

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

КОРОГОД ГАННА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК [536.521.082.52: 666.11/.28] (043.3)

**МЕТОДИ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗПЛАВІВ
СКЛОМАС З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАТИВНОЇ
НАДЛИШКОВОСТІ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та
визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки Київського національного університету технологій та дизайну Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кондратов Владислав Тимофійович,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, м. Київ,
провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Себко Вадим Вадимович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків
професор кафедри хімічної техніки та промислової
екології

доктор технічних наук, професор
Кучерук Володимир Юрійович,
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
завідувач кафедри метрології та
промислової автоматики

Захист відбудеться «09» грудня 2016 р. о 9³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного університету: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «31» жовтня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

К. В. Огородник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Особливістю температурного процесу скловаріння є те, що для отримання скломаси постійного складу необхідно контролювати в'язкість скла, яка жорстко пов'язана з температурою. Навіть незначна зміна температури скла, наприклад, на 1% при 1000 °С приводить до зміни в'язкості майже на 10 %, що значно знижує якість скловиробу. У зв'язку з цим необхідно проводити вимірювальний контроль температури розплаву скломаси з високою точністю та достовірністю.

При вимірювальному контролі температури розплаву скла перевагу віддають безконтактним оптико-електронним методам, а не перед контактним, оскільки безконтактні методи вирізняються швидкодією, дешевизною, довготривалим терміном дії засобів вимірювання та відсутністю їх впливу на досліджуваний об'єкт тощо. У той же час невирішеними залишаються наступні задачі: по-перше, існуючі оптико-електронні методи та пірометри не забезпечують безпосереднє виключення систематичних складових похибки, які обумовлені нестабільністю параметрів функції перетворення вимірювального каналу під дією дестабілізуючих факторів; по-друге, отримання в реальному масштабі часу лінійної залежності результату вимірювання від інформативного потоку оптичного випромінювання (оскільки параметри функції перетворення з часом змінюються, а обробка результатів продовжується за заданою програмою); по-третє, розширення діапазону вимірювання температури за рахунок підвищення точності вимірювання (згідно з ДСТУ 2681-94 діапазоном вимірювання називається інтервал значень, у межах якого прономовані похибки засобу вимірювання). Усе це знижує точність безконтактних методів вимірювання температури технологічних процесів. Крім того, суттєвим недоліком існуючих методів є те, що вони не забезпечують визначення параметрів функції перетворення вимірювального каналу.

Таким чином, актуальною задачею є розробка та дослідження нових методів та технічних рішень пірометрів, що направлені на підвищення точності вимірювання та достовірності контролю температури.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукова робота дисертації виконувалася згідно з планом науково-дослідних робіт Київського національного університету технологій та дизайну на тему "Оптико-електронні методи вимірювання параметрів речовин, матеріалів, виробів, технологічних процесів та об'єктів навколишнього середовища різної фізичної природи" в 2003-2005 рр. (розділ 2-04/4.6/04 тематичного плану).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення точності вимірювання та достовірності контролю температури розплаву скломаси на основі методів надлишкових вимірювань.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі наукові задачі:

- 1) проаналізувати оптико-електронні методи вимірювання температури та встановити недоліки, що впливають на точність вимірювань і достовірність контролю;
- 2) обґрунтувати доцільність розробки методів надлишкових вимірювань та сформулювати оптимальну (необхідну і достатню) кількість потоків оптичного випромінювання, які підлягають вимірювальному перетворенню, а їх значення пов'язані між собою за законом арифметичної прогресії;

3) розробити методи надлишкових вимірювань та відповідні їм математичні моделі, які описують стан вимірювального каналу в часі, отримати рівняння надлишкових вимірювань при лінійній і нелінійній функціях перетворення, що обумовлені типом фотоприймача;

4) показати переваги методів надлишкових вимірювань відносно опосередкованих методів щодо виключення систематичних складових похибки, які обумовлені нестабільністю параметрів функції перетворення під дією дестабілізуючих факторів, а також щодо можливості визначення значень параметрів функції перетворення вимірювального каналу;

5) провести порівняльний аналіз похибок відомого та запропонованих методів вимірювального контролю температури при різних видах функції перетворення;

6) розробити технічні рішення цифрових пірометрів на рівні функціональних схем та блок-схем алгоритмів їх роботи;

7) провести напівнатурні експериментальні дослідження запропонованих методів надлишкових вимірювань температури та визначити їх ефективність.

Об'єкт дослідження — процес вимірювального контролю температури розплаву скломаси з використанням оптико-електронних методів вимірювань.

Предмет дослідження — методи та оптико-електронні засоби вимірювального контролю температури з використанням інформативної надлишковості.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використовувалися теорія та методи надлишкових вимірювань фізичних величин для коректного використання методології надлишкових вимірювань при температурному контролі, теорія похибок для визначення й оцінки похибок, аналітичні методи аналізу процесів перетворення сигналів, методи математичного моделювання та чисельні методи для розв'язання нелінійних рівнянь величин і систем лінійних/нелінійних рівнянь величин, методи аналізу випадкових процесів для обробки результатів напівнатурного експерименту.

Достовірність теоретичних досліджень підтверджена результатами експериментів та математичним моделюванням в середовищі Mathcad.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше запропоновані математичні моделі методів надлишкових вимірювань температури, які, на відміну від моделей опосередкованих методів, складають систему моделей: а) систему з 3÷8 однойменних фізичних величин — потоків оптичного випромінювання відомого та невідомого значень; б) систему нелінійних рівнянь величин, що описує стан і роботу вимірювального каналу в дискретні моменти часу; в) рівняння надлишкових вимірювань інформативного потоку випромінювання від об'єкта дослідження; г) рівняння надлишкових вимірювань параметрів функції перетворення вимірювального каналу в поточні моменти часу. Обробка результатів за рівнянням надлишкових вимірювань інформативного потоку оптичного випромінювання забезпечує незалежність результату вимірювань від абсолютних значень параметрів функції перетворення та їх відхилень від номінальних значень, що дозволило зменшити відносну похибку з 0,45% до 0,09 % та підвищити достовірність контролю температури до 0,97.

2. Отримали подальший розвиток методи безконтактного вимірювання температури та розроблені засоби для їх здійснення, які, на відміну від існуючих, шляхом обробки результатів вимірювального перетворення потоків випромінювання

за рівняннями надлишкових вимірювань дозволяють визначити поточні значення параметрів як лінійної, так і нелінійної функції перетворення, що дозволяє контролювати стан вимірювального каналу й тим підвищують точність вимірювання.

3. Отримали подальший розвиток методи надлишкових вимірювань температури, які, на відміну від методів опосередкованих вимірювань, шляхом обробки результатів вимірювального перетворення потоків випромінювання за рівняннями надлишкових вимірювань дозволяють отримати значення потоку випромінювання від об'єкту дослідження, яке приведене до входу вимірювального каналу, та забезпечити лінійну залежність результату вимірювання від шуканої величини.

4. Отримали подальший розвиток методи надлишкових вимірювань температури, які, на відміну від існуючих, мають інший порядок обробки результатів багаторазових вимірювань та використовують рівняння числових значень, які містять операції віднімання та ділення. Такий підхід забезпечує підвищення точності вимірювання та достовірності контролю температури.

Отже, розвинені оптико-електронні методи надлишкових вимірювань температури та технічні рішення пірометрів. На відміну від відомих методів та засобів вимірювання вони базуються на формуванні надлишковості, при якій: а) вибір кількості потоків оптичного випромінення залежить від кількості невідомих параметрів функції перетворення; б) значення потоків випромінення складають між собою арифметичну прогресію. Розв'язанні систем рівнянь величин у вигляді рівнянь надлишкових вимірювань дозволяють забезпечити підвищення точності вимірювань і достовірності контролю температури.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновані технічні рішення цифрових пірометрів забезпечують незалежність результатів надлишкових вимірювань від абсолютних значень параметрів функції перетворення вимірювального каналу та їх відхилень від номінальних значень. Завдяки цьому зазначені засоби вимірювань можуть бути побудовані на дешевій елементній базі (при невисоких вимогах до стабільності блоків і елементів та при умові, що зміна їх параметрів є повільною в часі);

- запропоновані технічні рішення пірометрів забезпечують додаткове визначення значень усіх параметрів функції перетворення вимірювального каналу в будь-який момент часу експлуатації, і, тим самим, при необхідності, можуть забезпечити визначення їх метрологічної надійності;

- запропоновані технічні рішення пірометрів не потребують спеціальних схемотехнічних заходів щодо отримання лінійної залежності результату вимірювання від потоку оптичного випромінення, при цьому функція перетворення вимірювального каналу може бути і нелінійною, але мати відомий математичний опис її виду;

- проведено напівнатурний експеримент на розробленій установці, у якій для порівняльного аналізу з відомим методом використано один і той же вимірювальний канал, що дало можливість реалізувати метод надлишкових вимірювань і коректно порівняти результати його застосування з відомим методом. В умовах напівнатурного експерименту досягнуто підвищення точності вимірювання до 0,09% та достовірності контролю температури до 0,97;

- експериментально підтверджено, що в розроблених методах надлишкових вимірювань, на відміну від відомих, обробка результатів проміжних вимірювань

виконується за рівнянням надлишкових вимірювань дає можливість здійснювати, за необхідністю, заміну фотоприймачів на однотипні без додаткового налагодження вимірювального каналу, що стало можливим завдяки виключенню впливу на результат надлишкових вимірювань зміни параметрів функції перетворення фотоприймача;

– розроблено блок-схеми алгоритмів роботи цифрових пірометрів при лінійній і логарифмічній функції перетворення вимірювального каналу, які наглядно демонструють роботу пірометрів при здійсненні вимірювального контролю температури.

Результати наукових досліджень впроваджені в навчальний процес кафедри автоматизації та комп'ютерних систем і використовуються при викладанні курсу «Технологічне вимірювання та прилади» для бакалаврів напрямку 6.050202 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», що підтверджується відповідним актом від 7.09.2015 р.

Результати напівнатурного експерименту, методика й алгоритми запропонованих методів надлишкових вимірювань температури та відповідні технічні рішення цифрових пірометрів рекомендовані й передані на використання підприємствам. Зазначене підтверджується відповідними актами: ТОВ «Шрамківський цегельний завод», смт Шрамківка, Драбівський р-н Черкаської області, Україна, акт від 21.09.2015 та НДЦ «Прикладної інформатики», м.Київ, Україна, акт від 14.12.2015.

Особистий внесок здобувача. Основні прикладні результати, наведені в дисертації, отримані самостійно, а теоретично-практичні результати досягнуті в співавторстві з науковим керівником. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить таке: [1] — аналіз недоліків та переваг існуючих оптико-електронних методів, розробка стратегії методів надлишкових вимірювань; [2] – [5], [7], [8], [14] – [24] — математичний апарат методу надлишкових вимірювань при різних видах функції перетворення вимірювального каналу, опис методів та схемотехнічне рішення окремих функціональних блоків; [6] — порівняльний аналіз та дослідження можливості розширення робочих піддіапазонів; [10], [11] — аналіз проблем, що виникають при вимірюванні температури оптико-електронними методами, та шляхи їх подолання; [12] — проведення розрахунків і порівняльний аналіз результатів; [13] — математичний апарат методу. У роботі [9], опублікованій одноосібно, — виведення рівняння надлишкових вимірювань, проведення експериментальних вимірювань, обробка отриманих результатів та розрахунки достовірності контролю.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідались і були оприлюднені на 5-ти наукових конференціях і семінарах: IV Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Політ» (м. Київ, 2004 р.); науково-технічні семінари кафедри автоматизації і комп'ютерних систем КНУТД (м. Київ, 2004 р. та 2006 р.); I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (м. Житомир, 2015 р.); V Міжнародна наукова конференція студентів і молодих вчених «Сучасні інформаційні технології 2015» (м. Одеса, 2015 р.); XV Міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (Одеса, 2015 р.); IX Міжнародна конференція «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, 2015 р.).

За наукову роботу «Оптико-електронні методи надлишкових вимірювань температури» здобувач була нагороджена грамотою президії Національної академії наук України у 2005 році, що підтверджується відповідним документом.

Публікації. За результатами дисертації підготовлено 24 наукові праці, з яких 9 статей у фахових журналах і 4 тези конференцій, отримано 6 патентів України на винаходи та 5 деклараційних патентів України. Патенти розміщені на сайті Європейського патентного офісу, 2 роботи проіндексовано в міжнародній базі Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 147 сторінках основного тексту. Крім того, робота проілюстрована 36 рисунками, включає 9 таблиць, список використаних джерел із 124 найменувань та 19 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі описано суть і стан досліджуваної наукової задачі, її актуальність, наукова новизна, сформульовано й обґрунтовано мету та основні наукові задачі, зазначено зв'язок роботи з науковими темами, а також практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі наведено результати аналізу існуючих безконтактних методів та приладів вимірювання температури скломаси. Встановлено, що для отримання скломаси постійного складу необхідно контролювати в'язкість скла, яка жорстко пов'язана з температурою. Навіть незначне змінення температури скла, наприклад приводить до змінення в'язкості, що значно знижує якість скловиробу. На рис. 1 показано криву залежності в'язкості від температури для содовапняковосилікатного розчину.

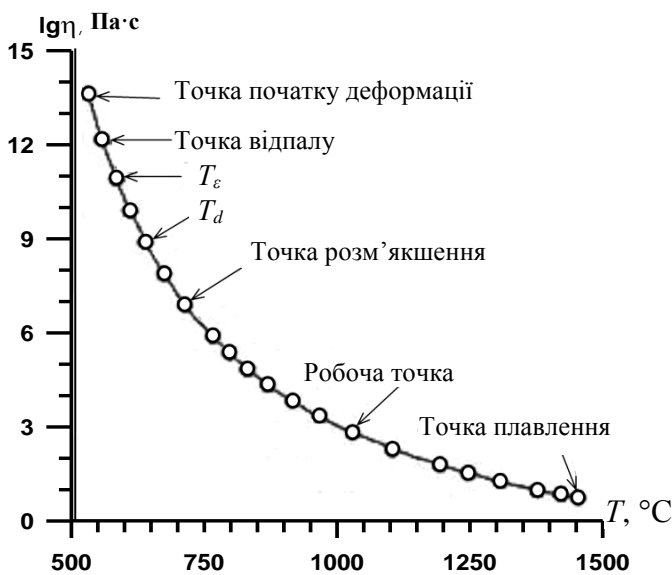


Рисунок 1 – Залежність в'язкості від температури для содовапняковосилікатного розчину {NIST стандарт №710}

З'ясовано, що існуючі методи безконтактного вимірювання температури не в повній мірі вирішують задачі підвищення точності в широкому діапазоні температури. Обмеженість діапазону вимірювання спричинена нелінійністю й нестабільністю функції перетворення вимірювального каналу.

Розглянуто основні причини появи похибки вимірювання температури розплаву скла та шляхи їх нівелювання. Так, наприклад, при вимірювальному контролі температури гарячого скла за допомогою світлофільтрів виділяють ділянку в інфрачервоній області спектра (5 ÷ 8) мкм, на якій скло за своїми випромінювальними властивостям наближається до чорного тіла.

Для комплексного вирішення задач з підвищення точності в широкому діапазоні температури та з підвищення достовірності контролю визначена перспективність методів надлишкових вимірювань.

У другому розділі розкрито сутність методів надлишкових вимірювань, що полягає у вимірювальному перетворенні не одного, а декількох потоків оптичного випромінення, розміри (значення) яких пов'язані між собою за законом арифметичної прогресії. На підставі запропонованих рядів потоків оптичного випромінення та виду функцій перетворення складаються відповідні системи нелінійних рівнянь величин, розв'язання яких дає можливість отримати рівняння надлишкових вимірювань.

Розроблено математичні моделі оптико-електронних методів надлишкових вимірювань температури при лінійній, квадратичній, кубічній, поліноміальній (3-го ступеня) функціях перетворення, а також при логарифмічній функції перетворення вимірювального каналу, які мають як теоретичне, так й практичне значення.

Розроблено методи надлишкових вимірювань I-го, II-го й III-го роду. Зокрема, методи надлишкових вимірювань I-го роду забезпечують автоматичне виключення систематичних складових похибки результату вимірювання, що обумовлені впливом на нього абсолютних значень параметрів функції перетворення вимірювального каналу та їх відхилень від номінальних. Рекомендовано методи надлишкових вимірювань II-го роду використовувати при наявності випадкових похибок, що являють собою стаціонарний процес. Якщо випадкова складова похибки являє собою нестаціонарний процес, то застосовують методи надлишкових вимірювань III-го роду.

Математична модель методу надлишкових вимірювань I-го роду при лінійній функції перетворення є системою лінійних рівнянь величин (1), її розв'язок — рівняння надлишкових вимірювань (2) та рівняння надлишкових вимірювань крутості перетворення (3) вимірювального каналу:

$$\begin{cases} U'_{л1} = \Delta U'_{зм}; \\ U'_{л2} = S'_{л} \Phi_0 + \Delta U'_{зм}; \\ U'_{л3} = S'_{л} \Phi_x + \Delta U'_{зм}, \end{cases} \quad (1) \quad \Phi_x = \Phi_0 + \Phi_0 \frac{U'_{л3} - U'_{л1}}{U'_{л2} - U'_{л1}}, \quad (2) \quad S'_{л} = \frac{(U'_{л2} - U'_{л1})}{\Phi_0}, \quad (3)$$

де $\Delta U'_{зм}$ — зміщення функції перетворення з урахуванням адитивної складової похибки ($\{\Delta U'_{зм}\} = \{\Delta U_{зм}\} + \{\Delta_a\}$), Φ_0 — нормований за значенням потік випромінення, Φ_x — інформативний потік випромінення.

Отримане рівняння надлишкових вимірювань (2) забезпечує виключення адитивної складової похибки вимірювання потоку оптичного випромінювання завдяки реалізації операції віднімання вихідної напруги в чисельнику й знаменнику та мультиплікативної складової систематичної похибки (обумовлена зміною параметрів функції перетворення під дією дестабілізуючих факторів) — завдяки реалізації операції ділення отриманих різниць напруги. Крім того, результат надлишкових вимірювань потоку оптичного випромінення не залежить від параметрів функції перетворення та їх відхилень від номінальних значень (див. (2) і є приведеним до входу вимірювального каналу.

Додаткове обчислення крутості перетворення (див. (3) в кожному циклі вимірювань забезпечує можливість визначити час виходу цих параметрів за довірчі інтервали та спрогнозувати метрологічну надійність пірометра.

За фізичну основу температурних вимірювань вибрано закон Стефана-Больцмана, використовуючи який зв'язок між температурою й потоком випромінення, що сприймає пірометр, можна представити наступним чином:

$$T_x = 4 \sqrt[4]{\left(\Phi_0 + \Phi_0 \frac{U'_{л3} - U'_{л1}}{U'_{л2} - U'_{л1}} \right) / A' \sigma}, \quad (4)$$

де A' — коефіцієнт використання потоку від об'єкту, σ — стала Стефана-Больцмана.

Показано, що подальше підвищення точності вимірювального контролю здійснюється шляхом виключення значення коефіцієнта A' на результат вимірювального контролю температури (4) шляхом застосування методу відношення. Для цього додатково проводять вимірювання нормованої за значенням температури T_{01} (при тих же умовах навколишнього середовища й незмінних параметрах вимірювального каналу) та знаходять відношення отриманих результатів. В цьому випадку рівняння вимірювального контролю температури T_{xb} об'єкту дослідження не буде залежати від A' та σ :

$$T_{xb} = 4 \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{A' \sigma}} = T_{01} 4 \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{\Phi_{01}}}, \quad (5)$$

де значення потоків оптичного випромінювання Φ_x і Φ_{01} визначаються з однаковою точністю й одним і тим же методом, а коефіцієнти A' та σ скорочуються.

Зазначено, що методи надлишкових вимірювань вирішують також задачу високоточного вимірювального контролю при наявності випадкових похибок, що являють собою стаціонарний ергодичний процес. У цьому випадку рівняння надлишкових вимірювань середнього значення температури отримано у вигляді:

$$\overline{T_{xb}} = T_{01} 4 \sqrt[4]{\frac{\overline{\Phi_x}}{\Phi_{01}}}, \quad (6)$$

де $\overline{\Phi_x}$ і $\overline{\Phi_{01}}$ — усереднені за значенням потоки оптичного випромінювання.

Розроблено математичні моделі методів надлишкових вимірювань при кубічній функції перетворення, квадратичній функції перетворення, при поліномі 3-го ступеня і при логарифмічній функції перетворення. Показано, що у всіх випадках методи надлишкових вимірювань забезпечують лінійну залежність результатів надлишкових вимірювань від значень інформативного потоку оптичного випромінення. Причому отриманий результат не залежить від значень параметрів нелінійної функції перетворення та їх відхилень від номінальних значень.

Встановлено, що при логарифмічній функції перетворення вимірювального каналу найбільший діапазон вимірюваних температур може бути забезпечений оптико-електронним методом надлишкових вимірювань при формуванні п'яти потоків оптичного випромінення. Математична модель являє собою систему нелінійних рівнянь величин (7), при розв'язанні якої отримується рівняння надлишкових вимірювань потоку оптичного випромінення (8), де U'_{ni} — вихідна напруга вимірювального каналу, Φ_T — темновий потік, k_1 — коефіцієнт пропорційності ($k_1=1$):

$$\begin{cases} U'_{H1} = S'_H \ln(\Delta\Phi_0/\Phi_T + k_1) + \Delta U'; \\ U'_{H2} = S'_H \ln(\Phi_0/\Phi_T + k_1) + \Delta U'; \\ U'_{H3} = S'_H \ln((\Phi_0 + \Delta\Phi_0)/\Phi_T + k_1) + \Delta U'; \\ U'_{H4} = S'_H \ln(\Phi_x/\Phi_T + k_1) + \Delta U'; \\ U'_{H5} = S'_H \ln((\Phi_x + \Delta\Phi_0)/\Phi_T + k_1) + \Delta U', \end{cases} \quad (7)$$

$$\Phi_x = \frac{\Delta\Phi_0}{\left([\Delta\Phi_0/(\Phi_0 + \Phi_T)] + k_1\right)^{\left[(U'_{H5} - U'_{H4})/(U'_{H3} - U'_{H2})\right]} - k_1} - \Phi_T. \quad (8)$$

Параметри логарифмічної функції перетворення визначаються за рівняннями вимірювань:

$$S'_H = \frac{U'_{H3} - U'_{H2}}{\ln([\Delta\Phi_0/(\Phi_0 + \Phi_T)] + k_1)}, \quad (9) \quad \Delta U' = U'_{H2} - (U'_{H3} - U'_{H2}) \frac{\ln([\Delta\Phi_0/\Phi_T] + k_1)}{\ln([\Delta\Phi_0/(\Phi_0 + \Phi_T)] + k_1)}. \quad (10)$$

При логарифмічній функції перетворення для врахування коефіцієнта A' (див. (5)) також додатково проводяться вимірювання відомої за значенням (нормованої) температури T_0 . При цьому досягнення розплавом температури T_0 визначається за реперними точками кривої в'язкості скломаси. Після досягнення температури T_0 починається визначення значення потоку оптичного випромінення Φ_{01} за тим же методом надлишкових вимірювань. Отримане рівняння надлишкових вимірювань для потоку оптичного випромінення має вигляд:

$$\Phi_{01} = \frac{\Delta\Phi_0}{\left([\Delta\Phi_0/(\Phi_0 + \Phi_T)] + k_1\right)^{\left[(U''_{H5} - U''_{H4})/(U''_{H3} - U''_{H2})\right]} - k_1} - \Phi_T \quad (11)$$

і використовується для кінцевого розрахунку температури згідно з аналітичним виразом (5).

За наявності випадкових похибок, що являють собою стаціонарний процес, визначення усередненого значення температури здійснюється за рівнянням вимірювання (6).

Математичне моделювання теоретичних досліджень показало наступні результати вимірювального контролю температури методом надлишкових вимірювань при лінійній функції перетворення: 1) граничне значення відносної похибки δ_T становить 0,003%; 2) змінення параметрів функції перетворення під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів на $(1 \div 10)\%$, а також змінення адитивної похибки не впливають на результат надлишкових вимірювань; 3) при використанні методу надлишкових вимірювань у методі відношення виключається вплив коефіцієнта A' на результат контролю завдяки виконанню класичного прийому — операції ділення двох потоків оптичного випромінення (див. (5)), а відносна похибка визначається похибкою відтворення нормованого за значенням потоку оптичного випромінення.

Показано, що при використанні опосередкованих методів вимірювання температури (для лінійної функції перетворення вимірювального каналу) змінення значень параметрів функції перетворення фотодіода з 0,1% до 1% призводить до збільшення похибки вимірювання температури з $\delta_T = (0,71 \div 0,55) \%$ до $\delta_T = (0,93 \div 0,77) \%$ відповідно. Збільшення адитивної складової похибки з $\Delta_a = 0,001 \text{ В}$ до $\Delta_a = 0,002 \text{ В}$ призводить до збільшення відносної похибки. Так, при зміні параметрів фотоприймача на 1% відносна похибка становить $\delta_T = (1,59 \div 1,28) \%$.

Графіки температурних характеристик при лінійній функції перетворення для методу опосередкованих вимірювань (при адитивній складовій похибки $\Delta_a = 0,002 \text{ В}$) показано на рис. 2, де: $T_{\text{пр1}}$ – температура методу опосередкованих вимірювань при

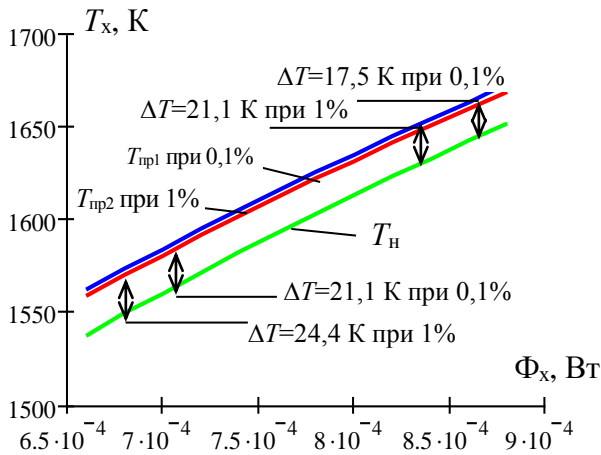


Рисунок 2 – Графіки температурних характеристик

змініненні параметрів функції перетворення на 0,1%; $T_{\text{пр2}}$ – температура методу опосередкованих вимірювань при змініненні параметрів функції перетворення на 1%; $T_{\text{н}}$ – температура методу надлишкових вимірювань, отримана при стабільних параметрах функції перетворення.

Аналіз наведених графіків показав, що при змініненні параметрів функції перетворення на 0,1% значення температури, виміряне опосередкованим методом, буде відрізнятися від значення температури, що виміряна при нормальних умовах, на $\Delta_{\Sigma} = 21,1 \text{ К}$ на початку діапазону і

на $\Delta_{\Sigma} = 17,5 \text{ К}$ в кінці діапазону. Відносна похибка буде змінюватися від $\delta_{\text{пр}} = 1,37\%$ до $\delta_{\text{пр}} = 1,06\%$. При змініненні параметрів функції перетворення на 1% отримуємо такі значення на обраному діапазоні вимірювань: $\Delta_{\Sigma} = (24,4 \div 21,1) \text{ К}$ і $\delta_{\text{пр}} = (1,59 \div 1,28) \%$.

Порівняльний аналіз похибок вимірювального контролю температури для опосередкованого методу й методу надлишкових вимірювань показав високу ефективність автоматичного виключення систематичної складової похибки запропонованого методу за виключенням похибки, що обумовлена похибкою відтворення нормованого за значенням потоку оптичного випромінювання.

Показано, що при логарифмічній функції перетворення методи надлишкових вимірювань забезпечують не тільки вимірювальний контроль температури у всьому діапазоні значень потоку оптичного випромінювання Φ_x , але й отримання високої точності вимірювання. Теоретичні розрахунки й комп'ютерне моделювання в середовищі Mathcad дали можливість встановити наступне: 1) граничне значення відносної похибки δ_T вимірювання температури лежить у діапазоні від $\delta_T = 0,001\%$ до $\delta_T = 0,013\%$; 2) змінення параметрів функції перетворення під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів на $(1 \div 10)\%$ не впливає на результат надлишкових вимірювань потоку оптичного випромінювання; 3) оцінено відносні похибки методу надлишкових вимірювань на базі методу відношення для трьох значень температури T_0 : на початку, у середині і в кінці діапазону вимірювань.

Графіки отриманих відносних похибок наведено на рис. 3, де $\delta_{\text{В1}}$ – відносна похибка при $T_0 = 1645 \text{ К}$; $\delta_{\text{В2}}$ – відносна похибка при $T_0 = 1250 \text{ К}$; $\delta_{\text{В3}}$ – відносна

похибка при $T_0=870$ К. З отриманих графіків видно, що відносні похибки змінюються в межах робочого діапазону: від $\delta_{B1}=0,0126\%$ до $\delta_{B1}=2\cdot 10^{-4}\%$ при значенні температури $T_0=1645$ К, від $\delta_{B2}=0,005\%$ до $\delta_{B2}=0,017\%$ при значенні температури $T_0=1250$ К. При температурі $T_0=870$ К відносна похибка змінюється від $\delta_{B3}=7\cdot 10^{-3}\%$, при $\Phi_x = 1,56\cdot 10^{-4}$ Вт значення $\delta_{B3} = 3\cdot 10^{-5}\%$, а потім знов зростає до $\delta_{B3} = 5,7\cdot 10^{-3}\%$.

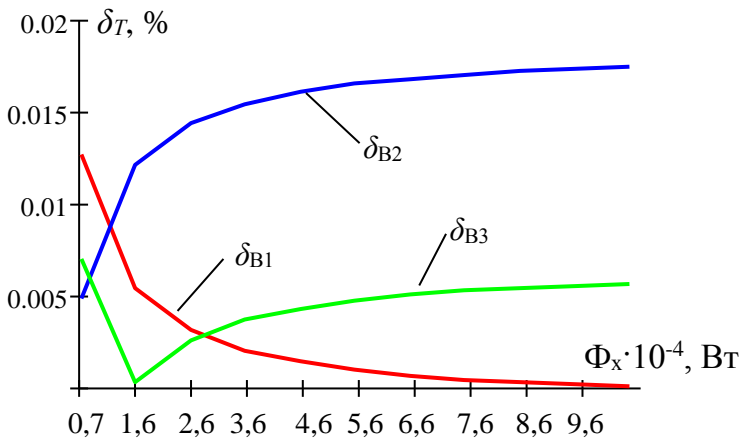


Рисунок 3 – Графіки відносних похибок методу надлишкових вимірювань за відношенням

Проведено оцінювання ефективності автоматичного виключення складової похибки методом надлишкових вимірювань (при логарифмічній функції перетворення) по відношенню до

методу опосередкованих вимірювань (на лінійній ділянці). Установлено, що при зміні параметрів функції перетворення на 1% ефективність виключення похибок вимірювання щодо методів опосередкованих вимірювань змінюється від 73 до 59 разів, а якщо ці параметри змінюються на 10%, то від 240 до 222 разів. Отримані результати свідчать про високу ефективність методу надлишкових вимірювань у частині автоматичного виключення систематичної складової похибки, що обумовлена зміною параметрів функції перетворення.

У третьому розділі викладено технічні рішення цифрових пірметрів, які реалізують методи надлишкових вимірювань температури при різних видах функції перетворення вимірювального каналу з фотоприймачем.

Функціональна схема цифрового пірметра при лінійній функції перетворення вимірювального каналу зображена на рис. 4.

На початку вимірювання в пам'яті мікроконвертора МК записується програма виконання заданої послідовності операцій та код числа N_0 , що відповідає каліброваному за значенням потоку випромінювання Φ_0 . Блок-схема алгоритму роботи пристрою наведена в додатку Р (рис. Р.1) дисертаційної роботи.

Робота пірметра полягає у вимірювальному перетворенні потоків оптичного випромінювання як від досліджуваного об'єкта, так і від джерела монохроматичного випромінювання ДМВ ($\{\Phi_1\}=\Phi_0$, $\{\Phi_2\}=\{\Phi_0\}$, $\{\Phi_3\}=\{\Phi_x\}$). Ці потоки надходять на вхід фотоприймача-підсилювача ФПП через такі функціональні блоки: перший скляний об'єктив СО1 ($\lambda = (400 \div 760)$ нм), заслінку ЗЛ, напівпрозору пластину СПП, дзеркальну польову діафрагму ДПД, обтюраторний диск ОД, апертурну діафрагму АД, фокусувальну лінзу ФЛ, або від джерела монохроматичного випромінювання ДМВ через такі ж блоки, але без першого скляного об'єктива СО1 і заслінки ЗЛ. У мікроконверторі МК проводиться обробка отриманих результатів та визначення температури T_x об'єкта дослідження згідно з рівнянням надлишкових вимірювань (4), а крутості перетворення — згідно з (3). Отримане значення температури N_{Tx} висвітлюється

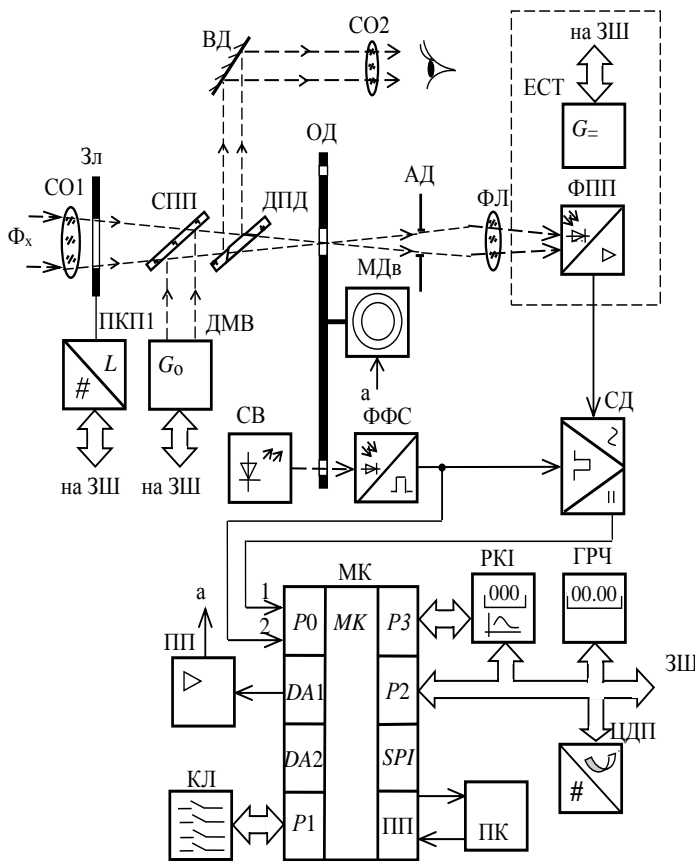


Рисунок 4 – Функціональна схема пірметра при лінійній функції перетворення вимірювального каналу

на екрані рідинно-кристалічного індикатора РКІ, або, при необхідності, виводиться на екран персонального комп'ютера чи на друк за допомогою пристрою друку ЦДП.

Запропоноване технічне рішення цифрового пірметра забезпечує автоматичне виключення адитивної й мультиплікативної складових систематичної похибки результату вимірювання, що обумовлені зміною параметрів функції перетворення під дією дестабілізуючих факторів.

Розроблено технічні рішення цифрових пірметрів, що реалізують методи надлишкових вимірювань при кубічній та поліноміальній функціях перетворення [14 – 16]. Функціональні схеми зазначених пірметрів наведено в додатках С та Т дисертаційної роботи. Їх особливістю є те, що всі технічні рішення забезпечують високоточний вимірювальний контроль температури об'єкта дослідження в

широкому діапазоні температур, а також лінійну залежність результатів вимірювання від інформативного потоку оптичного випромінювання.

Функціональну схему цифрового пірметра при квадратичній функції перетворення приведено на рис. 5.

У цифровому пірметрі в якості сенсора використовується болометр, який відрізняється підвищеною, у порівнянні з фотодіодом, чутливістю.

Пристрій працює таким чином. У результаті калібрування радіаційного пірметра за допомогою стандартних джерел з нормованими характеристиками одержують коди чисел N_0, N_1 , які відповідають каліброваним за значеннями потокам оптичного випромінювання Φ_2 і Φ_3 . Після вимірювального перетворення рядів потоків оптичного випромінювання Φ_1 ($\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$), Φ_2 ($\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\} - \Delta\Phi_0$), Φ_3 ($\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$), Φ_4 ($\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\} + \{\Phi_2\}$) та Φ_5 ($\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Phi_3\}$) у відповідні вихідні напруги з наступним перетворенням їх у числові коди N_{i0} ($N_{i0} = \{f_{i0}\} \{\Delta t_0\}$, де Δt_0 — інтервал часу вимірювання; $f_{i0} = f_i - f_0$, f_0 — опорна частота з виходу генератора опорної частоти ГОЧ), за допомогою мікроконвертора МК проводиться обробка поточних результатів за рівнянням надлишкових вимірювань виду

$$N_x = (N_0 N_1) \frac{(N_{05} - N_{04}) - (N_{03} - N_{02})}{(N_1 + N_0)(N_{03} + N_{02}) - (N_1 - N_0)(N_{02} + N_{03} - 2N_{01})} \quad (12)$$

Далі здійснюється визначення температури T_x за відповідними таблицями.

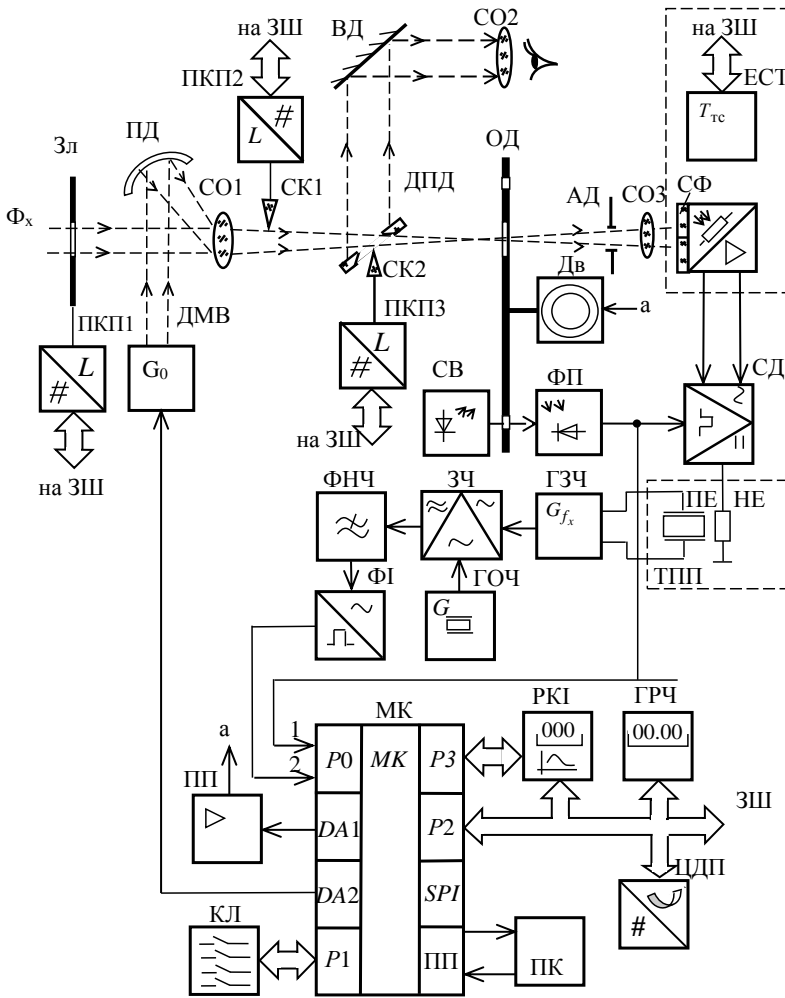


Рисунок 5 – Функціональна схема пірометра при квадратичній функції перетворення вимірювального каналу

Для вимірювального контролю температур у широкому діапазоні значень розроблено технічне рішення пірометра при логарифмічній функції перетворення [17]. Функціональна схема пірометра аналогічна функціональній схемі при лінійній функції перетворення, з тією різницею, що, у досліджуваному випадку, перед фотоприймачем був введений світлофільтр СФ для отримання сигналу в певному спектральному діапазоні довжин хвиль $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$. Блок-схема алгоритму роботи пристрою наведена в додатку Р (рис. Р.2) дисертаційної роботи.

Робота пірометра полягає у вимірювальному перетворенні таких потоків оптичного випромінювання: $\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\}$, $\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\}$, $\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Delta\Phi_0\}$. Сумування потоків випромінювання здійснюється при відкритій заслінці ЗЛ і при

роботі джерела монохроматичного випромінювання ДМВ за допомогою параболічного дзеркала ПД й скляного об'єктива СО1 (див. рис. 4).

Обробка результатів поточних вимірювальних перетворень і визначення значення температури T_x об'єкта проводиться за рівнянням числових значень:

$$N_{T_x} = \{T_x\} = 4 \sqrt{\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\left[\left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\}} + \{\Phi_T\} + 1 \right)^{\frac{(N_5 - N_4)}{(N_3 - N_2)} - 1} - \{\Phi_T\} \right] / A' \sigma}}. \quad (13)$$

Для здійснення контролю метрологічної надійності вимірювального каналу додатково визначають параметри функції перетворення за рівняннями числових значень:

$$N_{S'н} = \frac{N_3 - N_2}{\ln \left[\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right]}, \quad (14)$$

$$\Delta N = N_2 - \frac{(N_3 - N_2) \ln \left(\frac{\{\Phi_0\}}{\{\Phi_T\}} + 1 \right)}{\ln \left[\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right]}. \quad (15)$$

Для виключення впливу коефіцієнта A' (див. (4)) проводяться додаткові вимірювальні перетворення потоків випромінювання Φ'_4 ($\{\Phi'_4\} = \{\Phi_{01}\}$) і Φ'_5 ($\{\Phi'_5\} = \{\Phi_{01}\} + \{\Delta\Phi_0\}$) у відповідні напруги. За командою з мікроконвертора МК, що надходить на вхід другого перетворювача «код-переміщення» ПКП2, світлофільтр СФ встановлюється в положення, при якому на вхід фотоприймача надходить оптичний сигнал у спектральному діапазоні довжин хвиль $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$. У результаті відбувається вимірювальне перетворення потоків оптичного випромінювання Φ'_4 і Φ'_5 у відповідні напруги U''_{14} і U''_{15} , а потім й у відповідні їм коди чисел, які запам'ятовуються.

Після закінчення цих тактів виконується обробка отриманих результатів вимірювального перетворення згідно з рівнянням числових значень (12):

$$N_{Tx} = N_{T0} 4 \sqrt{\frac{\Phi_x}{\Phi_{01}}} = 4 \sqrt{\frac{\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} - \{\Phi_T\}}{\left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1\right) \left(\frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2}\right) - 1}} / \sqrt{\frac{\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} - \{\Phi_T\}}{\left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1\right) \left(\frac{N'_5 - N'_4}{N_3 - N_2}\right) - 1}}}. \quad (16)$$

Отримане значення N_{Tx} висвітлюється на рідиннокристалічному індикаторі РКІ або виводиться на екран персонального комп'ютера чи на друк. Останнє здійснюється за допомогою цифрового пристрою друку ЦДП.

Технічні рішення пірометрів забезпечують можливість зміни фотоприймача на ідентичний по характеристикам, причому без додаткового калібрування та налагодження, оскільки реалізують методи, що інваріантні до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів.

У четвертому розділі проведені напівнатурні експериментальні дослідження вимірювального контролю температури методами опосередкованих і надлишкових вимірювань при обробці результатів багаторазових вимірювань за двома підходами.

При першому підході в кожному такті здійснюється n вимірювальних перетворень потоків оптичного випромінювання, а обробка результатів проміжних вимірювань здійснюється згідно з рівнянням надлишкових вимірювань. При використанні лінійної та логарифмічної функції перетворення рівняння надлишкових вимірювань мають вигляд:

$$T_x = 4 \sqrt{\frac{\Phi_0 + \Phi_0 \left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{li3} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{li2} \right) / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{li2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{li1} \right) \right]}{A' \sigma}} \quad (17)$$

та

$$T_x = 4 \sqrt{\frac{\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} - \Phi_T}{\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1\right) \left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U'_{hi5} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U'_{hi4}\right) / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U'_{hi3} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U'_{hi2}\right)\right] - k_1}} / A' \sigma}, \quad (18)$$

де Φ_x – потік оптичного випромінювання від об'єкта, Φ_0 – нормований за значенням потік оптичного випромінювання, $U_{лі1}, \dots, U_{лі3}, U_{ні1}, \dots, U_{ні5}$ – вихідні напруги вимірювального каналу в певних тактах вимірювання.

При другому підході цикли вимірювань проводять n разів, а отримані дані обробляють відомим методом. Рівняння надлишкових вимірювань для випадку використання лінійної та логарифмічної функції перетворення мають вигляд:

$$T_x = \sqrt[4]{\Phi_x / A'\sigma} = \sqrt[4]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Phi_0 + \Phi_0 [(U_{лі3} - U_{лі2}) / (U_{лі2} - U_{лі1})])} / A'\sigma} \quad (19)$$

та

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\Phi_0}{([\Delta\Phi / (\Phi_0 + \Phi_T)] + k_1) [(U'_{н5} - U'_{н4}) / (U'_{н3} - U'_{н2})] - k_1} - \Phi_T \right)} / A'\sigma}. \quad (20)$$

Для проведення напівнатурних досліджень була зібрана експериментальна установка (рис.6), яка складається із досліджуваної фотометричної лампи 1 (КГМ4-8),

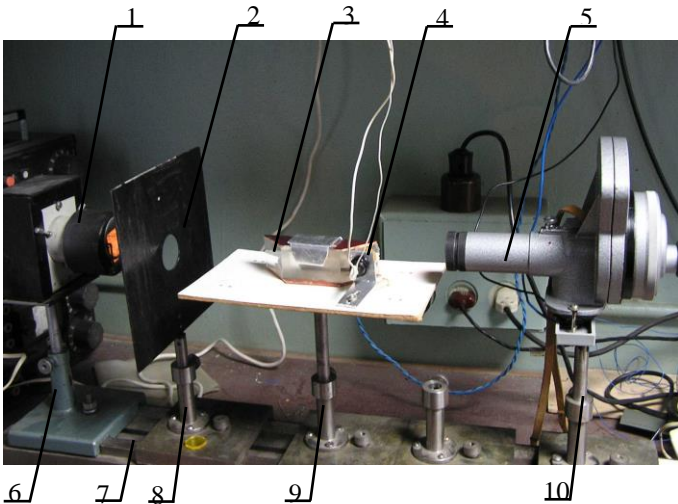


Рисунок 6 – Експериментальна установка

діафрагми 2, оптичної призми 3, лампи розжарювання мініатюрної 4 (МН6-0,46), оптичного пірметра 5 (ОППИР – 016), штативів 6, 8 – 10, фотометричної лави 7. Знята вольт-амперна характеристика лампи розжарювання 4 і проведена її лінійна апроксимація за допомогою програмного засобу Advanced Grapher. У результаті на даній характеристиці була вибрана робоча точка з координатами $U = 5,121$ В і $I = 0,397$ А, які забезпечують формування нормованого за значенням потоку Φ_0 випромінювання ($\Phi_0 = 2,033$ Вт).

Процес вимірювання при лінійній функції перетворення описується системою лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} U_{п1} = S'_л \Delta\Phi + \Delta U'_{зМ} = \Delta U'_{зМ}; \\ U_{п2} = S'_л \Phi_0 + \Delta U'_{зМ} = S'_л (k U_л I_л) + \Delta U'_{зМ}; \\ U_{п3} = S'_л (\Phi_x + \Phi_0) + \Delta U'_{зМ} = S'_л k (U I + U_л I_л) + \Delta U'_{зМ}; \end{cases} \quad (21)$$

де $U_{ні}$ — напруги на пірметричній лампі, $\Delta\Phi$ — потік засвічення, обумовлений неякісним затемненням входу об'єктива пірметра, $S'_л$ — крутість перетворення лінійної складової функції перетворення, $U_л I_л$ — потужність, яку споживає пірметрична лампа, що пропорційна потужності, яку споживає лампа розжарювання, $U I$ — потужність, яку споживає пірметрична лампа.

Розв'язання системи лінійних рівнянь величин (21) дає можливість отримати рівняння надлишкових вимірювань інформативного потоку оптичного випромінювання:

$$\Phi_x = \Phi_0 \left[\frac{(U'_{п3} - U'_{п2})}{(U'_{п2} - U'_{п1})} \right] = \Phi_0 \left[\frac{(U_{\Sigma} I_{\Sigma} / U_{л} I_{л}) - 1}{1} \right], \quad (22)$$

де $U_{\Sigma} I_{\Sigma} = UI + U_{л} I_{л}$ — потужність, яку споживає пірометрична лампа, що пропорційна потужностям, які споживають фотометрична лампа й лампа розжарювання.

У першому такті здійснюється вимірювання напруги $U_{п1}$ темного потоку при вимкненому живленні фотометричної лампи й лампи розжарювання. Багаторазове (10 разів) вимірювання каліброваного за значенням потоку Φ_0 оптичного випромінювання здійснюється в другому такті. Третій такт забезпечує багаторазове (10 разів) вимірювання потоку випромінювання обох ламп: від фотометричної лампи й лампи розжарювання. Для цього, при не виключеному живленні лампи розжарювання, включається живлення фотометричної лампи. Після співпадіння яскравості нитки лампи розжарювання з яскравістю еталонної лампи, знімалися (10 разів) відповідні показання напруги й струму.

Обробка отриманих результатів проводилась згідно з рівняннями надлишкових вимірювань за першим (23) та за другим (24) підходами:

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\Phi_0 \left[\frac{(\bar{U}_{\Sigma i} \cdot \bar{I}_{\Sigma i})}{\bar{U}_{л i} \bar{I}_{л i}} - 1 \right]}{\sigma \varepsilon S}} + T_{oc}^4, \quad (23)$$

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_0 \left[\frac{(U_{\Sigma i} \cdot I_{\Sigma i})}{U_{л i} I_{л i}} - 1 \right]}{\sigma \varepsilon S}} + T_{oc}^4. \quad (24)$$

У результаті проведених експериментальних досліджень, з урахуванням похибки амперметра і вольтметра, одержано наступні дані при застосуванні МНВ II-го роду при першому підході: середнє значення отриманої температури $T_{хсп} = 1429,20$ К, відносна похибка МНВ II-го роду становить 0,09 %.

Оброблення результатів багаторазових (по 10 разів) вимірювань температури відомим методом здійснюється таким чином. Вмикається живлення фотометричної лампи і в умовах однакової яскравості ниток лампи розжарювання й пірометричної лампи за допомогою вольтметра й амперметра знімаються показання напруги U та струму I фотометричної лампи. Отримані дані, при відомих значеннях площі S поверхні нитки розжарювання, температури навколишнього середовища T_{oc} і коефіцієнта випромінювання k , підставляють у рівняння вимірювань

$T_x = \sqrt[4]{(kIU / \sigma \varepsilon S) + T_{oc}^4}$. Знайдені значення температури за таблицею відповідності переводять у яскравісну температуру. При проведенні експерименту також оцінювалася похибка пірометра та враховувалися інструментальні похибки вимірювальних пристроїв (амперметра й вольтметра) відповідно до їх паспортних даних. У результаті було отримане значення температури $T_{псп} = (1425,19 \pm 6,39)$ К, похибка вимірювання становить 0,45 %.

У процесі оброблення результатів багаторазових надлишкових вимірювань МНВ II-го при другому підході отримано значення температури $T_{\text{хср}} = (1430,41 \pm 0,94)$ К і відносна похибка $\delta = 0,07\%$.

Побудовано графік залежності достовірності контролю D (рис. 7) від відносного середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання при симетричному полі допуску.

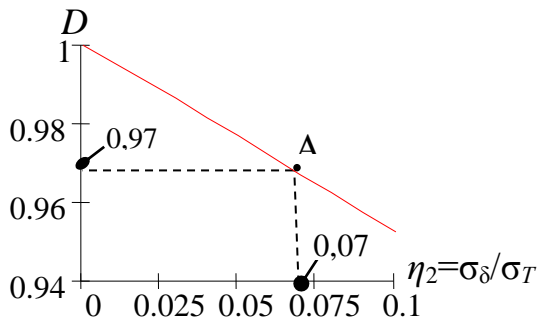


Рисунок 7 – Залежність достовірності контролю від η_2

Точкою A позначено достовірність контролю в реперній точці при температурі $T = 1430,04$ К, яка склала 0,97 при застосуванні МНВ II-го роду при другому підході.

Таким чином, запропоновані оптико-електронні методи надлишкових вимірювань температури й відповідні їм технічні рішення пірометрів забезпечують вимірювальний контроль розплаву скла з високою точністю та достовірністю.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень у дисертаційній роботі отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проаналізовано недоліки безконтактних оптико-електронних методів вимірювання температури нагрітих тіл. Обґрунтовано необхідність подальшого підвищення точності вимірювального контролю температури.

2. Визначено оптимальна (необхідна й достатня) кількість потоків оптичного випромінювання, значення яких пов'язані між собою за законом арифметичної прогресії. Установлено, що число потоків оптичного випромінювання вибирається в залежності від числа n невідомих параметрів функції перетворення або $(n+1)$.

3. Запропоновані методи надлишкових вимірювань та технічні рішення цифрових пірометрів при 5-ти видах функції перетворення вимірювального каналу, які забезпечують отримання лінійної залежності результатів вимірювання від інформативного потоку оптичного випромінювання, а також отримання результату визначення потоку випромінювання, приведенного до входу вимірювального каналу.

4. Показано, що методи надлишкових вимірювань забезпечують отримання не тільки значення інформативного потоку оптичного випромінювання, але й значення параметрів функції перетворення вимірювального каналу. Це дає можливість додатково визначити метрологічну надійність засобу вимірювання.

5. На відміну від методу опосередкованих вимірювань, запропоновані методи надлишкових вимірювань забезпечують автоматичне виключення систематичної складової похибки, що обумовлена зміною параметрів функції перетворення під дією дестабілізуючих факторів. Це забезпечується завдяки виключенню впливу на результат вимірювання абсолютних значень параметрів нелінійної функції перетворення фотоприймача та їх відхилень від номінальних значень.

6. Експериментально доведено, що при температурі $T_x = 1430,04$ К і відносній похибці 0,09 % парціальний коефіцієнт ефективності методу надлишкових

вимірювань II-го роду в 5 разів вище в порівнянні з відомим методом багаторазових вимірювань температури.

7. Експериментально доведено, що усереднення результатів багаторазових вимірювань МНВ II-го роду забезпечують похибку вимірювання 0,09%. У відомих методах вона складає 0,45%.

8. Установлено, що при нормальному законі розподілу випадкових похибок з довірчою ймовірністю $P=0,95$, достовірність контролю температури в робочій точці $T_x=1430,04$ К, яка була визначена з відносною похибкою 0,09%, складає 0,97.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кондратов В.Т. Оптико-електронные методы избыточных измерений температуры / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна*, Н.М. Сердюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація: – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – №58. – С. 66 – 74. – ISBN 996-7559-85-8.

2. Кондратов В.Т. О создании пирометров отношения с автоматической коррекцией погрешности / В.Т. Кондратов, А.А. Зарниціна // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2005. – №1 (10). – С. 122–126.

3. Кондратов В.Т. Избыточная пирометрия: базовые структуры средств избыточных измерений температуры при разных видах функции преобразования измерительного канала / В.Т. Кондратов, Г.О. Корогод // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – №2 (223)– С. 235 – 248. – ISSN 2307-5732.

4. Кондратов В.Т. Избыточная пирометрия: избыточные измерения радиационной температуры при функции преобразования измерительного канала, описываемой полиномом 3-го порядка / В.Т. Кондратов, Г.О. Корогод // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – №4. – С. 7–12. – ISSN 2219-9365.

5. Кондратов В.Т. Радиационный пирометр с цифровой обработкой результатов промежуточных измерений / В.Т. Кондратов, А.А. Зарниціна, Н.М. Сердюк // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – К.: Ін-т кібернетики НАНУ, 2003. – №2. – С. 47 – 55.

6. Кондратов В.Т. Аппроксимация функции преобразования фотодиода для задач избыточных измерений физических величин / В.Т. Кондратов, А.А. Зарниціна // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну: зб. наук. праць. – К.: КНУТД, 2004. – №6. – С. 29 – 36.

7. Кондратов В.Т. Избыточная пирометрия: избыточные измерения радиационной температуры при логарифмической функции преобразования измерительного канала / В.Т. Кондратов, Г.О. Корогод // Вісник Хмельницького національного університету. — 2015. – №1 (221). – С. 193 – 206. – ISSN 2307-5732.

8. Кондратов В.Т. Цифровой оптический пирометр с автоматической коррекцией систематических погрешностей / В.Т. Кондратов, А.А. Зарниціна, Н.М. Сердюк // Проблемы управления и информатики. – 2003. – №5. – С. 112 – 121.

Scopus search results: 15122747200, 7004223186.

9. Корогод Г.О. Підвищення вірогідності вимірювального контролю температури розплаву скла / Г.О. Корогод // Вимірювальна та обчислювальна

* Зарниціну Г.О. вважати Корогод Г.О. у зв'язку із одруженням

техніка в технологічних процесах (ВОТТП_15_2015): матеріали XV Міжнародна науково-технічна конференції, Одеса (Затока), 10-14 вересня 2015 р. – Одеса–Хмельницький: ХНУ, 2015. – С. 41 – 42. – ISBN 978-966-330-228-7.

10. Кондратов В.Т. Проблемы измерения температуры объектов экосистемы / В.Т. Кондратов, А.А. Зарниціна // Экологические проблемы промышленных мегаполисов: материалы междунар. науч.-практ. конф., Донецк – Авдеевка, 01-04 июня 2004 года. – Донецк: ДонНТУ Министерства образования и науки Украины, 2004. – С. 499 – 505.

11. Кондратов В.Т. Проблемы измерения температуры опико-электронными методами / В.Т. Кондратов, А.А. Зарниціна // ПОЛІТ 2004: матеріали IV міжнародної конференції студентів та молодих учених, м. Київ, 15-16 квітня 2004 р. – К.: НАУ, 2004. – С. 25. – ISBN 966-598-165-X.

12. Кондратов В.Т. Порівняльний аналіз похибок надлишкових і прямих методів вимірювань температури при лінійній функції перетворення вимірювального каналу / В.Т. Кондратов, Г.О. Корогод // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015: тези I Всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Житомир, 17-18 квітня 2015 р. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – С. 69 – 70. – ISBN 978-966-683-434-1.

13. Кондратов В.Т. Зменшення випадкової складової похибки вимірювання температури методами надлишкових вимірювань II-го і III-го роду / В.Т. Кондратов, Г.О. Корогод // Сучасні інформаційні технології 2015: матеріали П'ятої міжнародної наукової конференції студентів і молодих вчених, м. Одеса, 21-22 квітня 2015 р. – Одеса: ВМВ, 2015. – С. 133 – 134. – ISBN 978-966-413-533-4.

14. Пат. 73426 А Україна. МПК G01J5/08. Пірометр спектрального відношення / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна, О.П. Рябов (Україна). – №20031212097; Заявлено 23.12.2003, Опубл. 15.07.2005. Бюл. №7. – 14 с.

15. Пат. 77840. Україна. МПК G01J5/08, G01K7/00. Цифровий пірометр відношення / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна. – № а200501402; Заявл.15.02.2005; Опубл.15.01.2007; Бюл.– №1. – 11 с.

16. Пат. 78064. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10. Спосіб надлишкових вимірювань дійсного значення температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна. – № а200500301; Заявл.13.01.2005; Опубл.15.02.2007; Бюл. – №2. – 10 с.

17. Пат. 78428 С2. Україна. МПК G01J5/08. Оптичний пірометр /В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна. – № а200507705; Заявл.02.08.2005; Опубл.15.03.2007; Бюл. – № 3. – 6 с.

18. Пат. 79162. Україна. МПК G01J5/10, G01J5/00, G01K7/00. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури нагрітого об'єкту за спектральним відношенням / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна. – № а200504466; Заявл.13.05.2005; Опубл.25.05.2007; Бюл. – №7. – 8 с.

19. Пат. 79192. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10, G01K7/00. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна. – № а200507703; Заявл.02.08.2005; Опубл.25.05.2007; Бюл. – №7. – 10 с.

20. Декларац. пат. 66299 А Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури/ В.Т. Кондратов, Г.О. Зарниціна, О.П. Рябов (Україна). – №2003109797; Заявлено 31.10.2003, Опубл. 15.04.2004. Бюл. №4. – 16 с.

21. Декларац. пат. 56614 А Україна. МПК G01R7/02. Спосіб визначення дійсного значення температури/ В.Т. Кондратов, Г.О. Зарніцина, Н.М. Сердюк (Україна). – №2002076364; Заявлено 30.07.2002, Опубл. 15.05.2003. Бюл. №5. – 24 с.

22. Декларац. пат. 66084 А Україна. МПК G01J5/20. Радіаційний пірометр/ В.Т. Кондратов, Г.О. Зарніцина, Н.М. Сердюк (Україна). – №2003076909; Заявлено 22.07.2003, Опубл. 15.04.2004. Бюл. №4. – 14 с.

23. Декларац. пат. 55947 А Україна. МПК G01J5/08. Оптичний пірометр/ В.Т. Кондратов, Г.О. Зарніцина (Україна). – №2002076365; Заявлено 30.07.2002, Опубл. 15.04.2003. Бюл. №4. – 12 с.

24. Декларац. пат. 68026 А Україна. МПК G01J1/20, G01R7/02. Спосіб надлишкових вимірювань температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарніцина, Н.М. Сердюк (Україна). – №2003088013; Заявлено 27.08.2003, Опубл. 15.07.2004. Бюл. №7. – 12 с.

АНОТАЦІЯ

Корогод Г.О. Методи та оптико-електронні засоби вимірювального контролю температури розплавів скломас з використанням інформативної надлишковості. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Вінницький національний технічний університет МОН України, м. Вінниця, 2016 р.

Дисертація присвячена вирішенню задачі підвищення точності та достовірності вимірювального контролю температури скломаси в процесі скловаріння при застосуванні методів та методології надлишкових вимірювань.

Розроблено математичні моделі та оптико-електронні методи надлишкових вимірювань температури при різних видах функції перетворення вимірювального каналу: лінійній, квадратичній, кубічній, поліноміальній (3-го ступеня) та логарифмічній. Виведені рівняння надлишкових вимірювань, у яких завдяки операції віднімання виключається адитивна складова похибки вимірювання, а завдяки операції ділення – мультиплікативна. Встановлено, що методи надлишкових вимірювань забезпечують лінійну залежність результату вимірювання від потоку оптичного випромінювання. На основі запропонованих методів розроблено ряд технічних рішень цифрових пірометрів. Установлено, що, у порівнянні з відомими методами, методи надлишкових вимірювань забезпечують високу достовірність вимірювального контролю температури, не меншою ніж 0,97.

Ключові слова: надлишкова пірометрія, методи надлишкових вимірювань, підвищення точності вимірювання, визначення параметрів функції перетворення, автоматична корекція похибок.

ABSTRACT

Korogod G.O. Methods and optical-electronic devices of measuring control of temperature of fusions of flowedmass with the use of informing redundant. - On the rights of the manuscript.

Dissertation for getting scientific degree of Candidate of Technical Sciences on speciality 05.11.13 – Devices and methods of control and definitions of substance composition. Vinnytsia National Technical University, MES of Ukraine, Vinnytsia, 2016.

The dissertation is directed on the decision of a task on increase of accuracy of the measuring control of temperature process of cooking of a glass with application of redundant measurements. The mathematical models and optico-electronic methods of redundant measurements of temperature with automatic correction of errors are developed at various kinds of function of transformation of the measuring channel: linear, square-law, cubic, logarithmic and function of transformation, which is described by the multimember of 3-rd degree. The problems of redundant measurements are deduced, in which due to operation of subtraction the additive component of an error of measurements is excluded, and due to operation of division – the multiply component. Besides the averaging of reusable measurements, in turn, promotes increase of accuracy and reduction of casual errors of a different origin. On the basis of the offered methods the technical decisions digital pyrometers are developed. It is established, that, in comparison with a method of direct measurements, the methods of superfluous measurements provide high efficiency of automatic exception of a regular making error with probability of measurement of temperature, not smaller than 0,97.

Key words: redundant pyrometer, methods of redundant measurements, increase of accuracy of measurements, determination parameters function of transformation, automatic correction of errors.

АННОТАЦИЯ

Корогод А.А. Методы и оптико-электронные устройства измерительного контроля температуры расплавов стекломасс с использованием информативной избыточности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. Винницкий национальный технический университет МОН Украины, г. Винница, 2016 г.

Диссертация направлена на решение задачи повышения точности и достоверности измерительного контроля температуры стекломасс в процессе варки стекла с использованием методологии и методов избыточных измерений. Разработаны математические модели и оптико-электронные методы избыточных измерений температуры с автоматическим исключением систематических погрешностей (обусловленных изменением параметров функции преобразования) при различных видах функции преобразования измерительного канала: линейной, квадратичной, кубической, полиномиальной (3-й степени) и логарифмической. В основу математических моделей методов избыточных измерений положено формирование информативной избыточности — оптимального (необходимого и достаточного) количества рядов физических величин (потоков оптического излучения), которые, во-первых, однородны с искомой (информативной), а, во-вторых, размеры этих величин составляют арифметическую прогрессию. Число потоков оптического излучения выбирается в зависимости от вида функции преобразования и числа неизвестных её параметров. На основании предложенного ряда потоков оптического излучения и вида функции преобразования составлена соответствующая система уравнений величин,

которая характеризует состояние измерительного канала в дискретные моменты времени. В результате решения данной системы было получено уравнение избыточных измерений потока излучения, которое используется при определении температуры. Решение уравнения избыточных измерений показало, что благодаря операции вычитания исключается аддитивная составляющая погрешности измерений, а благодаря операции деления — мультипликативная. Установлено, что результат измерительного преобразования мощности потока оптического излучения не зависит от параметров функции преобразования измерительного канала и ее отклонения от номинального значения. Кроме того, усреднение результатов многократных измерений способствует повышению точности и уменьшению случайной составляющей погрешности измерения.

На основе предложенных методов разработано ряд технических решений цифровых пирометров. Установлено, что, по сравнению с методами косвенных измерений, методы избыточных измерений обеспечивают высокую эффективность автоматического исключения систематической составляющей погрешности с вероятностью измерения температуры, не меньшей чем 0,97.

Ключевые слова: избыточная пирометрия, методы избыточных измерений, повышение точности измерений, определение параметров функции преобразования, автоматическая коррекция погрешности.