реальні приймальні елементи калориметричних ПВП в ряді випадків не описуються адекватно моделлю термічно тонкої пластини, розглянемо вплив неоднорідного розподілу тепла в приймальному елементі при вимірюванні та калібруванні на точність калібрування.

ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ І МЕТОД ВИРІШЕННЯ

Задача дослідження полягає в оцінці ступеня нееквівалентності впливу на приймальний елемент калориметра вимірюваного лазерного випромінювання та теплового впливу електричного струму, що заміщає дію випромінювання. Для отримання такої оцінки розглянемо ідеалізовані теплофізичну, електричну та математичну моделі калориметричного ПВП. Для експериментального дослідження вибираємо промисловий ПВП типу ТПІ-2М.1, конструкція якого показана на Рис. 1. Основним аргументом на користь вибору цього ПВП є та обставина, що він має приймальний елемент у формі паралелепіпеда, який легше піддається аналітичному розрахунку..

Конструкція ПВП. Основними елементами конструкції ПВП, що визначають його функціональні характеристики, є прийомний елемент 1, який виконано у вигляді пластини 60 мм x 60 мм x 10 мм з рекристалічного графіту, батарея хромель-копелевих термопар 2, дротяний константановий підігрівач 3 та алюмінієвий корпус 4.

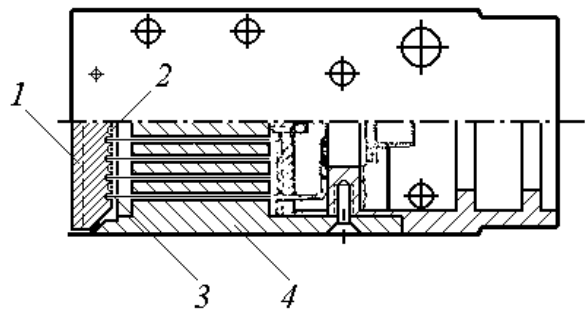


Рис. 1. Конструкція калориметричного ПВП ТПІ-2М.1
1 - прийомний елемент, 2 - підігрівач, 3 - батарея термопар, 4 - корпус.

Процес вимірювання потужності лазерного випромінювання полягає в подачі випромінювання, що вимірюється, на приймальний елемент ПВП, очікуванні закінчення перехідного процесу і вимірюванні вихідного сигналу батареї термопар. Процес калібрування відрізняється від процесу вимірювання тільки тим, що на приймальний елемент замість оптичного випромінювання, що вимірюється, подається калібрувальний тепловий потік, що генерується внутрішнім електричним підігрівачем.

Теплофізична модель. Приймальний елемент ПВП моделюємо необмеженою вертикальною пластиною товщиною δ , яка розташована в повітряному середовищі з температурою T_0 .

Нагрівання приймального елемента йде за рахунок наступних процесів:

- поглинання оптичного випромінювання, що вимірюється, з щільністю потужності $q_{изл}$;
- нагрів калібрувальним тепловим потоком з щільністю потужності $q_{калбр}$.

Скидання тепла відбувається внаслідок наступних процесів:

- природна конвекція з лицьової та зворотній поверхонь приймального елемента;
- випромінювання з лицьової та зворотній поверхонь приймального елемента;
- теплопровідність термобатареї, дротяного підігрівача і вузла кріплення приймального елемента.

Втрати тепла за рахунок цих механізмів з лицьової та зворотній поверхонь приймального елемента характеризуємо інтегральними коефіцієнтами тепловіддачі α_1 та α_2 , відповідно.

Теплофізичні властивості повітря, полікристалічного дрібнозернистого графіту, дюралю, константану, хромелю та копелю отримуємо апроксимацію довідкових даних [9,10].

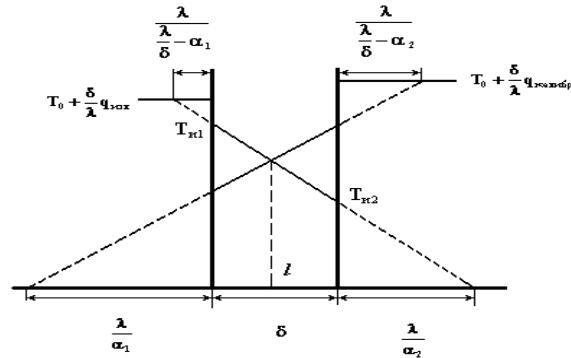


Рис. 2. Розподіл стаціонарних температур в моделі приймального елемента ПВП при вимірюванні і калібруванні.

При вимірюванні потужності випромінювання і калібруванні ПВП розподіл температур, усталений в приймальному елементі після закінчення перехідних процесів, описується законом Фур'є і в лінійному наближенні показано на Рис. 2, де T_{u1} і $T_{к1}$ - температури лицевої поверхні приймального елемента при вимірюванні і калібруванні, T_{u2} і $T_{к2}$ - температури зворотній поверхні, λ - коефіцієнт теплопровідності графіту, l - координата точки виміру ефективної температури приймального елемента.

Електрична модель. Електричний підігрівач, що генерує калібрувальний тепловий потік, представляємо у вигляді ланцюга з двох послідовно з'єднаних резисторів $R_{\text{конт}}$ і $R_{\text{неконт}}$, які моделюють активні опори елементів підігрівача, що мають і, відповідно, не мають теплового контакту з прийомним елементом.

Математична модель. Для прийнятої теплофізичної моделі записуємо закони збереження в стаціонарному режимі теплопередачі

$$\begin{aligned} q_{\text{изм}} &= \alpha_{u1}(T_{u1} - T_0) + \alpha_{u2}(T_{u2} - T_0) \\ q_{\text{калибр}} &= \alpha_{к1}(T_{к1} - T_0) + \alpha_{к2}(T_{к2} - T_0) \\ \alpha_{u2}(T_{u2} - T_0) &= \frac{\lambda}{\delta}(T_{u1} - T_{u2}) \\ \alpha_{к1}(T_{к1} - T_0) &= \frac{\lambda}{\delta}(T_{к2} - T_{к1}) \end{aligned}$$

і доповнюємо їх балансними рівняннями для регулярного режиму нестационарного процесу теплопередачі [11]

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{\delta} - \alpha_{u1} - \alpha_{u2} &= \frac{C}{\tau_{u0}} \\ -\alpha_{u1} - \alpha_{u2} &= \frac{C}{\tau_{u1}} \\ \frac{\lambda}{\delta} - \alpha_{к1} - \alpha_{к2} &= \frac{C}{\tau_{к0}} \\ -\alpha_{к1} - \alpha_{к2} &= \frac{C}{\tau_{к1}} \end{aligned}$$

де C - константа, що залежить від питомої теплоємності матеріалу приймального елемента і його геометричної форми, τ_{u0} - постійна часу нагріву приймального елемента випромінюванням, що вимірюється, τ_{u1} - постійна часу остигання приймального елемента, якій нагріто оптичним випромінюванням, $\tau_{к0}$ - постійна часу нагріву приймального елемента калібрувальним потоком, $\tau_{к1}$ - постійна часу остигання приймального елемента, якій нагріто калібрувальним потоком.

Система рівнянь, що записана, є невизначеною, тому додаємо ще два балансних рівняння, які припускають, що в експерименті ми можемо теплоізулювати лицеву поверхню приймального елемента і

знехтувати її тепловтратами при охолодженні.

$$-\alpha_{u2} = \frac{C}{\tau_{u2}}$$

$$-\alpha_{\kappa2} = \frac{C}{\tau_{\kappa2}}$$

де τ_{u2} и $\tau_{\kappa2}$ - постійні часу остигання приймального елемента, якій нагріто випромінюванням і калібрувальним потоком, відповідно.

Аналітичне рішення. З системи рівнянь, що записана, і теплофізичної моделі приймального елемента отримуємо коефіцієнт K нееквівалентності заміщення

$$K = \frac{q_{узіл}}{q_{калібр}} = \frac{l + \frac{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0})}{\tau_{\kappa0}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa2})}}{1 - \frac{l}{\delta} + \frac{\tau_{u2}(\tau_{u0} - \tau_{u1})}{\tau_{u0}\tau_{u1}}} \times \frac{1 + \frac{\tau_{u2}(\tau_{u0} - \tau_{u1})}{\tau_{u0}\tau_{u1}} + \frac{\tau_{u2}(\tau_{u0} - \tau_{u1})}{\tau_{u1}(\tau_{u0} - \tau_{u2})}}{1 + \frac{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0})}{\tau_{\kappa0}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa2})} + \frac{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0})}{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0}) + \tau_{\kappa0}\tau_{\kappa1}}}; \quad (1)$$

Диференціюючи (1) і залишаючи тільки домінуючі складові, отримуємо відносну похибку dK / K коефіцієнта нееквівалентності заміщення

$$\frac{dK}{K} = \left(\frac{dl}{\delta} + \frac{ld\delta}{\delta^2} + \frac{d\tau_{\kappa0} + 2d\tau_{\kappa1} + d\tau_{\kappa2}}{\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa2}} \right) \times$$

$$\times \left\{ \left[\frac{l + \frac{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0})}{\tau_{\kappa0}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa2})}}{\delta} \right]^{-2} + \left[1 + \frac{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0})}{\tau_{\kappa0}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa2})} + \frac{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0})}{\tau_{\kappa2}(\tau_{\kappa1} - \tau_{\kappa0}) + \tau_{\kappa0}\tau_{\kappa1}} \right]^{-2} \right\}^{\frac{1}{2}} +$$

$$+ \left(\frac{d\tau_{u0} + 2d\tau_{u1} + d\tau_{u2}}{\tau_{u0} - \tau_{u2}} \right) \times$$

$$\times \left\{ \left[1 - \frac{l}{\delta} + \frac{\tau_{u2}(\tau_{u0} - \tau_{u1})}{\tau_{u0}\tau_{u1}} \right]^{-2} + \left[1 + \frac{\tau_{u2}(\tau_{u0} - \tau_{u1})}{\tau_{u0}\tau_{u1}} + \frac{\tau_{u2}(\tau_{u0} - \tau_{u1})}{\tau_{u1}(\tau_{u0} - \tau_{u2})} \right]^{-2} \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

Необхідно відзначити важливу властивість даної математичної моделі - у вираз для коефіцієнта нееквівалентності заміщення входять тільки геометричні параметри приймального елемента і значення постійних перехідних процесів, які визначаються експериментально. В значення цих постійних неявним чином входять як теплофізичні параметри приймального елемента, так і їх температурна залежність.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Експериментальне дослідження калориметричного ПВП ТПИ-2М.1 проводилося на установці, що показана на Рис. 3, до складу якої входили діодний лазер АТС-С3000-500-АМF-АТС-03Н ($\lambda = 0,806$ мкм) з керуючим пристроєм LDD-10, мультиметри DM 3559 и DT-830В, джерело калібрувальної напруги JPS-3030 та комп'ютер.

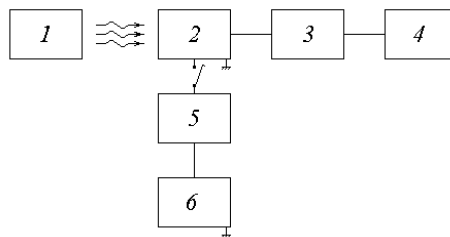


Рис. 3. Схема експериментальної установки
 1 - лазер, 2 - ПВП, 3 - мілівольтметр DM 3559, 4 - комп'ютер,
 5 - міліамперметр DT-830В, 6 - джерело напруги

Методика експерименту передбачала подачу оптичного випромінювання постійної потужності на приймальний елемент ПВП і реєстрацію величини U_i напруги вихідного електричного сигналу ПВП від моменту подачі випромінювання до моменту виходу ПВП на стаціонарний тепловий режим. Після досягнення стаціонарного теплового режиму джерело випромінювання вимикалось і вихідний сигнал ПВП реєструвався аж до моменту повного остигання приймального елемента. Потім потужність оптичного випромінювання змінювалася і вимірвальний цикл нагріву-охолодження і реєстрація вихідного сигналу ПВП повторювалися.

Аналогічний вимірвальний цикл проводився при подачі на приймальний елемент ПВП калібрувального теплового потоку.

Для підвищення інформативності експерименту була передбачена можливість теплоізоляції поверхні приймального елемента в період його охолодження, для чого використовувався лист пінополіуретану товщиною 50 мм, який з невеликим зусиллям притискався до приймального елемента ПВП. Втрати через теплоізолятор становили $\approx 0,015$ Вт.

Істотною умовою реєстрації вихідного сигналу ПВП є еквідистантність моментів вимірювання в часі. Період вимірювань задавався внутрішнім генератором мультиметра і становив 0,393 с..

Приклад графіків зміни вихідного сигналу ПВП протягом циклу вимірювання наведено на Рис. 4.

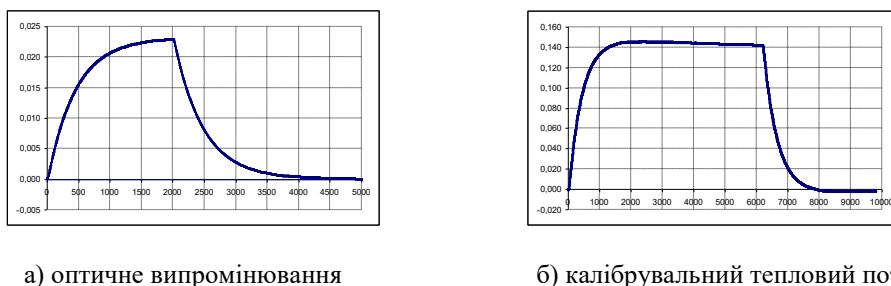


Рис. 4. Зміна вихідного сигналу калориметричного перетворювача протягом циклу вимірювання.

Обробка експериментальних даних. Метою обробки накопиченого масиву експериментальних даних було одержання коректних значень еквівалентних постійних часу перехідних процесів.

Відома методика апроксимації експериментальних графіків досліджуваних перехідних процесів експоненціальним поліномом [12] засвідчила свою неефективність, тому що не дозволяла відфільтрувати збійні і зашумлені результати вимірювань, а, головне, внаслідок близькості перехідного процесу до експоненти, матриця коефіцієнтів нормальних рівнянь виродилася (точніше, відрізняється від виродженої на малу величину, обумовлену шумами вимірювань), тому необхідні в процесі апроксимації союзні і зворотні матриці, а, отже, і коріння нормальних рівнянь, обчислюються з великою помилкою, що призводить до неприпустимо великий похибки визначення постійних часу.

Більш ефективним виявилось пряме обчислення постійної часу перехідного процесу при нагріванні (охолодженні) приймального елемента ПВП за наступним алгоритмом:

- за масивом величин U_i , що виміряні протягом перехідного процесу, обчислюється масив величин $\Delta U_i = U_{i+1} - U_i$;
- за масивом величин ΔU_i обчислюється масив величин $\ln \Delta U_i$;
- за масивом величин $\ln \Delta U_i$ обчислюється масив величин $\Delta F_i = \ln \Delta U_{i+1} - \ln \Delta U_i$;
- для масиву величин ΔF_i за методом найменших квадратів обчислюється рівняння лінійного тренду $\Delta F_i = f(i)$;
- постійна часу перехідного процесу обчислюється як величина, зворотна вільному члену рівняння лінійного тренду, і отриманий результат приводять до одиниць часу шляхом множення на період вибірки величин U_i в секундах.

Для ідеального експоненціального перехідного процесу лінійний тренд, обчислений за цим алгоритмом, являє собою пряму лінію, паралельну осі абсцис і зміщену від неї вниз на величину, зворотну постійної часу експоненти.

Приклад експериментального графіка $\Delta F_i = f(i)$ наведено на Рис. 5.

Наведений алгоритм обчислення постійної часу надзвичайно чутливий до відхилення елементів вибірки U_i від експоненціальної залежності, тому експериментальний графік на Рис. 5 дозволяє виявити неекспоненціальні області перехідного процесу, визначити області домінування шумів вимірювань і оцінити їх величину, відфільтрувати збої вимірвальної апаратури, обчислити характеристики

домінуючої експоненти і помилку їх обчислення, а також величину зміни цих характеристик протягом перехідного процесу.

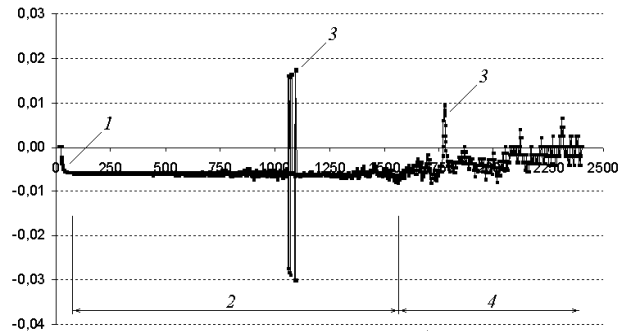


Рис. 5. Експериментальна залежність характеристик перехідного процесу від часу
 1 - початкова неекспоненціальна область перехідного процесу,
 2 - експоненціальна область перехідного процесу, 3 - збіг виміральної апаратури,
 4 - область домінування шумів вимірювання.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані в експерименті постійні часу перехідних процесів наведені в таблиці, з аналізу якої йдуть основні експериментальні факти:

- постійна часу перехідного процесу нагріву приймального елемента при вимірюванні більше, ніж під час калібрування;
- постійна часу перехідного процесу охолодження приймального елемента при вимірюванні менше, ніж при калібруванні;
- теплоізоляція приймального елемента листом пінополіуретану зменшує постійну часу процесу охолодження як при вимірюванні, так і під час калібрування ПВП;
- постійні часу всіх перехідних процесів, виміряні в послідовних циклах одного дня, монотонно зменшуються (за винятком одного випадку).

Таблиця. Експериментальні значення постійних часу перехідних процесів

Цикл виміру	Амплітуда, В	Постійна часу перехідного процесу, с					
		Вимірювання			Калібрування		
		Нагрівання	Охолод	Охолод(ізол)	Нагрів	Охолод	Охолод(ізол)
211008_141736	0,022902	175,13	182,78				
060209_135808	0,006435			131,03	237,34		
060209_144314	0,024875			180,88	192,21		
060209_152605	0,050911			174,62	172,99		
090209_085038	0,146833			168,14	199,75		
090209_123738	0,145735			166,01	178,80		
150409_104135	0,020547	186,46		177,50			
150409_124545	0,020785	174,61		170,61			
150409_171136	0,020908			174,61		170,61	
150409_184258	0,020542			173,81		140,41	
160409_092354	0,020337			179,32		177,35	
160409_110737	0,019974			162,39	176,72		
160409_121158	0,020059			173,40		135,70	
160409_130231	0,145416			172,16	176,82		
160409_141032	0,143562			156,78		177,01	
Середнє значення		178,73	182,78	174,06	167,76	190,66	160,22

Коефіцієнт нееквівалентності заміщення для дослідженого в експерименті примірника ПВП, розрахований відповідно до (1), становить $K = 1,023$ при $l / \delta = 0,85$. Отримана оцінка коефіцієнта нееквівалентності заміщення в межах похибки, розрахованої згідно з (2), збігається зі значенням, отриманим при безпосередніх прямих вимірах енергетичних характеристик лазерного випромінювання і

теплового впливу електричного струму, якій заміщає лазерне випромінювання, з урахуванням коефіцієнта чорноти ПВП.

ВИСНОВКИ

Використання запропонованої моделі лінійного наближення розподілу температур, що встановилися в приймальному елементі після закінчення перехідних процесів, дозволяє оцінити нееквівалентність заміщення при електричному калібруванні калориметричного первинного вимірювального перетворювача.

Цінною властивістю розглянутої моделі є відсутність в явному вигляді залежності від теплофізичних характеристик матеріалу приймального елемента, які в іншому випадку довелося би визначати в окремому експерименті.

На підставі результатів експерименту робимо наступні висновки:

- з факту неоднаковості постійних часу перехідних процесів при вимірюванні і калібрування ПВП впливає, що приймальний елемент ПВП є несиметричним для процесів вимірювання та калібрування;
- з факту збільшення втрат при теплоізоляції приймального елемента пінополіуретаном однозначно впливає, що домінуючим механізмом тепловтрат для потужностей випромінювання порядку одиниць Вт є втрати з приймального елемента на корпус внаслідок теплопровідності термобатарей, дротяного нагрівача і вузла кріплення приймального елемента;
- з факту монотонного зменшення постійних часу перехідних процесів в послідовно виконаних циклах вимірювань впливає, що теплофізичні характеристики основних функціональних елементів ПВП залежать від температури.

Таким чином, при розробці методики оцінки нееквівалентності заміщення необхідно враховувати тільки геометричні параметри приймального елемента ПВП. Залежність теплофізичних характеристик основних функціональних елементів ПВП від температури входить в неявному вигляді в значення постійних часу, що виміряні. Це означає, що калібрування калориметра доцільно проводити при температурі його експлуатації.

Слід зазначити, що в перспективі необхідна подальша перевірка розробленої методики оцінки нееквівалентності заміщення оптичного сигналу електричним при калібрування калориметричних первинних вимірювальних перетворювачів для випадку найбільш широко поширених конусних моделей приймального елемента ПВП.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор повідомляє про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

K.I. Muntean  <https://orcid.org/0000-0001-6479-3511>

REFERENCES

1. E.P. Timofeev, "Metrological support in the field of energy lasermetry", Ukrainian Metrological Journal, No. 1, 29-33, (2007).
2. E.P. Timofeev, "Development and research of measuring instruments for the energy characteristics of laser radiation", Ukrainian Metrological Journal, No. 2, 29-35, (2009).
3. W. Watson, editor, *A Text Book of Practical Physics*, 3rd ed. (Longmans, Green and Co, London, 1922).
4. L. von Pfaundler, "Über die Wärmecapazität verschiedener Bodenarten und deren Einfluss auf die Pflanze, nebst kritischen Bemerkungen über Methoden der Bestimmung derselben", Pogg. Ann. Phys. Chem., **129**, 102-135, (1866).
5. H.C. Dickinson, "Combustion Calorimetry and the Heats of Combustion of Cane Sugar, Benzoic Acid, and Naphthalene", Bulletin of the Bureau of Standards, **11**, No. 2, 189-257, (1915).
6. F.E. Hoare, "VII. The radiation correction in calorimetry", The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, **29**, No. 192, 52-65, (1940).
7. West E.D., Churney K.L., "A Two-Body Model for Calorimeters with Constant-Temperature Environment", J. Appl. Phys. **39**, No. 9, 4206-4215, (1968).
8. Santos L. M. N. B. F., Silva M. T., Schroder B. and Gomes L., "Labtermo: Methodologues for the Calculation of the Corrected Temperature Rise in Isoperibol Calorimetry", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, **89**, No. 1, 175-180, (2007).
9. A.I. Leontiev, *Theory of heat and mass transfer*, (N.E. Bauman MSTU, M.: 1997).
10. I.S. Grigoriev et al., editors, *Physical quantities*, (Energoatomizdat, M.: 1991).
11. G.M. Kondratiev, *Regular thermal regime*, (State Publishing House. TTL, M.: 1954).
12. Ya. S. Bezikovich, *Approximate calculations*, (Gostekhizdat, M.: 1949).