

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Непеляк Андрій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи контролю теплових втрат об'єктів комунально-побутової сфери оптичним методом

(назва роботи)

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Науковий керівник _____ Середюк Орест Євгенович, д.т.н., професор

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІВТ

професор _____ *О. Є. Середюк*

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) _____ (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Івано-Франківськ— 2024 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень магістр

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ _____

О. Є. Середюк

« _____ » _____ 2023 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Студенту Непеляк Андрій Васильович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи контролю для діагностування об'єктів в комунально-побутовій сфері оптичним методом

Керівник роботи, Середюк Орест Євгенович, д.т.н., професор _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по університету від "15" 12. 2023 року № 734/7

2. Термін подання студентом роботи "12" 01. 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Контроль теплового режиму об'єктів комунально-побутової сфери дистанційно, максимальна віддаль до об'єкту 100 м, діапазон температури навколишнього середовища не вище +8 °С, діапазон контролю температури -50 до +50°С

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналіз методів і відомих пристроїв контролю температурного режиму і постановка задачі на магістерську роботу. 2. Розробка системи контролю об'єктів в комунально-побутовій сфері. 3. Здійснити метрологічний аналіз розробленого приладу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Математичне моделювання процесу теплопередачі (формат А1). 2. Математичне моделювання теплового балансу (формат А1). 3. Математична модель фур'є-спектроскопії (формат А1). 4. Модель фур'є-спектроскопії (формат А1). 5. Структурна схема. Фур'є-спектрометр (формат А1). 6. Функціональна схема. Інтерферометр Майкельсона (формат А1). 7. Складальне креслення. Фур'є-спектрометр (формат А1). 8. Технологічна схема контролю (формат А1). 9. Метрологічний аналіз (формат А1).....

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 11.12.2023_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд методів і засобів контролю	11.12.23 – 15.12.23	
2.	Теоретичне обґрунтування методу контролю	16.12.23 – 22.12.23	
3.	Розробка конструкції установки	16.12.23 – 23.12.23	
4	Розробка покращеної методики контролю	24.12.23 – 27.12.23	
5	Метрологічний аналіз	28.12.23– 01.01.24	
6.	Оформлення роботи.	02.01.24– 12.01.24	

Студент

_____ Непеляк А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Середюк О.Є..
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 76 с., 16 рис., 1 додаток, 20 джерел, 9 аркушів креслень..

Мета роботи – розробка системи контролю для діагностування об'єктів в комунально-побутовій сфері.

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів контролю.

В магістерській роботі був проведений аналіз об'єкту контролю, аналіз існуючих методів вимірювання температури, проаналізовані різні прилади вимірювання температури. Було сформульовано і поставлено завдання на магістерську роботу.

Складено математичну модель теплового балансу приміщення яка обґрунтовує залежність зовнішньої температури стінки від характеристик будівлі, параметрів навколишнього середовища та умов в середині приміщення. На базі проаналізованих теоретичних основ методу фур'є-спектрометрії розроблений алгоритм обробки результатів контролю фур'є-методом. Розроблено структурну схему приладу. На основі розрахунку окремих вузлів фур'є-спектрометра розроблена конструкція приладу. Також розроблена методика проведення контролю правильності обліку енергоносіїв за допомогою фур'є-спектрометра.

Проведено метрологічний аналіз розробленого приладу контролю температури диференціальним методом.

ТЕМПЕРАТУРА, ФУР'Є-СПЕТРОМЕТР, ПІРОМЕТР, ТЕПЛОВІЗОР,
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС, ІНТЕРФЕРОМЕТР
МАЙКЕЛЬСОНА, ІНТЕРФЕРОГРАМА, СПЕКТРОГРАМА, ОПТИЧНА
СИСТЕМА.

THE ABSTRACT

Master's degree work: 76 p., 16 pictures, 1 addition, 20 source, 9 folias of drafts.

A research object is the objects of domestic sphere.

The purpose of work is development of the checking for diagnosticating of objects in a domestic sphere.

A research method is the mathematical design of physical processes of control.

In the master's thesis, an analysis of the object of control, an analysis of existing methods of temperature measurement, and various temperature measurement devices were analyzed. The task for the master's thesis was formulated and set.

A mathematical model of the thermal balance of the room was created, which substantiates the dependence of the external temperature of the wall on the characteristics of the building, environmental parameters and conditions in the middle of the room. Based on the analyzed theoretical foundations of the Fourier spectrometry method, an algorithm for processing the results of Fourier method control was developed. A structural diagram of the device has been developed. The design of the device was developed on the basis of the calculation of individual nodes of the Fourier spectrometer. A technique for checking the correctness of energy carrier accounting using a Fourier spectrometer has also been developed.

A metrological analysis of the developed temperature control device by the differential method was carried out.

TEMPERATURE, FOURIER-SPECTRUM, PYROMETER, TERMOVTSION, HEAT-TRANSFER, THERMAL BALANCE, INTERFEROMETER OF MAYKELSON, INTERFEROGRAPH, SPECTORGRAPH, OPTICAL SYSTEM.

ЗМІСТ

	ст.
Вступ.....	7
1. Аналіз методів і відомих пристроїв контролю температурного режиму .	10
1.1 Температурна шкала і методи вимірювання температури	10
1.2 Термометри опору і термоелектричні термометри	12
1.3 Термостати опору і термоелектричні термометри	20
1.4 Пірометри	25
1.5 Тепловізори	35
1.6 Постановка задачі на магістерську роботу	39
2 Розробка системи контролю об'єктів в комунально-побутовій сфері	43
2.1 Математична модель теплового балансу приміщення	43
2.2 Теоретичні основи методу фур'є- спектрометра.....	50
2.3 Розробка алгоритму обробки результатів контролю фур'є-методом.	60
2.4 Розробка структурної схеми фур'є-спектрометра	62
2.5 Розрахунок коліматора фур'є-спектрометра	64
2.6 Розробка конструкції фур'є-спектрометра	70
2.7 Методика проведення контролю за допомогою фур'є-спектрометра	71
3 Метрологічний аналіз розробленого фур'є-спектрометра	73
3.1 Аналіз видів похибок	73
3.2 Розрахунок похибки обчислення температури диференціальним методом.....	75

ВСТУП

Проблема енергозбереження була актуальною завжди. Це стосується не тільки споживачів, які завдяки цьому мають можливість економити власні кошти, але і є актуальним в екологічному аспекті, оскільки всі ресурси на Землі не безмежні.

Зараз актуальною проблемою нашої держави є правильність обліку енергоресурсів і їх раціонального використання. Дуже важливим є виключення можливості несанкціонованого доступу споживачів до приладів обліку енергоносіїв. Повністю виключити цей фактор поки що неможливо, але необхідно виявляти правопорушення у сфері застосування приладів енергообліку.

Очевидним є те, що споживач використовує газ, електроенергію, гарячу воду, які створюють тепловий баланс, потрібний для життєдіяльності людини. Особливо це актуально зимою, коли є потреба обігрівати житло. Всі ці енергоносії сприяють нагріванню повітря в приміщенні до потрібної температури. Відомим є те, що всі предмети випромінюють певну теплову енергію. Зовнішня стінка приміщень також її випромінює, яка, очевидно залежить від температури всередині приміщення.

Щоб виявити правопорушення можна скористатися наступним методом: замірявши температуру зовнішньої стінки будівлі за математичною моделлю теплопередачі через стінку визначити температуру всередині приміщення і на основі цього зробити висновок про кількість використаної енергії мешканцем будинку. Порівнюючи її з енергією яка обраховується на основі показів лічильників можна зробити висновок про наявність чи відсутність правопорушень.

Для вимірювання температури можна використати оптичний метод непрямого визначення температури випромінюючої поверхні. Основна перевага

методу полягає в можливості безконтактного контролю температури в будь-якій точці поверхні. Суть методу зводиться до порівняння відносних значень щільності спектральної яскравості випромінювання поверхні і еталонного джерела в одному або декількох ділянках спектру. Оскільки залежність яскравості випромінювання еталону від його температури відома, то визначення температури випромінюючої поверхні виконується простим розрахунком.

Точність методу оптичної пірометрії визначається якістю еталону, випромінювальними властивостями поверхні і чутливістю приймача пристрою. Остання обставина обмежує можливості методу для слабо випромінюючих поверхонь. Разом із застосуванням традиційних приладів з чутливішими приймачами випромінювання, в оптичній пірометрії низькотемпературного випромінювання починають використовувати і спектральні прилади високої світлосили. До таких приладів належать інтерференційні фур'є-спектрометри, світлосила яких в 100-200 разів вища, ніж у спектральних приладів з призмами і дифракційними ґратками.

При низьких значеннях ефективної температури яскравості випромінюючих поверхонь (200-400 K) їх випромінювання зосереджено в інфрачервоній області спектру. У фур'є-спектрометрах саме для цієї області спектру досягається вдале поєднання одночасності реєстрації всіх спектральних елементів, великої світлосили і широких можливостей швидкої математичної обробки інформації. Це дозволяє створити мобільну апаратуру малих габаритів з високими вихідними параметрами роздільною здатністю, швидкістю реєстрації, фотометричною і хвилевою точністю.

За останні роки цікавість до інфрачервоної спектрометрії низькотемпературних джерел значно зросла. Це пов'язано з можливістю використання її в швидкісних методах технологічного контролю процесів виробництва і в методах дистанційного зондування для досліджень природних ресурсів з літаків і супутників. Фур'є-спектрометри є найбільш придатними приладами для цих цілей, оскільки дозволяють набувати значень ефективної

температури яскравості з достатньо високою точністю (1-2%) в широкій ділянці спектру при малому часі вимірювання і обробки сигналу (декілька секунд).

Якраз саме зараз головним чином завдяки прогресу в створенні невеликих спеціалізованих ЕОМ і мікропроцесорів, що стали невід'ємною частиною лабораторного устаткування, переваги фур'є-спектроскопії використовуються все ширше.

Об'єктом дослідження є процес поширення теплового потоку через стінку будівельних споруд та перетворення апаратної функції фур'є-спектрометра в спектр.

Предметом дослідження є способи діагностування теплотехнічних об'єктів в комунально-побутовій сфері.

Наукова новизна магістерської робота полягає у теоретичному обґрунтуванні методу фур'є-спектрометрії для оцінки якості досліджуваних теплотехнічних об'єктів в комунально-побутовій сфері.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена пристрій є компактним, досить дешевим, дає досить швидкий і якісний теплотехнічних об'єктів в комунально-побутовій сфері

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ВІДОМИХ ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ

На даний час не існує принципових методів контролю несанкціонованого використання енергоресурсів, зокрема, теплової енергії.

Щоб виявити правопорушення у сфері застосування приладів енергообліку можна скористатися наступним методом. Замірявши температуру зовнішньої стінки будівлі за математичною моделлю теплового балансу приміщенню визначити температуру всередині приміщення і на основі цього зробити висновок про кількість використаної енергії мешканцем будинку. Порівнюючи її з енергією яка обраховується на основі показів лічильників можна зробити висновок про наявність чи відсутність правопорушень.

В свою чергу контроль теплового балансу приміщення зводиться до контролю температури. Отже, розглянемо існуючі методи і прилади контролю температури.

1.1 Температурна шкала і методи вимірювання температури

Температурою називають ступінь нагріву речовини. Температура речовини пов'язана із запасом її внутрішньої енергії, носіями якої є атоми і молекули [1]. Оскільки середня кінетична і потенціальна енергії атомів і молекул речовини залежать від температури, то практично всі фізичні властивості речовини залежать від його температури. Так, при зміні температури твердого тіла змінюються його лінійні розміри, щільність, твердість, модуль пружності, руйнівні напруження, електропровідність, теплопровідність, теплоємність і ряд інших властивостей. Властивості газів, рідких тіл (фазові стани, щільність, об'єм, в'язкість і ін.) є функцією температури речовини.

Можливість вимірювання температур базується на теплообміні, на передачі тепла від більш нагрітої речовини до менш нагрітої. Для того, щоб мати

можливість кількісно визначити значення вимірюваної температури, необхідно встановити одиницю вимірювання. Встановлення одиниці вимірювання температури градус пов'язано із встановленням шкали температур. Шкала температур є безперервною сукупністю чисел, лінійно пов'язаних з чисельними значеннями якої-небудь зручно і достатньо точно вимірюваної фізичної властивості, що є однозначною функцією температури. Для побудови температурної шкали вибирають опорні точки, що характеризуються незмінністю і відтворюваністю температури за певних фізичних умов. Припустимо, такими опорними точками вибрані температури кипіння або тверднення чистих речовин і їм присвоєні значення t_1 і t_2 . Тоді одиниця вимірювання буде рівна:

$$1 \text{град} = \frac{t_1 - t_2}{N} \quad (1.1)$$

де N – ціле число, на яке розбивається температурний інтервал між опорними (реперними) точками.

Всі прилади для вимірювання температури базуються на зміні властивостей різних речовин залежно від температури. Різноманітний вплив температури на зміну фізичних властивостей речовин викликав застосування різних методів і засобів вимірювання температури.

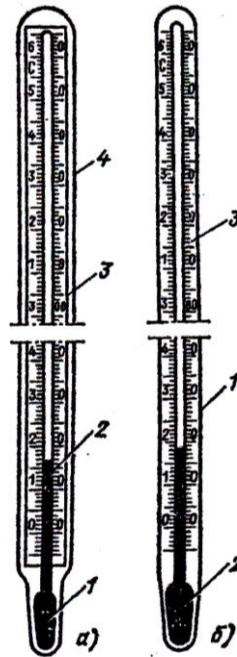
В даний час існують прилади [1] для вимірювання температури, принцип роботи яких базується на зміні:

- 1) об'єму тіла (термометри розширення);
- 2) тиску робочої речовини в замкнутій камері (манометричні термометри);
- 3) електричного опору провідників (електричні термометри опору);
- 4) термоелектрорушійної сили (термоелектричні термометри);
- 5) випромінювальної здатності нагрітих тіл (пірометри випромінювання)

1.2 Термометри розширення

Принцип дії термометрів розширення базується на зміні об'єму рідини або лінійних розмірів твердих тіл при зміні температури. Вони відносяться до контактних термометрів, в яких передача тепла до чутливого елемента забезпечується теплопровідністю і конвекцією. Поділяються на рідинні, дилатометричні, біметалеві та манометричні [2].

Рідинні термометри. В цих термометрах вимірюється відносне розширення рідини в порівнянні з об'ємом резервуару. Термометр має корпус 4 в якому розміщена шкала 3 і капіляр 2. Основна частина термометричної рідини розташовується в кулеподібному або циліндричному резервуарі 1 (рис. 1.1).



1 – резервуар з термометричною рідиною; 2 – капіляр; 3 – шкала; 4 – корпус
а – рідинний термометр із окремою шкалою; б – рідинний термометр із шкалою
нанесеною на корпусі

Рисунок 1.1– Рідинні термометри розширення

Резервуар з'єднаний з довгим і вузьким скляним капіляром 2. Розширення розраховується за формулою

$$V_t = V_0 (1 + \beta \cdot t), \quad (1.2)$$

де V_0, V_t – об'єми термометричної рідини при температурах відповідно 0°C і $t^\circ\text{C}$, л; β – об'ємний коефіцієнт температурного розширення, $1/^\circ\text{C}$.

Для заповнення термометрів можуть використовуватись практично будь-які рідини – змочувані і незмочуванні: ізопентан, етиловий спирт, ртуть, толуол.

Похибки вимірювання рідинними термометрами залежать від неоднаковості діаметра капіляра, неточності нанесення шкали, капілярних сил на поверхні рідини, неповного занурення термометра у вимірюване середовище. Границі допустимих похибок залежать від діапазону вимірювання та від ціни поділки.

Недоліками рідинних термометрів є значна теплова інерція і неможливість передачі показів на віддаль.

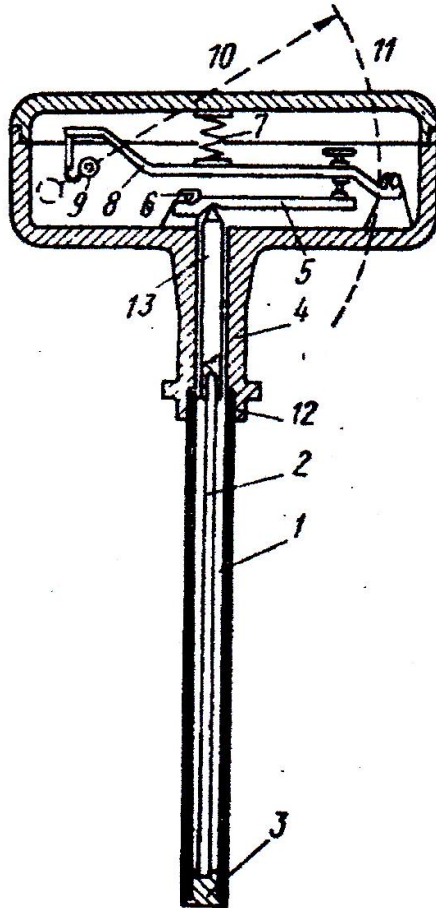
Дилатометричні та біметалеві термометри. В них використовується властивість твердого тіла змінювати свої лінійні розміри при зміні температури. Якщо температурний інтервал невеликий, то залежність довжини твердого тіла від температури може бути подана лінійною залежністю

$$l_t = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (1.3)$$

де l_t, l_0 – довжина твердого тіла відповідно при температурах t і 0°C , м; α – середній коефіцієнт лінійного розширення твердого тіла, $1/^\circ\text{C}$.

На рис. 1.2 зображений трубчатий дилатометричний термометр. Він складається з трубки 1, виготовленої з металу з великим коефіцієнтом лінійного розширення (латунь, мідь, алюміній, сталь) і стержня 2, виготовленого з матеріалу з малим коефіцієнтом лінійного розширення (кварц, інвар).

Стержень 2 опирається на пробку 3. Трубка 1 вкручена в головку 4, в якій розміщений важільний передавальний механізм 5-8. Ніпель 12 призначений для закріплення термометра в стінці посудини, всередині якої необхідно виміряти температуру. При підвищенні температури трубка 1 видовжується значно більше, ніж стержень 2, внаслідок чого штовхач 13 переміщується вниз.



1 – чутлива трубка; 2 – стержень; 3 – пробка; 4 – головка;
 5-8 – важільний передавальний механізм; 9 – вісь; 10 – стрілка;
 11 – шкала; 12 – ніпель; 13 – штовхач

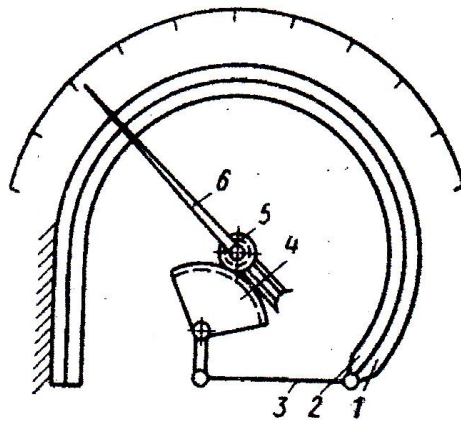
Рисунок 1.2 – Трубчатий дилатометричний термометр

Це переміщення системою важелів передається стрілці 10, яка вказує на шкалі 11 температуру.

В біметалевому термометра на відміну від дилатометричного термометра чутливим елементом є пружина, що складається з двох, спаяних по всій площині пластин, що мають істотно різні термічні коефіцієнти лінійного розширення. Зміна температури викликає різне лінійне видовження пластин. Оскільки пластини не можуть переміщуватись одна відносно одної, пружина прогинається в бік пластини, що має менший термічний коефіцієнт лінійного розширення. Чим більша різниця термічного коефіцієнта лінійного розширення пластин, тим

більший прогин пружини при зміні температури.

На рис. 1.3 показано будову біметалевого термометра з дугоподібною пластиною, яка виготовлена з двох пластин 1 і 2 із металів з різними коефіцієнтами лінійного розширення, приварених одна до другої по всій довжині.



- 1 – пластинка з малим коефіцієнтом температурного лінійного розширення;
2 – пластинка з великим коефіцієнтом температурного лінійного розширення;
3 – тяга; 4 – зубчатий сектор; 5 – зубчате колесо; 6 – стрілка

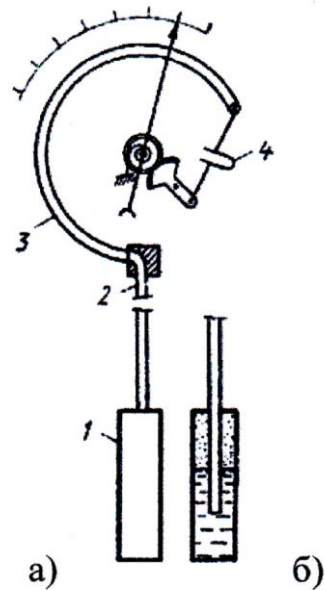
Рисунок 1.3 – Схема біметалевого термометра з дугоподібною пластиною

При підвищенні температури пластинка розгинається. Деформація пластинки при допомозі тяги 3, зубчатого сектора 4 і зубчатого колеса 5 передається стрілці 6. В якості чутливого елемента застосовують також плоскі і гвинтові спіралі. Діапазон вимірювання біметалевими термометрами становить від -150 до 700°C , при похибці $\pm(1... 1.5)\%$.

Манометричні термометри. Дія манометричних термометрів базується на використанні залежності між температурою і тиском робочої (термометричної) речовини в замкнутій герметичній термосистемі. У відповідності з агрегатним станом робочої речовини дані термометри поділяються на газові, рідинні і конденсаційні (паро-рідинні).

Термосистема манометра (рис. 1.4, а) складається з термобалону 1,

капіляру 2 і манометричної пружини 3.



1 – термобалон; 2 – капіляр; 3 – манометрична пружина;

4 – біметалева пластина

а – узагальнена конструкція; б – схема термобалону конденсаційного термометра

Рисунок 1.4 – Схема манометричного термометра

Термобалон занурюється в об'єкт вимірювання і речовина в термобалоні досягає температури вимірюваного середовища. При зміні температури робочої речовини в термобалоні змінюється тиск, який через капілярну трубку передається на пружинний манометр, що є вимірювальним приладом. Діаметр термобалону (циліндричної форми) знаходиться в межах 5-30 мм, а його довжина 60-500 мм. Довжина капіляра може бути від декількох сантиметрів до 60 м. Мідні капіляри мають сталеву захисну оболонку.

Газові манометричні термометри призначені для вимірювання температури від -150 до $+600^{\circ}\text{C}$ і в якості робочої речовини використовують гелій або азот. Принцип роботи базується на використанні закону Гей-Люсака

$$P_t = P_0 \cdot (1 + \beta \cdot t), \quad (1.4)$$

де P_0 і P_t – тиск газу при температурах 0 і $t^\circ\text{C}$, Па; β – термічний коефіцієнт тиску газу, $1/^\circ\text{C}$.

З виразу (1.4) можна отримати вираз для величини робочого тиску газового манометричного термометра

$$\Delta P = P_k - P_n = \frac{\beta \cdot (t_k - t_n)}{1 + \beta \cdot t_n}, \quad (1.5)$$

де P_n і P_k – тиски в термосистемі, які відповідають початковому t_n і кінцевому t_k значенню температури.

Для даних термометрів характерні великі розміри термобалону (для зменшення похибки від зміни температури оточуючого середовища) і внаслідок цього велика інерційність.

Рідинні манометричні термометри заповнюють пропиловим спиртом, толуолом, ксилолом, ртуттю та ін. Довжина з'єднувального капіляра 0,6-10 м. Вони дозволяють вимірювати температуру від -150 до $+300^\circ\text{C}$.

При зміні температури від початкової t_n до кінцевої t_k із термобалону V_m витісняється рідина об'ємом ΔV_m , що веде до зміни тиску ΔP в термосистемі:

$$\Delta V_m = V_m \cdot (\beta_p - 3 \cdot \alpha) \cdot (t_k - t_n), \quad (1.6)$$

де β_p – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини; α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу термобалону.

В цих термометрах вирішальну роль відіграє значення зміни об'єму манометричної частини ΔV_m при зміні робочого тиску рідини ΔP , тобто для пружин різної жорсткості має місце різний робочий тиск. Чим більша жорсткість пружини, тим більшим повинен бути робочий тиск для отримання необхідного значення ΔV_m . В силу значного тиску в системі, що оберігає рідину від закипання, похибка від зміни атмосферного тиску в даних термометрах відсутня.

Для рідинних манометрів слід враховувати похибку від зміни температури оточуючого середовища та похибку, викликану різним положенням термобалону відносно манометра по висоті. Оскільки рідина практично нестискувана, то зміна атмосферного тиску не впливає на покази приладу.

В конденсаційних термометрах термобалон, як правило, заповнюється на 2/3 об'єму низькокиплячою рідиною (пропаном, етиловим ефіром, ацетоном, толуолом, хлористим метилом і т.п.). В замкнутій системі термометра завжди існує динамічна рівновага одночасних процесів випаровування і конденсації. Капіляр в цих термометрах опущений в термобалон так, щоб його відкритий кінець знаходився в рідині в тому випадку, коли при максимальній температурі в термобалоні ще залишається рідина (рис. 1.4, б). Капіляр і манометрична пружина заповнюється висококиплячою рідиною для передачі тиску від термобалону до манометричної пружини. Діапазон вимірювання від: -50°C до 350°C .

Принцип роботи конденсаційних термометрів базується на залежності тиску P насиченої пари низькокиплячих рідин від температури T :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T \cdot (V_n - V_p)} \quad (1.7)$$

де L – теплота випаровування, V_n і V_p – питомі об'єми відповідно пари і рідини.

При підвищенні температури вимірюваного середовища посилюється випаровування рідини і збільшується пружність пари, посилюється також і процес конденсації. В результаті насичена пара досягає деякого певного тиску, що точно відповідає певній температурі. Ця залежність тиску від температури є однозначною, але нелінійною, тому шкала конденсаційного термометра, на відміну від газового і рідинного, є нерівномірною.

Зміна температури оточуючого середовища практично не впливає на покази термометра. Дані термометри є більш чутливі і мають меншу інерційність в порівнянні з іншими манометричними термометрами. Для них властива гідростатична похибка і похибка від зміни атмосферного тиску.

1.3 Термометри опору і термоелектричні термометри

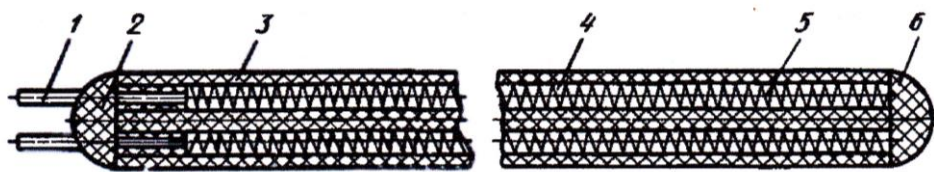
Термоперетворювачі опору. Термоперетворювачі опору застосовують для вимірювання температур в межах від -260 до $+750$ $^{\circ}\text{C}$. Робочим органом

термоперетворювача є чутливий елемент, виконаний з платинового або мідного дроту [2].

Чутливість термоперетворювача опору визначається температурним коефіцієнтом опору матеріалу, з якого він зроблений, тобто відносною зміною опору чутливого елемента термоперетворювача при нагріванні його на 1 °С.

Чутливий елемент платинових термометрів опору (рис. 1.5) є платиновою спіраллю 5 з тонкого дроту, поміщену в капілярну керамічну трубку 3, заповнену керамічним порошком 4, який одночасно ізолює і підтримує спіраль. З торців трубка щільно закрита пробками 2 і 6.

Така конструкція забезпечує велику надійність в умовах вібрації і високої температури. До кінців спіралі припаяні вивідні дроти 1. Чутливим елементом мідних термоперетворювачів опору є безкаркасна безіндуктивна котушка з ізольованого мідного дроту, покритого фторопластовою плівкою. З метою забезпечення механічної і віброударної міцності чутливий елемент поміщують в тонкостінний металевий чохол, в який насипають керамічний порошок, а його потім герметизують. В іншому конструктивне виконання мідних термоперетворювачів опору аналогічне як і в платинових термоперетворювачах опору.

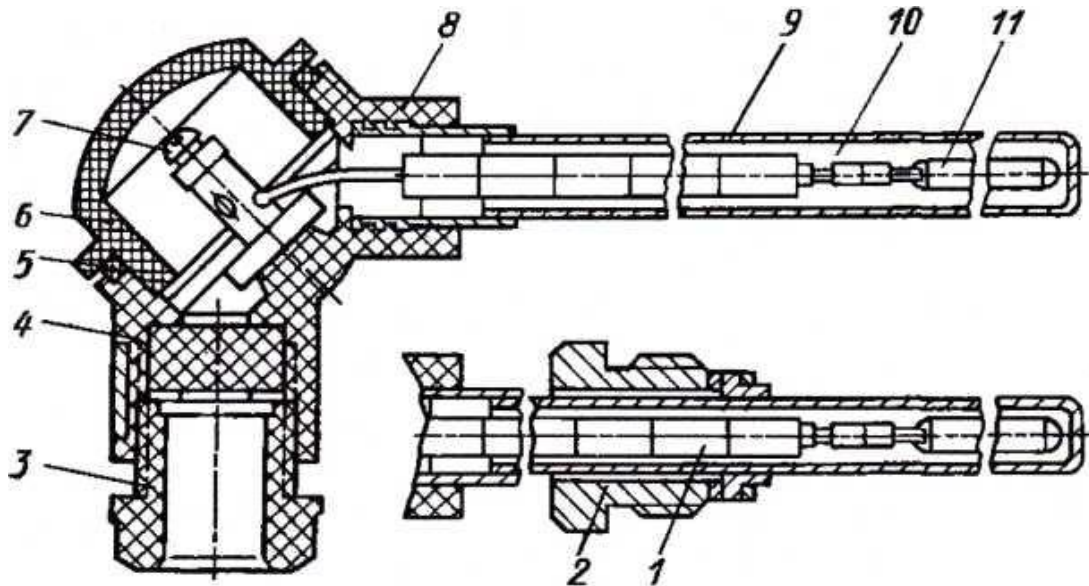


1 – вивідні дроти; 2 і 6 – пробки; 3 – капілярна керамічна трубка;
4 – керамічний порошок; 5 – платинова спіраль

Рисунок 1.5 – Чутливий елемент платинового термоперетворювача опору

Конструкція термоперетворювача опору показана на рис. 1.6. Зібраний чутливий елемент 11 поміщують в захисний чохол 9, який оберігає його від

механічних пошкоджень і агресивних дій вимірюваного середовища. Вивідні дроти чутливого елемента ізолюють фарфоровими ізоляторами 1 і приєднують до контактних клем 7, розташованих в головці 4 перетворювача, яку закривають кришкою 6 з прокладкою 5.



1 – фарфорові ізолятори; 2 і 3 – штуцери; 4 – головка; 5 – прокладка;
6 – кришка; 7 – контактні клеми; 8 – епоксидний компаунд;
9 – захисний чохол; 10 – окисел алюмінію; 11 – чутливий елемент

Рисунок 1.6 – Термоперетворювач опору

Герметизацію вихідних провідників чутливого елемента здійснюють за допомогою епоксидного компаунда 8. Вільний простір захисного чохла заповнюють окислом алюмінію 10.

Термоперетворювач опору може мати штуцери 2 і 3 кріплення місцю і для введення з'єднувальних проводів вимірювальних приладів.

Принцип дії термоперетворювачів опору базується на пропорційній зміні його електричного опору залежно від температури.

При вимірюванні температури термоперетворювач занурюють в середовище, температуру якого необхідно зміряти. Знаючи залежність опору

термоперетворювача від температури, можна по зміні опору судити про температуру середовища, в яке він поміщений.

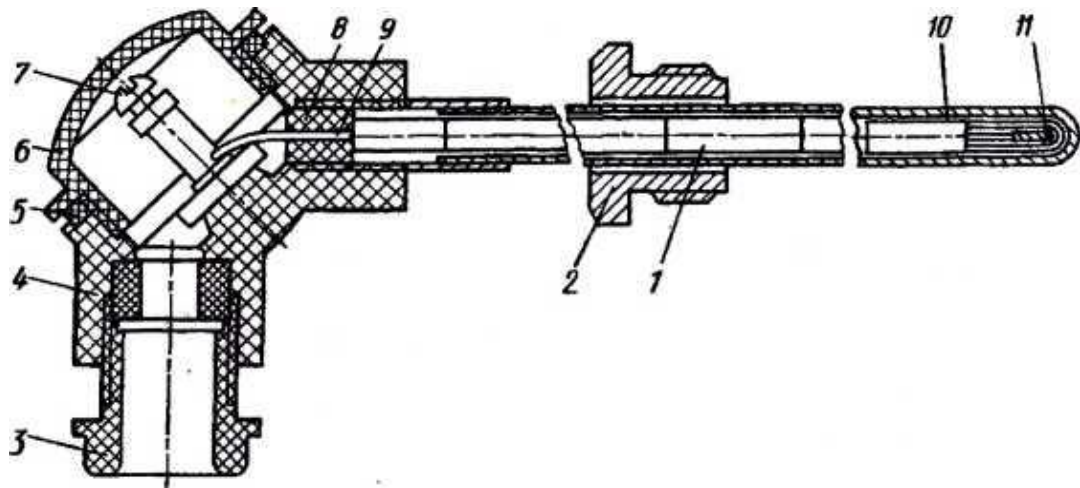
Перевагою дротяних термоперетворювачів опору є їх взаємозамінність, тобто можливість роботи з одним і тим же вимірювальним приладом, без підгонки шкали, з різними термоперетворювачами одного градування.

Взаємозамінність термоперетворювачів опору досягається тим, що їх виготовляють з металу однакової чистоти, що перевіряється вимірюванням співвідношення R_0 і R_{100} – опорів при температурі 0 і 100 °С.

До переваг термоперетворювачів опору [1] можна віднести: високу точність вимірювання температури; можливість здійснення автоматичного запису і дистанційної передачі показів, можливість централізації контролю температури шляхом приєднання взаємозамінних термоперетворювачів через перемикач до одного вимірювального приладу; можливість використання термоперетворювача опору з комп'ютерами.

Недоліками термоперетворювачів опору є: необхідність індивідуального джерела живлення; відносно великі розміри чутливого елемента; значна інерційність; складність пристрою вторинних приладів.

Термоелектричні перетворювачі [1]. Термоелектричні перетворювачі застосовують для вимірювання температури від -200 до +250°С. Робочим органом термоперетворювача (рис. 1.7) є чутливий елемент, що складається з двох різнорідних термоелектродів 9, зварених між собою на кінці 11, який є гарячим спаєм. Термоелектроди ізольовані по всій довжині за допомогою ізоляторів 1 і поміщені в захисну арматуру 10. Вільні кінці елемента підключені до контактів термоперетворювача 7, розташованих в головці 4, яка закривається кришкою 6, що має прокладку 5. Позитивний термоелектрод підключають до контакту із знаком "+". Герметизація введення термоелектродів 9 здійснюється за допомогою епоксидного компаунда 8.



- 1 – ізолятори; 2 і 3 – пшцири; 4 – голівка; 5 – прокладка; 6 – кришка;
 7 – контакти термоперетворювача; 8 – епоксидний компаунд;
 9 – різнорідні термоелектрони; 10 – захисна арматура;
 11 – місце зварки термоелектронів між собою

Рисунок 1.7 – Термоелектричний перетворювач

Принцип дії термоперетворювача базується на перетворенні теплової енергії в термо-електрорушійної сили (термо-ЕРС) елементу за наявності різниці температур між його вільними кінцями і гарячим спаєм.

Виникнення термо-ЕРС в термоперетворювачі пояснюється тим, що при його нагріванні виникає потік електронів від гарячого спаю до холодного. На холодному спаї створюється негативний потенціал, а на гарячому – позитивний. Різниця цих потенціалів визначатиме величину термо-ЕРС термоперетворювача.

Якщо температуру холодного спаю підтримувати постійною, то термо-ЕРС залежатиме тільки від ступеня нагріву робочого кінця термоперетворювача, що дозволяє від градувати вимірювальний прилад у відповідних одиницях температури. У разі відхилення температури вільних кінців від градувального значення, рівного 0°C , до показів вторинного приладу вводиться відповідна поправка.

Температуру вільних кінців враховують для того, щоб знати величину

поправки. Величина поправки, що вводиться, буде невеликою, і визначеною, якщо температура вільних кінців буде невисокою і постійною.

Величина термо-ЕРС в термоперетворювачі залежить не тільки від різниці температур гарячого і холодних спаїв, але і від матеріалу термоелектродів. Тому прагнуть застосовувати як електроди ті метали і сплави, у яких виникають порівняно великі ЕРС.

Так, щоб визначити вимірювану температуру середовища за допомогою термоелектричного перетворювача, необхідно виконати наступні операції: заміряти термо-ЕРС в ланці перетворювача; визначити температуру вільних кінців; у вимірювану величину термо-ЕРС ввести поправку на температуру вільних кінців; по відомій залежності термо-ЕРС від температури визначити вимірювану температуру середовища. Залежно від матеріалу термоелектродів термоперетворювачі розрізняють: з металевими термопарами з благородних і неблагородних металів і сплавів; з термопарами з тугоплавких металів і сплавів.

Термопари з благородних металів, володіючи стійкістю до високих температур і агресивних середовищ, а також постійній термо-ЕРС, широко використовують для вимірювання високих температур в промислових і лабораторних умовах.

Термопари з неблагородних металів і сплавів застосовують для вимірювання температур до 1000°C. Перевагою цих термопар є порівняно невелика вартість і здатність розвивати великі термо-ЕРС.

Градування термопари – визначення термо-ЕРС термопари від температури робочого кінця при постійному значенні температури вільних кінців (звичайно рівній 0 °C).

Термоелектроди з благородних металів виготовляють з дроту діаметром 0,3-0,5 мм, а з неблагородних – діаметром 1,2-3,2 мм. Діаметр термоелектродів вибирають, виходячи з призначення термопари, діапазону вимірювання температури і необхідної міцності.

1.4 Пірометри

Прилади, призначені для безконтактного вимірювання температури, називають пірометрами (від грецьк. πυρ – вогонь і metro – вимірюю). Принцип їх дії базується на використанні залежності потужності і спектрального складу інфрачервоного випромінювання від температури [3]. За допомогою пірометрів визначають температуру по випромінюванню конкретного об'єкту, тобто пірометр не вносить ніяких спотворень до температурного поля досліджуваного об'єкту. Пірометри, що працюють в діапазоні інфрачервоного випромінювання, як і пірометри, що працюють в діапазоні видимого випромінювання, можна застосовувати, коли випромінювання об'єкту є тепловим, тобто підкоряється закону Кірхгофа, що характерний для випромінювання твердих тіл і рідин.

Принцип дії пірометрів базується на прийомі інфрачервоного (теплого) випромінювання об'єктів і перетворенні його в електричний сигнал. Сигнал перетворювача поступає в підсилюючо-перетворюючий пристрій, вихід якого підключений до показуючих або реєструючих пристроїв, або пристроїв для автоматичного регулювання температури.

Залежно від способу використання спектру випромінювання пірометри поділяють на:

- квазімонохроматичні (так звані яскравісні);
- часткового випромінювання;
- повного випромінювання;
- пірометри спектрального відношення.

Пірометри випромінювання можна класифікувати за областю їх спектральної чутливості, методом вимірювання і конструктивним виконанням.

За методом вимірювання пірометри поділяють на два класи:

- енергетичні;
- спектрального відношення.

Принцип дії пірометрів першого класу базується на використанні

залежності енергетичної яскравості об'єкта від його температури, другого класу – залежності розподілу спектральної щільності енергетичної яскравості об'єкту від його температури. До другого класу відносять пірометри порівняння, що працюють по принципу порівняння візуального колірною сприйняття середнього забарвлення об'єкта, одержаного як результат змішування випромінювань в двох ділянках спектру з випромінюванням еталонного випромінювача, а також пірометри спектрального відношення.

Конструктивно пірометри поділяють за:

- типом перетворювачів випромінювання, що в них використовуються (термоелектричний, болометричний, фотоелектричний і ін.);
- типом оптичних систем (лінзовий, дзеркальний, діафрагмовий і ін.);
- способом порівняння випромінювання об'єкту з випромінюванням еталонного джерела (пірометр із зникаючою ниткою, з нейтральним клином і ін.).

Квазімонохроматичні пірометри. Це прилади, дія яких базується на використанні залежності спектральної щільності енергетичної (монохроматичної) яскравості об'єкту $B_{\lambda T}$ від його температури. Для реальних об'єктів із спектральним коефіцієнтом випромінювання [3]:

$$B_{\lambda T} = \frac{c_1 \epsilon_{\lambda T} \lambda^{-5}}{\pi} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1.8)$$

де c_1 – перша постійна випромінювання, $c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ Вт-м²; $\epsilon_{\lambda T}$ – спектральний коефіцієнт випромінювання; λ – довжина хвилі, м; c_2 – друга постійна випромінювання, $c_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2}$ м-К; T – абсолютна температура, К.

Оскільки такі пірометри градуують по випромінюванню абсолютно чорного тіла ($\epsilon_{\lambda T} = 1$), то для реальних об'єктів, що мають $\epsilon_{\lambda T} < 1$, покази приладів при вимірюванні дійсної температури виявляються заниженими і відповідають деякій умовній температурі. Зв'язок між дійсною температурою T і температурою T_B , виміряною пірометром, можна знайти, використовуючи

рівняння Планка для абсолютно чорного тіла і реального об'єкту:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_B} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda,T} + (1 - \varepsilon_{\lambda,T}) \cdot e^{-c_2/(\lambda T_B)}} \quad (1.9)$$

Квазімонохроматичні пірометри виконують за двома функціональним схемами [2]: безпосереднього вимірювання електричного сигналу на виході перетворювача та з урахуванням компенсації результату вимірювання.

У пірометрах, побудованих за першою схемою, випромінювання від об'єкту за допомогою оптичної системи спрямовується на перетворювач випромінювання, перед яким встановлений вузькосмуговий оптичний фільтр. Сигнал з виходу перетворювача, пропорційний монохроматичній температурі об'єкту, підсилюється і надходить на реєструючий прилад.

Пірометри, що використовують компенсаційний метод вимірювання, містять лампу розжарення, випромінювання якої через модулятор потрапляє на перетворювач випромінювання почергово з випромінюванням від досліджуваного об'єкту. З виходу перетворювача знімається сигнал, пропорційний різниці спектральної щільності енергетичних яскравостей лампи розжарення і об'єкту досліджень. Цей сигнал підсилюється і подається на схему керування, струмом лампи розжарення, яка змінює його так, щоб яскравості від об'єкту і лампи стали рівними. Сила струму, пропорційна монохроматичній яскравості об'єкту, реєструється індикаторним приладом пірометра. Перевага пірометрів цього виду – незалежність показів від параметрів схеми приладу. Проте конструктивно вони набагато складніші, ніж пірометри з безпосереднім вимірюванням сигналу. Крім того, щоб потік випромінювання, що надходить до перетворювача монохроматичного пірометра, не залежав від відстані до об'єкту і його розмірів, вимірювання слід проводити у вузькому діапазоні відстаней, який залежить від параметрів оптичної системи пірометра.

Приклад будови яскравісного пірометра показаний на рис. 1.8. Його робота базується на одночасному спостереженні за яскравістю свічення об'єкта контролю (ОК) в ІЧ діапазоні (при температурі до 600°C) чи види-мому діапазоні і еталонного джерела (звичайно прямої розжарюваної нитки). Змінюючи яскравість свічення нитки (рис. 1.8) шляхом регулювання струму і

порівнюючи через монохроматичний фільтр $\Phi 2$ яскравість нитки на фоні ОК, потрібно добитись пропадання частини зображення нитки з найвищою температурою. В цьому випадку температура ділянки нитки і ОК будуть однакові, що дозволяє за градуванням регулятора струму R розжарення знайти температуру ОК або за показниками реєструючого приладу P .

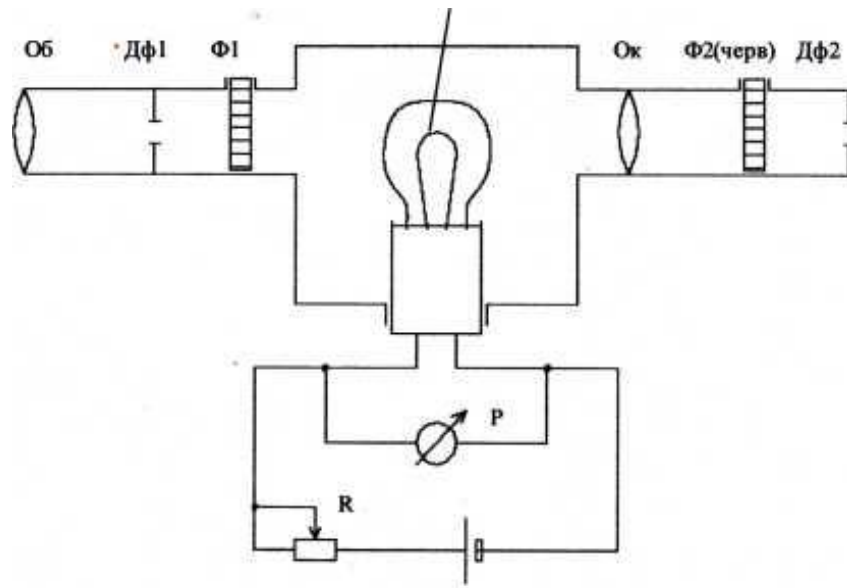


Рисунок 1.8 – Схема яскравісного пірометра

Рисунок 1.8 – Схема яскравісного пірометра

Оскільки нитку лампи можна нагрівати лише до температури 1400°C , то для вимірювання більш високих температур застосовують додаткові світлофільтри $\Phi 1$, які послаблюють інтенсивність випромінювання ОК.

В приладах з ручним зрівноважуванням момент співпадання визначається візуально, а в приладах з автоматичним зрівноважуванням – з допомогою фотоелемента.

Серійні яскравісні пірометри призначені для вимірювання температури від 700°C до 3000°C . Похибка вимірювання може не перевищувати $0,6-2\%$.

Пірометри часткового випромінювання. Принцип дії цих пірометрів

базується на використанні залежності енергетичної яскравості від температури в діапазоні довжин, хвиль від λ_1 до λ_2 , який визначається спектральною характеристикою перетворювача випромінювання, що використовується [3]. За допомогою таких пірометрів можна визначити дійсну температуру тільки для абсолютно чорного тіла. Заміряну температуру реальних тіл необхідно коректувати з урахуванням спектрального коефіцієнта випромінювання $\varepsilon_{\lambda,T}$ в заданому спектральному діапазоні $\lambda_1 \dots \lambda_2$. Для пірометрів часткового випромінювання залежність між замірною температурою T_B і дійсною температурою T об'єкту визначають експериментально – шляхом нейтрального ослаблення випромінювання чорного тіла.

Залежно від положення і ширини області спектру пірометр часткового випромінювання працює або як пірометр монохроматичного випромінювання, або як пірометр повного випромінювання.

Пірометри часткового випромінювання побудовані за принципом безпосереднього вимірювання сигналу на виході перетворювача випромінювання. Як перетворювачі випромінювання в них використовують фоторезистори і фотодіоди.

Пірометри повного випромінювання (радіаційний пірометр). У цих пірометрах використовують неселективні перетворювачі випромінювання, тому вони сприймають променистий потік в широкому діапазоні довжин хвиль. У зв'язку з цим принцип дії їх базується на залежності між температурою об'єкту і сумарною енергією, що ним випромінюється, яка для абсолютно чорного тіла визначається законом Стефана-Больцмана [3]:

$$E = \sigma \cdot T^4, \quad (1.10)$$

де E – енергія випромінювання, Дж; σ – хвильове число – величина обернена до довжини хвилі, m^{-1} ; T – температура, К.

Для реальних тіл з інтегральним коефіцієнтом випромінювання ε_T енергія визначається формулою:

$$E = \varepsilon_T \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (1.11)$$

За допомогою пірометрів повного випромінювання можна виміряти дійсну температуру лише абсолютно чорного тіла (АЧТ). При вимірюваннях температури реальних об'єктів з $\varepsilon_T \neq 1$ пірометр показує так звану температуру T_P повного випромінювання (радіаційну), занижену щодо дійсної температури T об'єкту.

Дійсна температура T виміряна цим пірометром рівна:

$$T = T_{\Pi} / \sqrt[4]{\varepsilon_T}, \quad (1.12)$$

де T_{Π} – температура абсолютно чорного тіла.

Інтегральний коефіцієнт випромінювання ε_T можна визначити простим методом, якщо пірометр повного випромінювання проградуєований по випромінюванню чорного тіла і відома дійсна температура об'єкту T . В цьому випадку:

$$\varepsilon_T = (T_{\Pi}/T)^4. \quad (1.13)$$

Радіаційні пірометри будують за різними функціональними схемами, спільними частинами яких є: об'єктив, приймач інфрачервоного випромінювання (ІЧВ), блоки вторинної обробки інформації, пристрій наведення, калібрувальний пристрій KII та блок живлення (рис. 1.9).

На перетворювач Pr почергово попадає інфрачервоне випромінювання (ІЧВ) від ОК і від еталонного джерела АЧТ. Якщо потік випромінювання від ОК такий же, як від каліброваного пристрою (еталонного джерела АЧТ), то на виході перетворювача Pr вихідний сигнал буде нульовим. При відмінності потоків випромінювання, які визначаються, в першу чергу, перепадом температур, на виході перетворювача появиться вихідний сигнал, який визначається різницею потоків теплового випромінювання.

Перетворювач Pr під'єднаний до електричної схеми (мостової, балансної і т.п.), в яку увімкнений коректор випромінювання, який дозволяє змінити коефіцієнт передачі залежно від коефіцієнта теплового випромінювання від ОК.

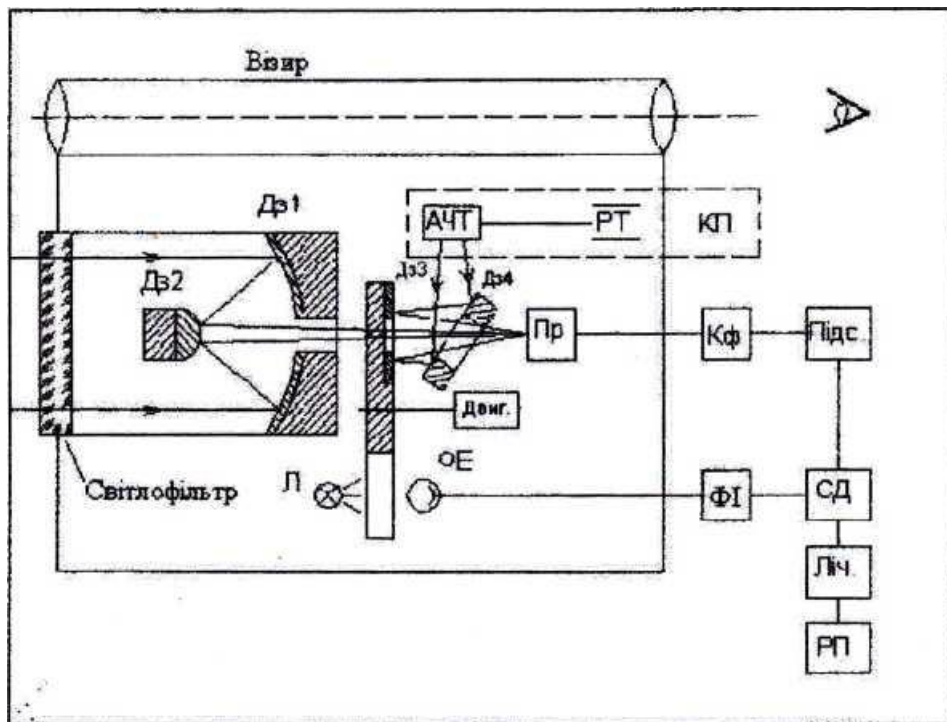


Рисунок 1.9 – Функціональна схема радіаційного пірометра з модуляцією потоку

Сигнал після коректора попадає на підсилювач, а потім на синхронний детектор СД, який потрібний для формування на виході постійної напруги відповідного знаку-в залежності від того, який з потоків випромінювання ОК чи АЧТ більший за значенням. Для нормальної роботи синхронного детектора необхідно подати на нього опорну напругу, яка характеризує положення диска модулятора і показує, який з потоків визначає в даний момент сигнал перетворювача. Цю роль виконують лампа Л, фотоелемент ФЕ, формувач імпульсів ФІ.

Так як потік теплового випромінювання нелінійно залежить від температури ОК, для одержання лінійної шкали встановлюють нелінійний коректуючий пристрій – лінеаризатор. Температуру ОК показує вимірювальний прилад (реєстратор).

Висока спрямованість об'єктива пірометра робить необхідним пристрій

візуального наведення, який має візир і окуляр.

Інколи для спрощення конструкції радіаційного пірометра і покращення його експлуатаційних властивостей вимикають систему модуляції, АЧТ та спрощують оптичну систему. Погіршення точності вимірювань (в 3-10 раз), компенсується зручністю роботи з портативним приладом.

Похибка вимірювання температури радіаційними пірометрами визначається наступними складовими:

- 1) нестабільністю його блоків;
- 2) похибкою, з якою відомий коефіцієнт теплового випромінювання;
- 3) впливом температури навколишнього середовища, фону і нагрітих предметів;
- 4) динамічними похибками від взаємного переміщення ОК, пірометра і інших предметів;
- 5) обмеженими розмірами ОК чи великим полем зору пірометра;
- 6) непостійністю температури на ОК і іншими другорядними причинами.

Як перетворювачі випромінювання в таких пірометрах використовують металеві або напівпровідникові болометри, термопари або термостовпчики, а також піроелектричні перетворювачі.

Пірометри спектрального відношення (кольорові пірометри). Принцип базується на використанні залежності від температури об'єкту відношення спектральної щільності B енергетичних яскравостей при двох (або більше) довжинах хвиль λ_1 і λ_2 :

$$f(T) = B_{\lambda_1}/B_{\lambda_2}. \quad (1.14)$$

Покази пірометрів спектрального відношення відповідають дійсній температурі T об'єкту, що має сіре випромінювання незалежно від випромінювальної здатності. Для не чорних або не сірих тіл зв'язок між дійсною і умовною температурою, що вимірюється пірометром спектрального відношення, можна визначити з рівняння

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_B} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{c_2} \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad (1.15)$$

або

$$T_B - T = a' T_B^2 / (1 + a' T_B), \quad (1.16)$$

де коефіцієнт чорноти ε_1 відповідає довжині хвилі λ_1 , а $\varepsilon_2 - \lambda_2$.

Для об'єктів, у яких $\varepsilon_{\lambda, T}$ збільшується при збільшенні довжини хвилі заміряна пірометром температура T_B спектрального відношення нижча дійсної. Якщо $\varepsilon_{\lambda, T}$ зменшується при збільшенні довжини хвилі, то температура T_B більша дійсної. Температура T_B більшості тіл значно менше відрізняється від дійсної, ніж температура часткового $T_{\text{ч}}$ або повного $T_{\text{п}}$ випромінювання. Крім того, поправки, необхідні для переходу від заміряної температури до дійсної, можна визначити з більшою точністю, оскільки відношення $\frac{\varepsilon_{\lambda, T}}{\varepsilon_{\lambda, T}}$ стабільніше, ніж $\varepsilon_{\lambda, T}$.

Залежно від того, чи використовується для кожної із спектральних яскравостей окремий приймач (фотоелемент, фотодіод) чи обидві яскравості діють на один і той же приймач почергово, пірометр виконується по одноканальній чи двоканальній схемі.

Кольорові пірометри звичайно використовуються при вимірюванні високих температур (1000-3000°C), де є інтенсивне випромінювання у видимому світлі. Але, підібравши відповідну оптику, фільтри і перетворювач, можна проводити вимірювання температур, починаючи з кімнатних в ІЧ діапазоні, але чутливість і стабільність апаратури в цьому випадку невеликі.

Перевагами кольорових пірометрів є незалежність показів від відстані до ОК, а також від поглинання радіації в середовищі між пірометром і ОК, якщо коефіцієнт поглинання є однаковим для обох довжин хвиль. Їх недоліком є відносна складність.

Прикладом кольорового пірометра може бути прилад типу ЦСП-3, який дає змогу вимірювати температуру в межах 1400°C-2800°C з похибкою до 1%.

коливається, забезпечуючи сканування по вертикалі і одержання кадру зображення. Коливання дзеркала 2 з частотою 16 Гц проводиться з допомогою двигуна ДК. Відбите від дзеркала 2 випромінювання попадає на одну з 4-ох граней дзеркальної призми Дз3, яка обертається двигуном ДР відносно вертикальної осі швидкістю 400 об/с. Дзеркальна призма Дз3 (4-х-гранна) забезпечує сканування по горизонталі, при чому за 4 оберти здійснюється цикл обзору в рядку, тому частота розгортай становить 1600 Гц. Далше ІЧВ збирається лінзовим об'єктивом Л1 і Л2 на охолоджуваний перетворювач П.

Для зміни напрямку ходу променів встановлено Дз4, завдяки якому випромінювання направляється знизу вгору на перетворювач П, охолоджуваний в холодильнику Х у вигляді посудини Д'юара рідким азотом. Перетворювач П підключений до балансно-підсилювального блоку БПБ, з допомогою якого відбувається настройка тепловізора по температурному діапазону і по чутливості до температури. Крім того балансно-підсилюючий блок БПБ проводить попереднє підсилення сигналу, що знижує вплив електромагнітних перешкод.

Основне підсилення сигналу, який несе інформацію про розподіл густини теплового потоку від ОК, здійснюється лінійним підсилювачем ЛП, вихідні сигнали з якого поступають на суматор Сум1. На другий вхід суматора Сум1 подається серія теплоподібних імпульсів від блока формування шкали температур БШТ, які дозволяють одержати, наприклад, в нижній частині растру, смугу, яскравість свічення якої відповідає лінійній зміні температури. Крім того для одержання складних синтезованих зображень на суматор можуть подаватись сигнали з інших блоків і пристроїв. Таким чином суматор Сум1 формує відеосигнал, який забезпечує одержання основного зображення з яскравісною відміткою, де найбільша густина потоку випромінювання відповідає найяскравішому свіченню екрану ЕПТ (позитивне зображення). Результуючий сигнал, який заповнює весь час кадру з виходу суматора Сум1 поступає на блок формування ізотерм БФУ і на суматор Сум2.

При аналізі негативного (оберненого) зображення сигнал з виходу

суматора Сум1 передається суматору Сум2 через інвертор Ін, який змінює знак вихідного сигналу суматора Сум1 на протилежний.

Блок формування ізотерм одержує від суматора 1 сигнал, який несе інформацію про розподіл температур (потіку теплоти), і при досягненні заданої температури створює імпульс, який викликає яскраве свічення екрану в точці і в момент часу, який відповідає цьому значенню. Вихідна напруга з блоку БФІз поступає на модулятор, збільшує струм трубки, що приводить до висвічування ліній постійної температури (потіку теплоти) ізотерми, як на зображенню, так і на ділянці екрану, яку займає смуга пікали температур. Всі сигнали, які повинні змінювати яскравість свічення екрану, поступають на суматор Сум2, а з його виходу результуюча напруга підводиться до підсилювача потужності ПП з виходу якого подається струм на модулятор ЕПТ, змінюючи яскравість.

Блок формування шкали температур БШТ генерує кілька наростаючих імпульсів, які мають період і тривалість рядкової розгортки, а закон, їх наростання вибраний так, щоб відповідати лінійній зміні температури. Завдяки роботі блоку БШТ по яскравості свічення екрану можна проводити порівняння температури ділянки ОК з опорними значеннями шкали температур. Формування напруг для переміщення променя на екрані ЕПТ проводить генератор рядкової розгортки ГР. Синхронізація генераторів кадрової і рядкової розгорток здійснюється від формувачів запускаючих імпульсів кадрової (ФК) і рядкової (ФР) розгорток відповідно, які зв'язані з відповідними двигунами сканування.

Крім одержання видимого зображення теплового поля тепловізор дає можливість визначити температуру в заданому напрямі в просторі. Найпростішим способом є порівняння яскравості свічення екрану в контрольованому місці із свіченням шкали температур, і за положенням точки рівної яскравості на шкалі знаходиться температура.

У всіх випадках температура визначається вірно тільки для ОК, близьких за властивостями до АЧТ, інакше необхідно ввести корективи по відповідних

методиках.

1.6 Постановка задачі на магістерську роботу

Методи теплового неруйнівного контролю (НК) найчастіше зв'язані із зміною температури в певній області об'єкта контролю (ОК) чи зміною випромінюваного з його поверхні теплового потоку, який зв'язаний з температурою. Якщо якість ОК може бути оцінена шляхом вимірювання цих величин чи їх приростів в одній чи в кількох невеликих областях, розв'язати таку контрольну вимірювальну задачу можна з допомогою приладів чи пристроїв точкового контролю, що безпосередньо вимірюють температуру.

У випадку вимірювання температури з метою ТНК контактними методами (термометри розширення, термопари, термоопори) їм слід віддати перевагу, тому що вони забезпечують, як правило, вищу точність вимірювання, а, значить, і вищу достовірність контролю. Але контактні методи мають недоліки із-за великого впливу якості теплового контакту між перетворювачем і ОК, який не завжди можна забезпечити (погіршують тепловий контакт шорсткість, забруднення поверхні, окисли). Внаслідок непостійного контакту (теплового опору) сигнал від первинного вимірювального перетворювача буде сильно змінюватись при проведенні ТНК навіть в межах одного ОК, що різко знижує точність вимірювання температури і достовірність НК, незважаючи на високу точність самого вимірювача температури. Окрім того, діапазон застосування контактних методів обмежується тим, що вони є незручними і неоперативними, вимірюють температуру в точці, а також тим, що іноді контакт з ОК взагалі небажаний.

Оптичний метод непрямого визначення температури поверхні, що випромінює має широке розповсюдження в промисловості і науковій практиці. Основна перевага методу полягає в можливості безконтактного контролю температури в будь-якій точці поверхні. Суть методу зводиться до порівняння відносних значень щільності спектральної яскравості випромінювання поверхні і

еталонного джерела в одному або декількох ділянках спектру. Оскільки залежність яскравості випромінювання еталону від його температури відома, то визначення температури випромінюючої поверхні виконується простим розрахунком.

Точність методу оптичної пірометрії визначається якістю еталону, випромінювальними властивостями поверхні (зокрема від степені чорноти або по іншому коефіцієнта випромінювання який напряму зв'язаний з кольором, шорсткістю, механічним станом, хімічним складом поверхні) і чутливістю реєструючого пристрою. Остання обставина обмежує можливості методу для слабо випромінюючих поверхонь.

Отже, постала необхідність знайти такий метод який би дозволив абстрагуватися від стану контрольованої поверхні. Тому в якості методу контролю температури був обраний метод з використанням спектральних приладів високої світлосили.

До таких приладів належать інтерференційні фур'є-спектрометри [4], світлосила яких в 100-200 разів вища, ніж у спектральних приладів з призмами і дифракційними ґратками.

При низьких значеннях ефективної температури яскравості випромінюючих поверхонь (200-400 К) їх випромінювання зосереджено в інфрачервоній області спектру. У фур'є-спектрометрах саме для цієї області спектру досягається вдале поєднання одночасності реєстрації всіх спектральних елементів, великої світлосили і широких можливостей швидкої математичної обробки інформації. Це дозволяє створити мобільну апаратуру малих габаритів з високими вихідними параметрами - роздільною здатністю, швидкістю реєстрації, фотометричною і хвильовою точністю.

За останні роки цікавість до інфрачервоної спектрометрії низькотемпературних джерел значно зросла. Це пов'язано з можливістю використання її в швидкісних методах технологічного контролю процесів виробництва і в методах дистанційного зондування для досліджень природних

ресурсів з літаків-і супутників. Фур'є-спектрометри є найбільш придатними приладами для цих цілей, оскільки дозволяють набувати значень ефективної температури яскравості з достатньо високою точністю (1-2%) в широкій ділянці спектру при малому часі вимірювання і обробки сигналу (декілька секунд).

При проведенні наукових досліджень була сформульована задача: як вимірявши температуру зовнішньої стінки будівлі визначити температуру всередині приміщення і на основі цього зробити висновок про кількість використаної енергії мешканцем будинку. Тобто для реалізації цього завдання необхідний прилад для безконтактного і точного контролю температури.

Отже, постановка задачі на магістерську роботу полягає в наступному:

- теоретично обґрунтувати вибраний метод контролю теплотехнічного стану комунальних об'єктів;
- розробити математичну модель передачі тепла через стінку будівель і споруд;
- провести аналіз методів вимірювання температури поверхонь об'єктів, розкрити їхні переваги і недоліки;
- розробити схему та конструкцію системи контролю, пристрою для контролю температури стінки будівель безконтактним методом;
- розробити математичну модель перетворення апаратної функції фур'є-спектрометра в спектр;
- провести метрологічний аналіз контролю;
- зробити висновок по проведеній роботі.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ОБ'ЄКТІВ В КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВІЙ СФЕРІ

Для сформульованої, в першому розділі задачі, обліку енергоресурсів потрібно скласти математичну модель залежності зовнішньої температури стінки від певних чинників, таких як зовнішні метеорологічні умови, властивості будівлі, внутрішні джерела, які можуть впливати на температуру всередині приміщення.

2.1 Математична модель теплового балансу приміщення

Теплопередача – це процес перенесення теплоти усередині тіла або від одного тіла до іншого, обумовлений різницею температур [5]. Інтенсивність перенесення теплоти залежить від властивостей речовини, різниці температур і підкоряється експериментально встановленим законам природи. Щоб аналізувати процеси які впливають на теплообмін приміщення потрібно знати принципи теплопередачі.

Теплові баланси. При розрахунку теплових балансів необхідно знати питомі величини теплоємності, теплоти фазових або хімічних перетворень.

Питома теплоємність – це кількість тепла, необхідна для нагрівання (або охолодження) 1 кг речовини на 1 градус (Дж/кг град). Теплоємність характеризує здатність тіла акумулювати тепло. Оскільки теплоємність залежить від температури, то розрізняють дійсну теплоємність при даній температурі з і середню теплоємність в деякому інтервалі температур

$$\bar{c} = Q / (t_2 - t_1), \quad (2.1)$$

де Q – кількість тепла, що надається одиниці кількості речовини при зміні

температури від t_1 до t_2 . В практиці теплових розрахунків, як правило, доводиться користуватися середніми теплоємкостями.

Кінетика теплопередачі. Розрізняють три види (механізму) теплопередачі [6]: теплопровідність, конвекція і випромінювання.

Передача тепла теплопровідністю. Під теплопровідністю розуміють перехід теплової енергії в середовищі без масових її рухів відносно напрямку теплопереходу. Тут тепло передається як енергія пружних коливань атомів і молекул біля їх середнього положення. Ця енергія переходить до сусідніх атомів і молекул у напрямі її зменшення, тобто зменшення температури. Отже, якщо всередині тіла є різниця температур, то тепла енергія переходить від більш гарячої його частини до холоднішої.

Закон Фур'є. Передача тепла теплопровідністю описується законом Фур'є [5], згідно якому кількість тепла dQ_τ , що проходить за час $d\tau$ через поверхню dF , нормальну до напрямку теплопереходу, рівна:

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{dt}{dx} dF d\tau, \quad (2.2)$$

де dQ_τ – кількість тепла, Вт-м; λ – коефіцієнт пропорційності, так званий коефіцієнт теплопровідності або теплопровідність, Вт/(м-град); $\frac{dt}{dx}$ – градієнт температури, °С/м тобто зміна температури на одиницю довжини у напрямі теплопередачі; F – площа поперечного перерізу, м².

Або закон теплопровідності Фур'є можна записати так, що інтенсивність теплопередачі за рахунок теплопровідності рівна:

$$q = -\lambda F \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (2.3)$$

де q – тепловий потік, Вт.

Знак мінус в ньому вказує на те, що теплота передається в напрямі, зворотному градієнту температури.

Коефіцієнт теплопровідності. Він визначає швидкість передачі тепла, тобто кількість тепла, що проходить за одиницю часу через одиницю поверхні

тіла при довжині його в напрямку теплопередачі, рівної одиниці і різниці температур 1 градус. Найбільше значення λ мають метали – від декількох десятків до декількох сотень Вт/(м-град). Значно менші коефіцієнти теплопровідності мають тверді тіла – не метали. Теплопровідність рідин менша теплопровідності більшості твердих тіл. Для них λ коливається в межах десятих доль Вт/(м-град).

Передача тепла теплопровідністю через стінку. Кількість тепла що передається за 1 годину через плоску стіну можна підрахувати за рівнянням Фур'є як кількість тепла, що проходить через площину нескінченно малої товщини dx всередині стінки:

$$\frac{dQ_{\tau}}{d\tau} = -\lambda \frac{dt}{dx} F. \quad (2.4)$$

Проінтегрувавши зміну температури по всій товщині стінки одержимо:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (t_{cm1} - t_{cm2}), \quad (2.5)$$

де δ – товщина стінки, м; t_{cm1} і t_{cm2} – температури протилежних сторін стінки, °С.

З інтегрального виразу видно, що температура t усередині плоскої стінки падає по товщині стінки δ у напрямі теплопереходу за законом прямої лінії.

Конвекційна теплопередача – це перенесення тепла об'ємами середовища шляхом взаємного їх переміщення у напрямку теплопередачі. Кількість тепла, що передається визначається законом Ньютона [6]:

$$Q = \alpha F (t_1 - t_{cm}), \quad (2.6)$$

де α – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²-град).

Передача тепла від одного плинного середовища до протилежної сторони стінки. Передача тепла від одного середовища до іншого складається з двох стадій.

Тепловий потік від першого середовища до стінки:

$$Q = \alpha F (t_1 - t_{cm1}), \quad (2.7)$$

через стінку:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (t_{cm1} - t_{cm2}), \quad (2.8)$$

Сумісне розв'язування рівнянь (2.7, 2.8) дає:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}} F (t_1 - t_{cm2}) = KF (t_1 - t_{cm2}). \quad (2.9)$$

У рівнянні (2.9) величина K називається коефіцієнтом теплопередачі, має розмірність Вт/(м²град):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}}, \quad (2.10)$$

Для розв'язку поставленої задачі була розроблена математична модель теплового балансу приміщення. Для її реалізації необхідно врахувати багато чинників.

Стан повітряного середовища в приміщеннях визначається сукупністю тепло-вологого і повітряного режимів приміщення [7], [8]. Тобто на тепловий режим будівлі впливають параметри і процеси, що визначають теплову обстановку в приміщеннях. Серед цих чинників: температура, рухливість і вологість повітря, наявності струминевих течій, відмінності параметрів повітря в плані і по висоті приміщення, променисті теплові потоки, що залежать від температури, розміри, радіаційні властивості поверхні і їх розташування (рис. 2.1).

Повітряний режим будівлі є процесами повітрообміну між приміщеннями і зовнішнім повітрям, що включають переміщення повітря всередині приміщень, рух повітря через ізолюючі елементи (стіни, стелю, підлоги), отвори (щілини в дверях, вікнах, та ін.), повітропроводи і обтікання будівлі потоком повітря.

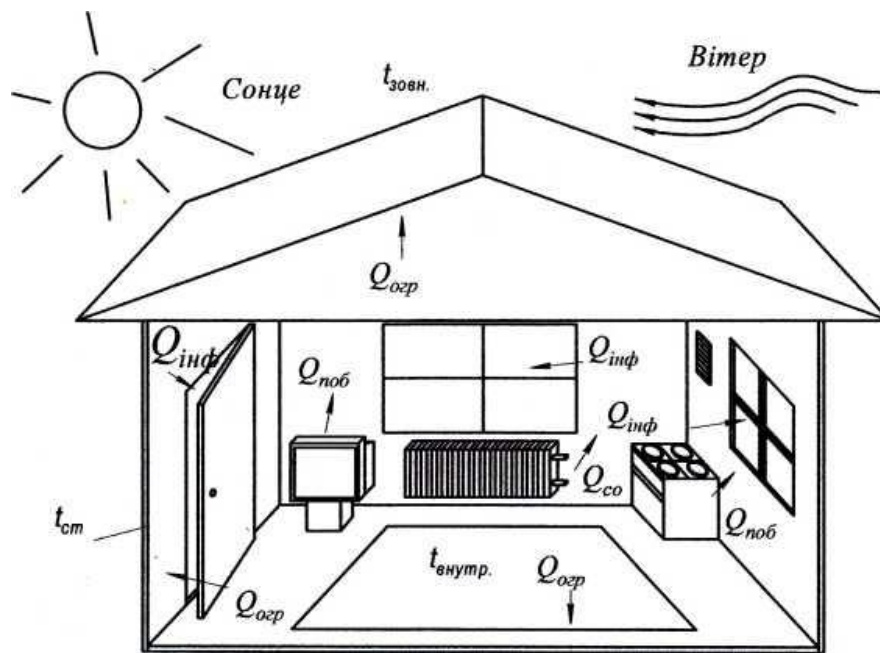


Рисунок 2.1 – Чинники, які впливають на тепловий баланс приміщення

Для забезпечення необхідних внутрішніх умов в приміщенні служать системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря [8].

Тепловий баланс приміщення [5], [9]. Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q_{ie} + Q_{инф} = Q_{поб} + Q_{со} \quad (2.11)$$

де Q_{ie} – тепловтрати через ізолюючі елементи чи захисні конструкції, Вт; $Q_{инф}$ – тепловтрати на нагрівання інфільтруючого повітря, що надходить через вікна, двері, щілини, Вт; $Q_{поб}$ – теплонадходження від побутових джерел, Вт; $Q_{со}$ – теплова потужність системи опалення, Вт.

З лівої сторони рівняння знаходяться тепловтрати, з правої – теплонадходження.

Таким чином температуру стінки приміщення і обрахувавши $Q_{инф}$, $Q_{поб}$, Q_{ie} з даної математичної моделі можна визначити теплову потужність системи опалення.

Використовуючи формулу [10]:

$$Q_{co} = Q_G \cdot H, \quad (2.12)$$

де Q_G – витрата газу; H – теплотворна здатність газу.

Можна визначити кількість реально спожитого газу для обігріву приміщення і порівняти з кількістю газу який був облікований.

Тепловтрати через ізолюючі елементи [5], Вт, визначаються за наступною формулою:

$$Q_{ie} = Fnk \cdot (t_E - t_{cm}) \cdot (1 + \sum \beta), \quad (2.13)$$

де: F – площа ізолюючих елементів, м²; n – коефіцієнт, що враховує положення зовнішніх ізолюючих елементів стосовно зовнішнього повітря; k – коефіцієнт теплопередачі ізолюючих елементів, Вт/м²°С; t_E – температура внутрішнього повітря, °С; t_{cm} – температура зовнішньої стінки, °С; $\sum \beta$ – додаткові втрати тепла;

$$\sum \beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5, \quad (2.14)$$

де: β_1 – додаткові втрати тепла стосовно сторін світу (для сторін світу – північ, схід, північний схід, північний захід, він рівний 0,1; для – заходу, південного сходу рівний 0,05, для – півдня і південного заходу 0); β_2 – додаткові втрати тепла на продування приміщень з двома і більше зовнішніми стінами. У житлових приміщеннях t_E збільшується на 2°С, в решти приміщень добавка приймається рівною 5% ($t_E = 0,05$); β_3 – додаткові втрати тепла на розрахункову температуру зовнішнього повітря. Приймається для підлоги першого поверху, що не обігрівається, над холодними перекриттями при $t_H = -40^\circ\text{C}$ і нижче у розмірі 5%; β_4 – додаткові втрати тепла на підігрів холодного повітря, що надходить, через зовнішні двері, що не обігріваються повітряно-тепловими завісами; β_5 – добавка на висоту приміщення. Приймається на кожен наступний метр понад 4-й метри у розмірі 2%, але не більше 15%.

Втрати теплоти на нагрівання інфільтрованого повітря в приміщеннях в

житлових і громадських будівлях при природній витяжній вентиляції, не компенсованого підігрітим припливним повітрям, визначається за формулою:

$$Q_{\text{инф}} = 0,28 \cdot L \cdot \rho \cdot c (t_{\text{в}} - t_{\text{з}}) \cdot k \quad (2.15)$$

де: L – об’ємна витрата повітря, що видаляється, некомпенсованого підігрітим припливним повітрям. $L = 3 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2$ для житлових приміщень; ρ – густина повітря в приміщенні, $\text{кг}/\text{м}^3$, визначається за формулою:

$$\rho = \frac{353}{273 + t_{\text{в}}} \quad (2.16)$$

c – питома теплоємність повітря ($c = 1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$); k – коефіцієнт обліку впливу зустрічного теплового потоку в конструкціях, рівний 0,7 для стиків панелей стін і вікон з потрійними пакетами, 0,8 – для вікон і балконних дверей з роздільними пакетами; і 1,0 – для одинарних вікон, вікон і балконних дверей із спареними пакетами і відкритих отворів; $t_{\text{з}}$ – температура зовнішнього повітря, $^\circ\text{C}$.

Для житлових будівель облік теплового потоку що поступає в кімнати і кухні у вигляді побутових тепловиділень проводиться в кількості 10 Вт на 1 м^2 площі підлоги, Вт:

$$Q_{\text{поб}} = 10 \cdot F_{\text{п}} \quad (2.17)$$

де: $F_{\text{п}}$ – площа підлоги опалюваного приміщення, м^2 .

Після обґрунтування математичної моделі теплопередачі будівлі постало питання – чим же вимірювати температуру зовнішньої стінки будівлі? Після детального вивчення різних методів і приладів вимірювання температури був обраний спектральний прилад – фур’є-спектрометр.

Основними перевагами цього приладу є те, що він є оперативний, безконтактний, високоточний, оскільки працює в широкому спектрі частот, і дозволяє абстрагуватися від стану контрольованої поверхні, тобто його покази не залежать від випромінювальних властивостей поверхні (зокрема від ступеня чорноти або по іншому коефіцієнта випромінювання який напряму зв’язаний з кольором, шорсткістю, механічним станом, хімічним складом поверхні).

2.2 Теоретичні основи методу фур'є спектроскопії

Суть методу фур'є спектроскопії зводиться до частотної модуляції всіх спектральних компонентів джерела випромінювання, при якій спектр оптичних частот випромінювання перетворюється в спектр діапазону радіочастот в сигналі на виході приймача випромінювання [4]. Це перетворення здійснюється в двопроменевому спектральному інтерферометрі Майкельсона. В ньому кожен хвилевий пакет світла ділиться по амплітуді на два хвилеві пакети, які після введення між ними різниці ходу зводяться разом. Проте систематичне практичне застосування цієї можливості затримувалося до появи сучасних обчислювальних машин.

При рівномірному переміщенні із швидкістю v одного з дзеркал і на виході приймача випромінювання виникає електричний сигнал частотою f , пов'язаний з оптичною частотою ν співвідношенням:

$$f = 2 \frac{v}{c} \nu = 2 \pi \sigma, \quad (2.18)$$

де c – швидкість світла, $c = 299792458$ м/с; σ – хвильове число частоти ν .

Схема, що використовується в деяких типах сучасних фур'є спектроскопів [11], показана на рис. 2.2. Вона на відміну від типового інтерферометра Майкельсона має деяку особливість: світло від джерела Д зводиться в пучок (колімується) об'єктивом О до поділу амплітуд подільником пучка ПП. Це варіант Тваймана-Гріна для інтерферометра Майкельсона. Колімування дозволяє зробити весь поперечний переріз поля освітленості в приладі відповідним осьовому ($\theta = 0$) напрямку. Тому кільцеві смуги відсутні і все поле має рівномірну яскравість.

В схемі є рухоме дзеркало ДР і нерухоме дзеркало ДН. Зміна інтенсивності, що виникає при переміщенні рухомого дзеркала ДР вимірюється за допомогою показаної на малюнку системи колімуючого дзеркала ДК і детектора ДВ.

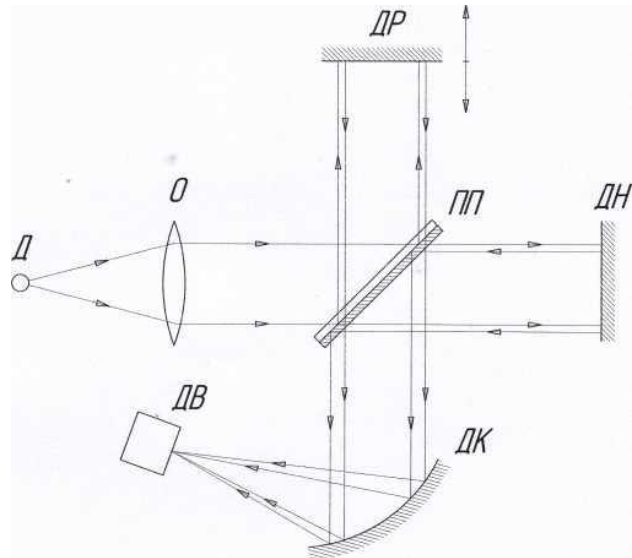


Рисунок 2.2 – Принципова схема двохпроменевого інтерферометра Майкельсона

Таким чином, якщо розглядати гіпотетичний випадок монохроматичного світла детектор повинен реєструвати синусоїдальний характер зміни інтенсивності випромінювання. Якщо хвильове число рівне σ_1 і складові пучки мають рівні амплітуди A_1 , то інтенсивність залежно від відстані на яку переміщується дзеркало (l) обчислюється за формулою:

$$I_{\sigma_1} = 4 A_1^2 \cos^2 (\pi \sigma_1 l), \quad (2.19)$$

де A_1 – амплітуда пучка; σ_1 – хвильове число, м^{-1} ; l – відстані на яку переміщується рухоме дзеркало, $l = 2h$, м;

Цей вираз можна переписати у вигляді:

$$I_{\sigma_1} (l) = 2 A_1^2 (1 + \cos(2\pi \sigma_1 l)) \quad (2.20)$$

Таким чином, зміряна детектором інтенсивність потоку із спектральним розподілом $B(\sigma)$ визначається без урахування числового множника виразом:

$$I(l) = \int_0^{\infty} B(\sigma) (1 + \cos(2\pi \sigma l)) d\sigma. \quad (2.21)$$

Цей інтеграл можна записати у вигляді

$$I(l) = \int_0^{\infty} B(\sigma) d\sigma + \int_0^{\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma l) d\sigma. \quad (2.22)$$

Коли два дзеркала знаходяться на рівній оптичній відстані від подільника пучка, то $l = 0$ і $I(l) = I(0) = 2 \int_0^{\infty} B(\sigma) d\sigma$. Тому ми маємо:

$$I(l) - \frac{1}{2}I(0) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma l) d\sigma. \quad (2.23)$$

Це вираз для косинусного перетворення Фур'є, і ми можемо записати:

$$B(\sigma) = \int_0^{\infty} \left[I(l) - \frac{1}{2}I(0) \right] \cos(2\pi\sigma l) dl. \quad (2.24)$$

Це рівняння називається основним рівнянням фур'є-спектроскопії. Воно дає можливість обчислити для кожного конкретного σ інтенсивність спектру $B(\sigma)$ шляхом інтегрування виразу в правій частині.

Подивимося, що сюди входить. Величина $I(l)$ є інтенсивністю вимірюваною як функція від l . Зображена графічно, вона називається інтерферограмою. Її приклад показаний на рис. 2.3 (вважатимемо, що є і від'ємні значення l).

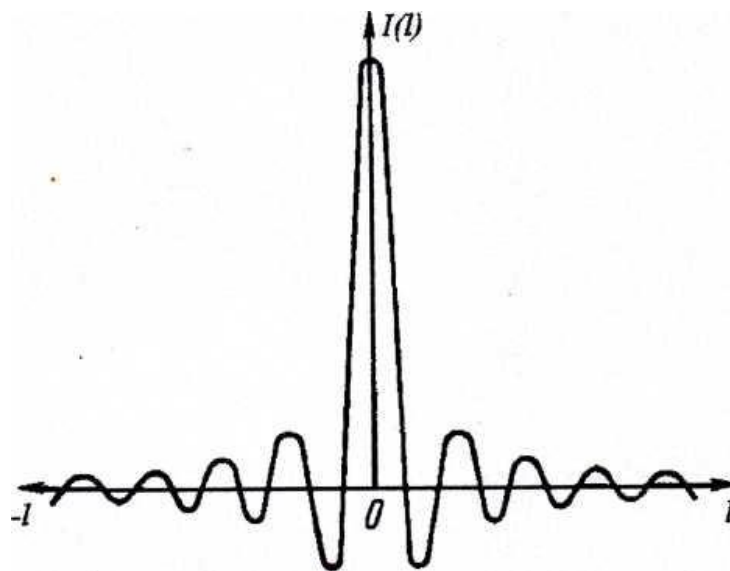


Рисунок 2.3 – Типова інтерферограма – сигнал на виході фур'є-спектрометра

При реєстрації випромінювання джерела з широким спектром $B(l)$ інтерферограма формується як суперпозиція великого числа косинусоїд з єдиним центром симетрії при $l = 0$. Внаслідок цього інтерферограма має характерний вид центрального максимуму при $l = 0$ і протяжних бічних крилах.

Далі, в будь-якій інтерферограмі при $l = 0$ відсутня яка-небудь різниця ходу між хвильовими фронтами які сумуються, амплітуди додаються і одержуємо:

$$I = I(0) = \sum (2A)^2 = 4 \sum A^2 \quad (2.25)$$

З іншого боку, при великих l , коли інтерференції вже більше не відбувається (тобто перевищує довжину когерентності для випромінювання), то додаються окремі інтенсивності, що дає:

$$2 \sum A^2 = \frac{I(0)}{2} \quad (2.26)$$

Для випромінювання з такими властивостями з рис. 2.3, витікає, що кривій видності відповідатиме залежність:

$$B(\sigma) = \frac{[I(l) - \frac{1}{2}I(0)]}{\frac{1}{2}I(0)} \quad (2.27)$$

Тому ми можемо сказати, що рівняння (2.24) зв'язує $B(\sigma)$ з перетворенням Фур'є від кривої видності, одержаної з інтерферограми.

Відмітимо, що обчислення $B(\sigma)$ в рівнянні (2.24) для кожного конкретного хвильового числа, наприклад σ_1 , зводиться до множення всієї кривої $[I(l) - \frac{1}{2}I(0)]$, тобто обчислення площі під кривою виразу дає конкретне значення $B(\sigma_1)$.

Експериментальні вимірювання для від'ємних значень l виконати так само легко, як для додатніх, хоча інтерферограма і повинна бути симетричною. Якщо з якої-небудь причини вона не виявляється симетричною, то косинусне перетворення Фур'є використовувати не можна, оскільки воно явно припускає, що $I(l)$ парна функція.

Щодо рівняння (2.24) слід відмітити, що в ньому передбачається можливість точного визначення положення з $l = 0$, а також можливість інтегрування від $l = 0$ до $l = \infty$. Першу з цих умов здійснити важко, а другу взагалі неможливо (рис. 2.3). Складніші методи, згадані вище, звичайно, допомагають подолати першу трудність, а математична аподизація використовується як засіб мінімізації помилок, обумовлених невідповідністю меж в інтегруванні фур'є-перетворення. Проте роздільна здатність приладу, хоч і обмежена, може бути дуже великою, оскільки вона визначається по суті експериментально досяжною верхньою межею l .

Інтерпретацію суті методу можна також описати на мові автокореляції. Ми тільки що відзначили, що введення різниці ходу l приводить до часової затримки – затримки між моментами приходу хвильових цугів, які зводяться разом для інтерференції. Це повністю відповідає суті автокореляції, оскільки кожна пара хвильових цугів до приходу на подільник пучка відноситься до одного хвильового цугу і по суті кожен первинний хвильовий цуг порівнюється сам з собою із зсувом по довжині. Часова затримка τ , рівна $\frac{l}{c}$, де c – швидкість світла. Тому амплітуди кожної пари складових хвильових цугів можуть бути записані як $A(t)$ і $A(t + \tau)$. Тоді при кожному значенні l вимірюється не що інше, як $\langle A(t) A(t + \tau) \rangle$. Це автокореляційна функція для світла і її перетворення Фур'є рівне спектру потужності випромінювання $|F(\nu)|^2$ (теорема Вінера-Хінчина).

Повернемося до вимірювання l . Зміна l досягається при переміщенні дзеркала, і механічна точність, з якою його можна контролювати, ставить межу точності приладу в цілому. В результаті даний метод може застосовуватися головним чином для роботи на довгих хвилях і широко використовувався впродовж багатьох років в інфрачервоній області. Проте в даний час завдяки усесторонньому технічному вдосконаленню область довжин хвиль розширена у видимий і навіть ультрафіолетовий діапазони.

Форма апаратної функції відповідає за точність вимірювання [4]. Зміна

форми апаратної функції здійснюється не тільки за допомогою математичних перетворень, але і за рахунок фізичних параметрів самого приладу. Тілесний кут поля зору реального приладу Ω відмінний від нуля, тому на інтерференційну картину впливають краєві промені, зменшуючи її контрастність при великих різницях ходу, що приводить до самоаподизації інтерферограми. Оптимальний тілесний кут визначається максимумом добутку інтенсивності в центрі апаратної функції на відносне зниження роздільної сили:

$$\Omega_{\text{опт}} R_0 = 1,4 \cdot 2\pi, \quad (2.28)$$

де R_0 – теоретична роздільна сила при $\Omega = 0$, що визначається значенням мінімального граничного роздільного інтервалу (теоретична межа роздільної здатності), яка в свою чергу визначається з як півширина апаратної функції:

$$(\Delta\sigma)_0 = \frac{1}{2l_{\text{max}}}. \quad (2.29)$$

Реальна роздільна сила при цьому складає $\approx 0,9R_0$. При $\Omega \approx 1,5\Omega_{\text{опт}}$ самоаподизація практично еквівалентна трикутній аподизації в першій степені [4]. Таким чином, при роботі з великим отвором є можливість збільшення відношення сигнал/шум одночасно із згладженням апаратної функції. Проте це не завжди можна досягти при реєстрації спектру в широкій області із-за зміни значення R_0 .

Дисперсія оптичних матеріалів інтерферометра, похибки виготовлення оптичних поверхонь і покриття світлоподільника викликають просторове розділення хвильових фронтів випромінювання, відповідних різним довжинам хвиль. В результаті цього при русі рухомого дзеркала значення нульової різниці ходу досягається не одночасно для різних частот, що приводить до неспівпадання фаз косинусоїд в головному максимумі інтерферограми. В цьому випадку можна говорити про фазову характеристику (фазовий спектр) оптичного каналу, розуміючи під цим залежність фазового зсуву від частоти косинусоїди (хвильового числа). Фазовий зсув визначається щодо фіксованої точки косинусоїди, максимум якої співпадає з дискретним значенням інтерферограми

при $l = 0$. Фазовий спектр знаходиться за формулою:

$$\varphi(\sigma) = \arctg \frac{B_{\sin}(\sigma)}{B_{\cos}(\sigma)}, \quad (2.30)$$

де $B_{\sin}(\sigma)$ і $B_{\cos}(\sigma)$ – синусне і косинусне фур'є перетворення інтерферограми.

Фазові спотворення приводять до асиметрії апаратної функції і зниження її центрального максимуму. Їх врахування проводиться при повному перетворенні Фур'є, коли амплітудний спектр обчислюється у вигляді:

$$B(\sigma) = \sqrt{B_{\cos}^2(\sigma) + B_{\sin}^2(\sigma)}. \quad (2.31)$$

Спотворення сигналу інтерферограми в електричному тракті необхідно розглядати тільки у взаємозв'язку з методикою подальшого перетворення інтерферограми в спектрограму. Це пов'язано з тим, що в електричному тракті аналоговий сигнал інтерферограми змішується з шумом приймача випромінювання, і подальше математичне перетворення при обробці здійснюється над їх сукупністю. Такий підхід справедливий для ближньої і середньої інфрачервоної області спектру, де фотонним шумом джерела випромінювання можна нехтувати.

Найбільш зручним способом математичної обробки інтерферограми є отримання спектрів у відносних одиницях за допомогою обчислення інтегралів Фур'є на універсальних електронно-обчислювальних машинах [4]. Для цього інтерферограма задається в дискретній послідовності точок, зміщених одна відносно одної на постійний інтервал по різниці ходу.

Як подільник пучка [11] для далекої інфрачервоної області (хвильові числа менше 400 см^{-1}) можна використовувати майларову або поліетиленову плівку. Для вимірювань в області від 200 до 4000 см^{-1} розроблені пристрої, де застосовується германієва плівка, нанесена на різні підкладки (наприклад, KBr, CsI). У області 2000 - 16000 см^{-1} застосовуються плівки з окислу заліза Fe_2O_3 на підкладці CaF_2 . При цьому можливе використання не показаної на рис. 2.2 компенсуючої пластинки.

Вибір детектора також залежить від спектральної області. Як правило,

використовуються детектор Голея, піроелектричний болометр або детектор на напівпровідниках з фотопровідністю. Для зменшення поглинання парою води повітря з системи відкачується до тиску 10^{-2} - 10^{-3} мм рт. ст. Звичайно, навіть і в цих умовах необхідно одержувати інтерферограми із зразком і без нього, щоб внести поправку на характерну інструментальну інтерферограму.

Оскільки, кінцевим завданням є одержання температури то розглянемо як це можна здійснити.

Для визначення температури фур'є спектрометром можна скористатися законом Планка [3], який показує залежність розподілу енергії випромінювання за спектром довжин хвиль від абсолютної температури має вигляд:

$$B(\lambda T) = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.32)$$

де $B(\lambda)$ – інтенсивність спектральної яскравості при кожному конкретному λ , Вт/(м²·ср); c_1 – перша постійна випромінювання, $c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; c_2 – друга постійна випромінювання, $c_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2}$ м·К; λ – довжина хвилі, м; T – абсолютна температура, К.

З цієї формули можна визначити температуру за спектром отриманим фур'є-спектрометром:

$$T = \frac{c_2}{\ln\left(\frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B(\lambda T)}{\lambda^5 \cdot B(\lambda T)}\right) \cdot \lambda}, \quad (2.33)$$

Викладені короткі основи теорії дозволяють сформулювати характерні переваги фур'є-спектрометрів. Головна перевага фур'є-спектрометрів полягає в одночасній реєстрації випромінювання у всьому спектральному діапазоні, що дозволяє різко скоротити час реєстрації або підвищити точність експерименту. Крім того, фур'є-спектрометр дозволяє реалізувати високу роздільну здатність, що визначається тільки значенням різниці ходу l при великій вхідній апертурі приладу (геометричний чинник інтерферометрів значно перевершує геометричний чинник приладів з дифракційними ґратками).

Фур'є-спектрометр відрізняється високою точністю визначення хвильових

чисел внаслідок однозначного зв'язку між електричними і світловими частотами при постійній швидкості переміщення рухомого дзеркала. Простий спосіб контролю постійності швидкості полягає в реєстрації одночасно з досліджуваним випромінюванням інтерферограми джерела монохроматичного випромінювання, яка має форму косинусоїди. Число максимумів косинусоїди за будь-який інтервал часу прямо пропорційна різниці ходу, тобто величині переміщення дзеркала.

Спектральна область роботи фур'є-спектрометра визначається тільки областю пропускання оптичних елементів і чутливістю приймача [12]. Можливість реєстрації широкої області спектру за короткий інтервал часу також відноситься до переваг приладу. Нарешті, компактність оптичної схеми приладу визначає його малі габарити і масу.

Необхідність застосування ЕОМ для отримання спектрів з фур'є-спектрометра іноді відносять до труднощів роботи з приладом. Проте, з іншого боку, це відкриває великі можливості математичної обробки інформації, необхідної для різного роду вимірювань. Сучасна обчислювальна техніка дозволяє провести повну обробку в лічені секунди, тобто практично у реальному часі роботи приладу. За наявності зв'язку прилад – ЕОМ, а ще краще – за наявності спеціального процесора в самому приладі, обробка результатів може бути виконана дуже швидко. У ряді завдань результат може бути отриманий безпосередньо з інтерферограми (наприклад, товщина плівкових покриттів) або при скороченому об'ємі її обробки (у разі спектрального контролю вмісту речовини в суміші)-.

Конструкторські і технологічні складнощі виготовлення фур'є-спектрометрів дещо вищі, ніж звичайних спектральних приладів, але є виправданими, оскільки в результаті їх подолання ми одержуємо прилад вищої продуктивності.

2.3 Розробка алгоритму обробки результатів контролю фур'є-методом

На виході з фур'є-спектрометра ми одержуємо інтерферографу яка передається на комп'ютер і за допомогою програмного забезпечення, яке здійснює фур'є-перетворення ми одержуємо розподіл інтенсивності спектральної яскравості при кожному конкретному значенні хвильового числа і за ним обчислене значення температури.

Для реалізації фур'є-перетворення була розроблена діюча математична модель, основні принципи якої розкрито в працях [3], [4], [11]. Основна суть математичної моделі є наступною.

Вхідними даними для розрахунку є залежність інтенсивності I від різниці ходу пучків l . Інтенсивність змірюється детектором фур'є-спектрометра.

Здійснимо віднімання від кожного значення інтенсивності I інтерферограми пів інтенсивності при різниці ходу пучків l рівній 0, одержимо результуючу інтерферограму:

$$I_p = I(l) - \frac{1}{2} I(0), \quad (2.34)$$

Задаємо діапазон зміни довжин хвиль, або оберненої до неї величини – хвильового числа, згідно яких будуватимемо спектрограму.

Отримуємо гармонічну функцію y , яка залежить від σ і l за формулою:

$$y(l, \sigma) = \cos(2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot l), \quad (2.35)$$

Для отримання підінтегральної функції, з якої в подальшому отримаємо спектр, помножимо дану функцію на інтерферограму:

$$K = I_p \cdot y(l, \sigma) = \left[I(l) - \frac{1}{2} I(0) \right] \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot l) \quad (2.36)$$

Щоб отримати інтенсивність спектру при кожному конкретному σ , візьмемо інтеграл від попередньої функції K :

$$B(\sigma) = \int_0^{\infty} \left[I(l) - \frac{1}{2} I(0) \right] \cos(2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot l) dl, \quad (2.37)$$

Це рівняння називається основним рівнянням фур'є-спектроскопії.

Відмітимо, що обчислення $B(\sigma)$ в рівнянні (2.37) для кожного конкретного хвильового числа, наприклад σ_1 , зводиться до множення всієї кривої (2.34) на

(2.35), тобто обчислення площі під кривою виразу дає конкретне значення $B(\sigma_1)$.

Тобто, знайдемо площі під кривими K для кожного значення a при зміні значень різниці ходу пучків l , це і буде значення $B(\sigma)$.

Ми для моделювання брали тільки додатню частину інтерферограми, а оскільки, функція $I(l)$ є парною, тобто від'ємна і додатня частини інтерферографи є симетричними, то для одержання інтенсивності спектру помножимо відповідні a значення інтенсивності B на 2.

За формулою (2.37) можна побудувати залежність інтенсивності спектральної яскравості від хвильового числа, це і буде спектр.

Визначення температури виконаємо за формулою (2.33) виведеною з закону Планка:

Ми отримаємо значення температури на кожному хвильовому числі (або по іншому на кожній довжині хвилі). Щоб знайти загальну температуру просумуємо ці значення температури і одержимо значення температури в заданому діапазоні спектру в Кельвінах.

Результати експериментального визначення температури фур'є-методом та програма обробки результатів вимірювань, що розроблена в програмному пакеті Mathcad приводяться в додатку А.

2.4 Розробка структурної схеми фур'є-спектрометра

Розробку структурної схеми фур'є-спектрометра слід розпочати виходячи з того, що комплекс апаратури фур'є-спектрометра призначений для вимірювань спектрів низькотемпературних джерел у області 5-20 мкм, з можливістю визначення температури віддалених об'єктів. Система повинна повністю автоматизувати процес отримання інтерферограм і їх перетворення в спектри і обчислення температури.

Апаратура складається з двох частин безпосередньо фур'є-спектрометра і персонального комп'ютера (ноутбука).

Структурна схема фур'є-спектрометра зображене на форматі МР.МТТм-

21.00.00.000 С1.

Фур'є-спектрометр складається з оптичного блоку (ОБ), детектора (Д), підсилювача (П), блоку попередньої обробки інформації (БПО), системи переміщення дзеркала (СПД), блоку керування переміщенням дзеркала (БКД), блоку термостабілізації (БТС), інтерфейсного блоку (БІ), блоку живлення (БЖ) і батареї акумуляторів (БА).

Оптичний блок разом з детектором перетворює потік випромінювання досліджуваних об'єктів в інтерферограму – електричний аналог потоку випромінювання. Це перетворення здійснюється в двопроменевому інтерферометрі Майкельсона, який є основним елементом оптичної схеми.

Випромінювання досліджуваного об'єкту поступає на вхідний об'єктив і прямує на світлоподільник з калій-бромом. Відбиті від рухомого дзеркала і нерухомого дзеркала пучки інтерферують у фокальній площині конденсора із сферичних дзеркальних лінз на приймальному майданчику приймача.

При переміщенні рухомого дзеркала приводом СПД із збереженням просторової паралельності змінюється оптична різниця ходу між двома пучками, що створюються світлоподільником з вхідного потоку випромінювання. При інтерференції цих пучків в площині приймача променистої енергії створюється зміна освітленості у функції оптичної різниці ходу. Електричний сигнал з приймача (інтерферограма) через підсилювач подається на блок попередньої обробки інформації.

Інтерферограма однозначно пов'язана із спектральним розподілом енергетичної яскравості випромінювання $V(\sigma)$ через зворотне Фур'є-перетворення.

Спектральний діапазон реєстрації визначається в основному областю чутливості приймача випромінювання. Для перекриття вказаної області спектру в приладі використовують охолоджуваний фото-опір з InSb (5- 20 мкм). Регулювання температури блоком термостабілізації БТС.

Калібрування здійснюється переносним контрольним калібрувальним

абсолютно чорним тілом.

Блок обробки інформації забезпечує нормальне функціонування приладу, керування роботою і контроль справності всіх вузлів приладу, попередню обробку сигналу (оцифрування), формування інтерфейсним блоком сигналу для передачі даних для подальшої обробки на комп'ютер.

Прилад живиться від вмонтованого акумулятора, також є можливість живлення від зовнішнього джерела постійної напруги 12 В.

Маса приладу без ноутбука складає 2,3 кг, максимальна потужність, споживана приладом від джерела постійного струму напругою 12 В, не перевищує 12 Вт.

2.5 Розрахунок коліматора фур'є-спектрометра

В практиці оптичного неруйнівного контролю застосовують різні оптичні елементи і пристрої [12], які утворюють в сукупності найважливіший вузол оптико-електричних приладів і блоків обладнання – оптичну систему.

Оптичною системою називають [13] сукупність заломлюючих і відбиваючих поверхонь та проміжків між ними, призначених для формування світлових пучків, зокрема для зображення предметів. Будова і дія всіх оптичних систем ґрунтується на законах геометричної оптики. Зображення без спотворень створюють оптичні системи, в яких є сферичні поверхні, лише в параксіальних променях (таких, що йдуть під великими кутами до оптичної осі). Для того, щоб умови параксіальності не порушувались, усі елементи оптичної системи, слід розмістити на оптичній осі.

Головним призначенням оптичної системи є одержання потоку світлової енергії корисних сигналів чи чіткого зображення досліджуваного об'єкту контролю.

Центральним поняттям для оптичної системи є оптична вісь – лінія на якій розміщені центри заломлюючих чи відбиваючих елементів системи. Якщо центри всіх елементів знаходяться на оптичній осі, то вона називається

головною. Деталі зображення на оптичній осі найбільш чіткі.

Оптичні системи складаються з різних елементів: лінз, дзеркал, призм, фільтрів і інших. Кожний оптичний елемент змінює певним чином падаючий світловий потік. Оптична система характеризується фокусною відстанню, роздільною здатністю, світлосилою, кутом поля зображення (зору), спектральним діапазоном і ін.

Фокусна віддаль системи – віддаль від фокуса до головної точки, тобто точки, де в площині Перпендикулярній головній оптичній осі, зображення співпадає з його натуральною величиною. Фокуси системи відповідають зображенню нескінченно віддаленої точки.

Роздільна здатність оптичної системи – мінімальна віддаль між простими розрізнюваними елементами об'єкта, які близько розміщені в просторі. В оптиці роздільна здатність звичайно вимірюється числом ліній на 1 мм, які розрізняються.

Світлосила (відносний отвір) – дорівнює відношенню освітленості зображення після об'єктива, до яскравості предмета. Світлосила в значній мірі визначає енергію світла, яка доходить до площини зображення чи перетворювача енергії об'єкту випромінювання в електричний сигнал.

Лінза – деталь, виготовлена з прозорого для даного випромінювання матеріалу і обмежена криволінійними поверхнями. Лінзи є збираючі, розсіюючі і спеціальні (наприклад, циліндричні).

Лінзи є найбільш використовуваними оптичними елементами і служать для створення певних конфігурацій світлових пучків чи дійсних або уявних зображень об'єктів.

Дзеркало – оптичний елемент з полірованою поверхнею, який утворює потрібні світлові потоки чи зображення шляхом відбивання. Дзеркала виготовляють із металів (Au, Ag, Al, Cr, Ni) або напиленням їх на тверді матеріали (скло, кераміка, сталь). Дзеркала можуть виконувати ті ж функції, що і лінзи. Напівпрозорі дзеркала використовуються в багатьох оптичних пристроях

для розділення світлових потоків.

Сферичні дзеркала використовуються із випуклою і вгнутою поверхнями. Для них зв'язок між віддалями від об'єкта до дзеркала x_0 і від дзеркала до зображення x_3 описується рівнянням:

$$\frac{1}{x_0} + \frac{1}{x_3} = \frac{2}{R'} \quad (2.38)$$

де R – радіус кривизни сферичного дзеркала.

Якщо предметна точка міститься на нескінченності ($0 = \infty$), промені від неї ідуть паралельно до оптичної осі, і образ точки утвориться на віддалі:

$$x_3 = \frac{R}{2} = f. \quad (2.39)$$

Точка, в якій збираються промені, що йдуть паралельно до оптичної осі, називаються фокусом дзеркала, і віддаль f від вершини дзеркала до фокуса називається фокусною віддаллю.

Використовуючи поняття фокуса можна легко будувати графічно положення і величину зображень. Для цього використовуються допоміжні промені, хід яких є відомий:

- 1) промінь, паралельний до оптичної осі, після відбиття проходить через фокус;
- 2) промінь, що проходить через фокус, після відбиття йде паралельно оптичної осі;
- 3) промінь, який пройшов через центр кривизни, після відбиття йде в зворотному напрямі;
- 4) промінь, який падає з вершини відбиваючої поверхні, відбивається під кутом, що дорівнює кутові падіння.

Опукле дзеркало створює дійсне чи уявне зображення залежно від віддалі предмета до дзеркала, зображення буде збільшеним ($x_0 < 2f$), чи зменшеним ($x_0 > 2f$). Вгнуте дзеркало створює тільки уявне і зменшене зображення.

Коліматор, який побудований за схемою об'єктива Кассегрена (рис. 2.4). Він складається з двох сферичних дзеркал Д1 і Д2.

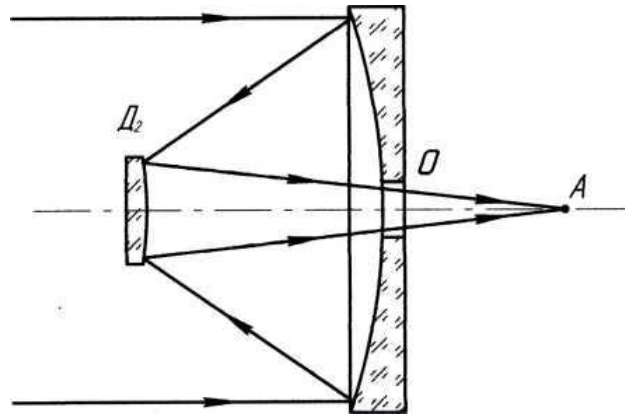


Рисунок 2.4 – Загальна схема об’єктиву Кассегрена

Паралельні промені надходять на перше, головне дзеркало D_1 , яке спрямовує їх на друге дзеркало D_2 , сфокусовані ним промені проходять крізь отвір O у головному дзеркалі і перетинаються в деякій точці A . Точкою A в нашому випадку є чутлива площадка детектора випромінювання.

Вихідними даними для розрахунку є:

– R_1 – радіус кривизни першого, або головного (вгнутого) дзеркала,

$$R_1 = 88 \text{ мм};$$

– R_2 – радіус кривизни другого (опуклого) дзеркала, $R_2 = 47,2 \text{ мм}$.

Обчислимо фокусні віддалі за формулою (2.39) відповідних дзеркал:

$$f_1 = \frac{R_1}{2} = \frac{88}{2} = 44 \text{ мм},$$

$$f_2 = \frac{R_2}{2} = \frac{47,2}{2} = 23,6 \text{ мм}.$$

Скористаємось формулою з [13], для вибору положення другого дзеркала об’єктива Кассегрена:

$$S = \frac{1}{3 \dots 5} \cdot f_1, \quad (2.40)$$

де S – відстань від фокуса першого дзеркала до площини другого дзеркала (рис. 2.5); f_1 – фокусна відстань першого (головного) дзеркала.

де l – відстань між дзеркалами, мм, яка визначається як:

$$l = f_1 - s. \quad (2.43)$$

Так само з рисунка 2.5 можна визначити чому буде рівна фокусна відстань системи:

$$f_c = f_2 + l + z, \quad (2.44)$$

Підставивши (2.42) і (2.44) в (2.41) одержимо:

$$f_2 + l + z = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_2 - f_1 + l}, \quad (2.45)$$

З (2.45) z буде рівне:

$$z = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_2 - f_1 + l} - f_2 - l, \quad (2.46)$$

або відставивши (2,43) в (2.46) матимемо:

$$z = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_2 - f_1 + f_1 - s} - f_2 - (f_1 - s), \quad (2.47)$$

Спростивши (2.47) отримаємо:

$$z = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_2 - s} - f_2 - f_1 + s. \quad (2.48)$$

Отже, підставивши значення в формулу (2.48) одержимо значення відстані z :

$$z = \frac{44 \cdot 23,6}{23,6 - 11} - 23,6 - 44 + 11 = 25,81 \text{ мм.}$$

2.6 Розробка конструкції фур'є-спектрометра

Конструкція фур'є-спектрометра приведена на кресленні Складальне креслення фур'є- спектрометра зображене на форматі МР.МТТм-21.00.00.000 СК.

Фур'є-спектрометр виконаний як переносний прилад. Корпус виготовлений з дюралюмінієвого сплаву і є розбірним, що дозволяє проводити періодичне технічне обслуговування приладу. Корпус всередині містить

перегородку, яка розділяє оптичну і електронну частини.

Оптична система фур'є-спектрометра складається з об'єктива, подільника пучка, направляючого дзеркала, рухомого і нерухомого дзеркала, механізму переміщення дзеркала, колімуючої системи, приймача.

Об'єктив забезпечує попадання на подільник паралельних променів від ОК. Він виконаний рухомим для точного фокусування.

Подільник променя для даного діапазону виконаний з калій-броду. Він оснащений механізмом який забезпечує зміну кута встановлення, за допомогою гвинтової передачі, при налагодженні приладу. Схожим механізмом обладнане направляюче дзеркало.

Одним з найвідповідальніших вузлів є вузол рухомого дзеркала, оскільки він має забезпечувати переміщення даного дзеркала на мікроскопічні віддалі з високою точністю. Це забезпечується гвинтовою передачею і використанням крокового двигуна для її обертання. При обертанні гвинта переміщується каретка з дзеркалом.

Для вказаної області спектру в приладі використовують охолоджуванний фото-опір з InSb (5-20 мкм). Регулювання температури блоком термостабілізації. В якості охолоджуючого елемента використано елемент Пельтьє.

Вузол наведення на об'єкт розміщений на верхній кришці приладу і являється по суті звичайним моноклем.

На задній панелі розміщений тумблер, індикатор і роз'єм живлення, тримач запобіжника, а також роз'єм інтерфейсу з комп'ютером.

Електронна частина складається з блоків згідно структурної схеми. Блоки між собою з'єднані джгутом.

Прилад містить відсік для акумуляторів, також має роз'єм зовнішнього живлення 12 В.

2.7 Методика проведення контролю за допомогою фур'є-спектроскопу

Для того щоб виявити наявність недостатків згідно математичної моделі виведеної в підрозділі 2.1 слід знати ряд коефіцієнтів. Деякі з цих коефіцієнтів можна визначити аналітично чи графічно. Решта коефіцієнтів потрібно визначати індивідуально для кожного об'єкта. Найбільш інформативний з них це коефіцієнт теплопередачі будинку, який потрібно уточнити для кожного конкретного об'єкту, на початку опалювального сезону, шляхом вимірювання внутрішньої і зовнішньої температури.

Наступним кроком буде вимірювання температури зовнішньої стінки об'єкту фур'є-спектрометром і обчислення кількості газу використаного на нагрівання житла яку можна порівняти з кількість газу відрахованого за квартирним лічильником.

Методика проведення контролю за допомогою фур'є-спектрометра є наступною. Прилад розмістити на штативі на деякій відстані від об'єкта контролю. Переконавшись у відсутності перешкод між приладом і ОК. Під'єднати фур'є-спектрометр до ноутбука за допомогою USB-кабелю. Ввімкнути живлення приладу тумблером на задній стінці приладу і переконавшись в справності приладу по світінню світлодіоднош індикатора на панелі. В разі помилки приладу індикатор буде блимати.

Перед вимірюванням можна провести калібрування приладу по випромінюванню абсолютно чорного тіла. Для цього використовується компактна модель абсолютно чорного тіла.

Запустити на персональному комп'ютері (ПК) програмний пакет обробки інтерферограм. Встановити зв'язок ПК з приладом. Запустити процес вимірювання.

Навести прилад на ОК, яке здійснюється за допомогою системи наведення по перехресній мітці. Натиснути клавішу старту. І забезпечити нерухомість приладу на протязі вимірювання (3-10 с). Після закінчення процесу вимірювання на екрані монітора з'явиться інтерферограма. Далше в програмі можна

виконувати різноманітні дії з інтерферограмою, тобто обчислення і побудова спектру, обчислення температури, побудова графіка розподілу температури по довжинах хвиль.

Записати в протокол одержані дані.

З МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОГО ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРА

3.1 Аналіз видів похибок

Забезпечення високої точності вимірювань – важке завдання, і вирішення його належить сфері метрологічного забезпечення. Дослідника, чи технолога цікавить в кінцевому результаті похибка отриманих ними результатів вимірювання. Проте ця похибка складається з багатьох складових. Різновидність прояву похибок та причин їх виявлення викликало необхідність поділу цих складових на певні типи [14].

Похибка результату вимірювань – це відхилення результатів вимірювання від істинного (дійсного) значення вимірюваної величини.

Аналізуючи причини виникнення похибок, необхідно в першу чергу виділити ті з них, які суттєво впливають на результат вимірювання.

Залежно від форми вираження розрізняють абсолютну і відносну похибки. Абсолютною називають похибку, яка показує на скільки результат вимірювання відрізняється від істинного значення вимірюваної величини [14], тобто:

$$\Delta = A - X_{ист} \quad (3.1)$$

де Δ – абсолютна похибка вимірювань; A – результат вимірювання; $X_{ист}$ – істинне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка виражається в тих же одиницях, що й вимірювальна величина.

Відносна похибка вимірювань представляє собою відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

Відносну похибку δ визначають в процентах за формулою:

$$\delta = \frac{A - X_{ист}}{X_{ист}} \cdot 100 = \frac{\Delta}{X_{ист}} \quad (3.2)$$

До похибок засобів вимірювання належать інструментальні похибки,

методичні похибки.

Інструментальні похибки є в кожному засобі вимірювань, вони можуть бути визначені при його випробуваннях і занесені в паспорт на цей засіб.

Методичні похибки – це такі похибки, які пов'язані з вибраним методом вимірювань даної величини.

Залежно від умов і режимів вимірювання розрізняють статичну і динамічну похибки засобу вимірювання. Статичною називають похибку, яка не залежить від швидкості зміни вимірюваної величини в часі. Статична похибка засобу вимірювання виникає при вимірюванні за його допомогою постійної величини.

Динамічною називають похибку, яка залежить від швидкості зміни вимірюваної величини в часі [15]. Виникнення динамічної похибки зумовлене інерційністю елементів вимірювальної ланки засобу вимірювання, тобто тим, що перетворення в вимірювальній ланці не відбуваються миттєво, а потребують певного часу.

Динамічною похибкою засобу вимірювання є різниця між похибкою засобу вимірювання в динамічних умовах та його статичною похибкою, яка відповідає значенню величини в даний момент часу.

Залежно від характеру виявлення, можливості усунення і причин виникнення розрізняють систематичну та випадкову похибки. Систематичною називають складову похибки вимірювань, яка є постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тій ж величини. Причинами виникнення систематичної складової похибки вимірювань (систематичних похибок) є: відхилення параметрів реального засобу вимірювання від розрахованих значень передбачених схемою; невірноваженість певних деталей засобу вимірювання відносно їх осі обертання, яке призводить до додаткового обертання за рахунок зазорів, що є в механізмі; похибка градування або деякий зсув шкали; зношення робочих поверхонь деталей засобу вимірювання; старіння деталей; несправність засобу вимірювання і т.д. Ззовні систематичну похибку

неможливо виявити. Виявити її можна тільки при повірці шляхом порівняння робочих засобів вимірювання з зразковими [15].

Випадковою називають складову похибки, яка змінюється випадково при повторному вимірюванні однієї і тієї ж величини. Випадкова похибка виникає при одночасній дії багатьох джерел, кожне з яких саме по собі непомітно впливає на результат вимірювань, а сумарний вплив всіх джерел може бути достатньо великим, вона не може бути передбачена ні по знаку ні по величині.

Поряд з систематичною та випадковою похибками існує ще і прогресуюча похибка [16]. Прогресуюча похибка змінюється в часі і ця зміна залежить від зміни характеристик окремих елементів засобу вимірювання.

Систематичне відхилення експериментальних даних від вибраної характеристики засобу вимірювання називають похибкою адекватності.

Проте є також і похибка градування, яка залежить від тих похибок взірцевих засобів вимірювання за допомогою яких здійснювалося експериментальне градування робочого засобу вимірювання.

Похибки засобу вимірювань, які залежать від величини вхідного сигналу називаються мультиплікативними, а ті що не залежать – адитивними.

3.2 Розрахунок похибки обчислення температури диференціальним методом

Точність засобу вимірювань завжди визначають за кожним вихідним інформативним параметром [15]. Інформативний параметр y зображують як функцію кількох вхідних параметрів x_1, x_2, \dots, x_n . Під вхідними параметрами розуміють не тільки параметри вимірюваної фізичної величини, а й параметри та елементи вимірюваної схеми засобу вимірювань, а також зовнішні фактори. Тому вихідний параметр y можемо записати у загальному вигляді так:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.3)$$

де n – кількість вхідних параметрів, які впливають на значення вихідного параметра.

Для вибраних розрахункових значень вхідних параметрів вихідний параметр матиме потрібне значення:

$$y_0 = f(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}). \quad (3.4)$$

Насправді значення вхідних параметрів можуть відрізнятися від прийнятих при розрахунку. Тоді значення вихідного параметра відрізнятиметься від потрібного на величину похибки Δy , тобто

$$y = y_0 + \Delta y. \quad (3.5)$$

Щоб знайти похибку Δy розкладемо функцію f в ряд Тейлора і, переходячи до кінцевих приростів, запишемо

$$\begin{aligned} y = y_0 + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n + \\ + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} (\Delta x_1)^2 + \dots + \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} (\Delta x_n)^2 + \right. \\ \left. + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \Delta x_1 \Delta x_2 + \dots \right] + \dots. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Оскільки первинні похибки Δx малі в порівнянні із значеннями вхідних параметрів, то нехтуючи їх квадратами і добутками, отримаємо, що

$$y = y_0 + \Delta y \approx y_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i. \quad (3.7)$$

Тоді вираз для абсолютної похибки вихідного параметра запишемо у такому вигляді:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i, \quad (3.8)$$

або для випадку лінійного виду залежності (6.1)

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n b_i \Delta x_i, \quad (3.9)$$

де b_i – коефіцієнти впливу похибки i -го вхідного параметра. Відносна похибка буде такою:

$$\delta_y = \Delta y / y_0 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right) / y_0 \quad (3.10)$$

Якщо $\Delta x \rightarrow 0$, то $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = d_x y$, тоді відносну похибку можна записати

так:

$$\delta_y = \frac{dy_0}{y_0} = d \ln y_0 = d \ln f(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}), \quad (3.11)$$

або

$$\delta_y = \frac{d \ln y_0}{dx_1} \Delta x_1 + \frac{d \ln y_0}{dx_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{d \ln y_0}{dx_n} \Delta x_n = k_1 \Delta x_1 + \dots = k_n \Delta x_n \quad (3.12)$$

де k_i – коефіцієнти впливу первинних похибок, що є похідними за вхідним параметром від логарифму функції вихідного параметра.

Якщо при розрахунку похибки коефіцієнти впливу (частинні похідні) взяти за абсолютним значенням $\left| \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right|$ і $\left| \frac{d \ln y_0}{dx} \Delta x \right|$, то при граничних значеннях первинних похибок дістанемо граничні значення похибок вихідного параметра.

Температура в даному приладі є основним параметром який він вимірює. Отже, здійснимо розрахунок похибки температури диференціальним методом.

Згідно диференціального методу розрахункова формула для визначення похибки, відомий аналітичний вираз для вимірювальної величини є диференціалом функції вихідного параметра. Диференціювання необхідно здійснювати за всіма вхідними параметрами, які мають похибку.

Точність засобу вимірювань завжди визначають за кожним вхідним інформативним параметром. Даним інформативним параметром як було сказано є температура T . (формула (2.33)).

В такому випадку розрахунок похибки визначення температури T доцільно здійснювати диференціальним методом. Абсолютна похибка температури визначається за формулою:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial c_2} \Delta c_2 + \frac{\partial T}{\partial c_1} \Delta c_1 + \frac{\partial T}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial T}{\partial B} \Delta B, \quad (3.13)$$

Продиференціювавши вираз (3.13) за кожною змінною отримаємо такі частинні похідні:

$$\frac{\partial T}{\partial c_2} = \frac{1}{\ln\left(\frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B}{\lambda^5 \cdot B}\right)}; \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial c_1} = \frac{-c_2}{\ln\left(\frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B}{\lambda^5 \cdot B}\right) \cdot \lambda \cdot (c_1 + \lambda^5 \cdot B)}; \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda} = \frac{-c_2}{\ln\left(\frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B}{\lambda^5 \cdot B}\right)^2} \cdot \lambda^4 \cdot B \cdot \frac{\frac{5}{\lambda} - 5 \cdot \frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B}{\lambda^5 \cdot B}}{c_1 + \lambda^5 \cdot B} - \frac{c_2}{\ln\left(\frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B}{\lambda^5 \cdot B}\right) \cdot \lambda^5}. \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial B} = \frac{-c_2}{\ln\left(\frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B}{\lambda^5 \cdot B}\right)^2} \cdot \lambda^4 \cdot B \cdot \frac{\frac{1}{B} - \frac{c_1 + \lambda^5 \cdot B}{\lambda^5 \cdot B^2}}{c_1 + \lambda^5 \cdot B}. \quad (3.17)$$

Вибравши типові значення параметрів, які входять в вираз (3.13), визначимо значення частинних похідних за виразами (3.14-3.17).

Типові значення параметрів встановлюються наступні. Перша постійна випромінювання $c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ Вт-м², похибка її визначення становить $\Delta c_1 = 2 \cdot 10^{-19}$ Вт-м² [3]. Друга постійна випромінювання $c_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2}$ мК, похибка її визначення становить $\Delta c_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ мК [3]. Довжину хвилі приймаємо як середнє значення діапазону який вимірює фур'є-спектрометр (5-20 мкм) $\lambda = 12,5 \cdot 10^{-6}$ м, похибка її визначення становить $\Delta \lambda = 7 \cdot 10^{-7}$ м. Інтенсивність спектру $B(\lambda) = 2 \cdot 10^{-10}$ Вт/(м²·ср), похибка її визначення залежить від похибок блоків приладу.

Для знаходження похибки інтенсивності спектру достатньо відомі відносні похибки блоків просумувати, оскільки, блоки з'єднані послідовно [15]:

$$\delta_B = \delta_D + \delta_{\Pi} + \delta_{\text{БООС}}, \quad (3.18)$$

де δ_B – відносна похибка інтенсивності спектру, %; δ_D – відносна похибка детектора, $\delta_D = 0,25$ %; δ_{Π} – відносна похибка підсилювача, $\delta_{\Pi} = 0,1$ %; $\delta_{\text{БООС}}$ – відносна похибка блоку обробки сигналу, $\delta_{\text{БООС}} = 0,2$ %.

Отже, відносна похибка інтенсивності буде рівна:

$$\delta_B = 0,25 + 0,1 + 0,2 = 0,55 \text{ \%}.$$

Перейдемо до абсолютної похибки інтенсивності B згідно формули:

$$\Delta B = \frac{\delta_B \cdot B_{\text{max}}}{100}, \quad (3.19)$$

де B_{max} – максимальне значення інтенсивності.

Згідно формули (3.19) одержимо:

$$\Delta B = \frac{0,55 \cdot 4,712 \cdot 10^{-5}}{100} = 2,592 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ср)}.$$

Отже, підставляючи наведені вище значення параметрів у вирази (3.14-3.17) знайдемо значення частинних похідних:

$$\frac{\partial T}{\partial c_2} = 2,48 \cdot 10^3,$$

$$\frac{\partial T}{\partial c_1} = -2,956 \cdot 10^{15}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda} = -2,412 \cdot 10^6$$

$$\frac{\partial T}{\partial B} = 9,214 \cdot 10^4.$$

Скориставшись формулою (3.13) визначимо абсолютну похибку визначення температури:

$$\Delta T = 2,48 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + |-2,956 \cdot 10^{15}| \cdot 2 \cdot 10^{-19} + |-2,412 \cdot 10^6| \cdot 7 \cdot 10^{-7} + 9,214 \cdot 10^4 \cdot 2,592 \cdot 10^{-7} = 1,763 \text{ К}.$$

Прийнявши до уваги, що значення функції температури рівне $T = 816,856$ К, то відносна похибка буде становити:

$$\gamma = \frac{\Delta T}{T} \cdot 100\% = \frac{1,763}{816,856} \cdot 100\% = 0,216\%.$$

Отже, сумарна похибка визначення температури складає 0,216 %.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі був проведений аналіз об'єкту контролю, аналіз існуючих методів вимірювання температури, проаналізовані різні прилади вимірювання температури. Приведені переваги і недоліки застосування розглянутих методів і приладів. Метою аналізу було обрати метод вимірювання температури який би задовольняв необхідним вимогам для системи контролю температури стінки будівель. Було сформульовано і поставлено завдання на магістерську роботу – розробка системи контролю для діагностування об'єктів в комунально-побутовій сфері.

Складено математичну модель теплового балансу приміщення яка обґрунтовує залежність зовнішньої температури стінки від характеристик будівлі, параметрів навколишнього середовища та умов в середині приміщення. На базі проаналізованих теоретичних основ методу фур'є-спектрометрії розроблений алгоритм обробки результатів контролю фур'є-методом. Розроблено структурну схему приладу. На основі теоретичних даних і розрахунку окремих вузлів фур'є-спектрометра розроблена конструкція приладу. Також розроблена методика проведення контролю правильності обліку енергоносіїв за допомогою фур'є-спектрометра.

Проведено метрологічний аналіз розробленого приладу контролю температури диференціальним методом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. посіб./ М.В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с.
2. Курилів А. Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади : навч. посіб. / А. Ф. Курилів, В. М. Козін. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 189 с.
3. О. Р. Проценко Діагностика стану електротехнічного обладнання: навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.
4. Стадник В. Й. Оптика. Елементи атомної та ядерної фізики. Навчальний посібник з грифом МОНМСУ / Стадник В. Й. – Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2008 – 336 с.
5. Боженко М.Ф. Джерела теплопостачання та споживачі теплоти: Навч. посіб. / М.Ф.Боженко, В.П.Сало. – Київ: ІВЦ „Видавництво „Політехніка”, 2004. – 192 с.
6. Степанов М.В. Інженерне обладнання будівель: Навч. посіб. / М.В.Степанов. – Київ: КНУБА, 2008. – 204 с.
7. ДСТУ – Н Б В. 1.1 – 27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – Чинний від 2011 – 11 – 01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.
8. ДБН В.2.5-67:2013 «ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ». Чинний від 2014- 01-01. – Київ: Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2013. – 232 с.
9. ДБН В.2.6-31:2016 «ТЕПЛОВА ІЗОЛЯЦІЯ БУДІВЕЛЬ». Чинний від 2017-05-01. – Київ: Мінрегіон України, 2017. – 31 с.
10. Гончарук МЛ. Чеховський С.А., Середюк О.Є. Рациональне використання природного газу, як одна із складових збереження його

ресурсів//Нафтова і газова промисловість. – 2005. – № 2. – С. 3-10.

11. Одарич В.А. Основи теорії та методів розрахунку оптичних систем. Ч.ІІІ. Оптичні системи спектральних приладів. Вид.поліграф.центр " Київський університет", Київ, 2003. 40с.

12. 9. Білокур І.П.Основи дефектоскопії. /І.П. Білокур — К.:Азимут-Україна, 2004.—496 с.

13. Одарич В.А., Поперенко Л.В, Стащук В.С. Якунов А.В. Прикладна оптика. Оптична система: теорія, розрахунок, конструювання, технологія.- К.: ВПЦ “Київський університет”, 2010.- 332 с.

14. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред.. Б. Стадника. — Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. — Т. 1. Основи метрології. — 532 с.

15. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Івано-Франківськ: В-во „Факел”, Івано-Франківськ, 2002. – 400 с.

16. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка – Л.: В-во „Бескид Біт”, 2003. – 545 с.

17. Маслова В.А., Стороженко В.А. Термографія в діагностиці і неразрушаючому контролі. – Харків: «Компанія СМІТ», 2004.

18. Водоріз О.С. Оптика, атомна і ядерна фізика: навчальний посібник / О. С. Водоріз, О. А. Любченко, Т. В. Тавріна. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – 159 с.

19. Боженко М.Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель: навч. посіб. / – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.

20. Кучерук І.М. Загальний курс фізики : у 3-х т. / Т.3. Оптика. Квантова фізика / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик. – Київ.: Техніка, 2006. – 520 с.

Додатки

Додаток А

Розрахунок температури за інтерферограмою

$N := 50$

$k := 1 \dots N$

$lm_k := MKM$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
$l_k :=$	15.1	15	14	10.6	62	2.1	-1.7	-2.4	-2.5	-2.3	-1.5	0.3	1	1.5	1.8	1.8	1.6
$lm_k := MKM$	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
$l_k :=$	1.2	0.3	-0.6	-1.1	-1.2	-0.9	0	0.4	0.8	0.9	1	0.8	0.6	0.1	-0.6	-0.8	-0.7
$lm_k := MKM$	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	
$l_k :=$	-0.5	-0.1	0.2	0.4	9.65	0.7	0.6	0.3	0	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.2	0	0.3	

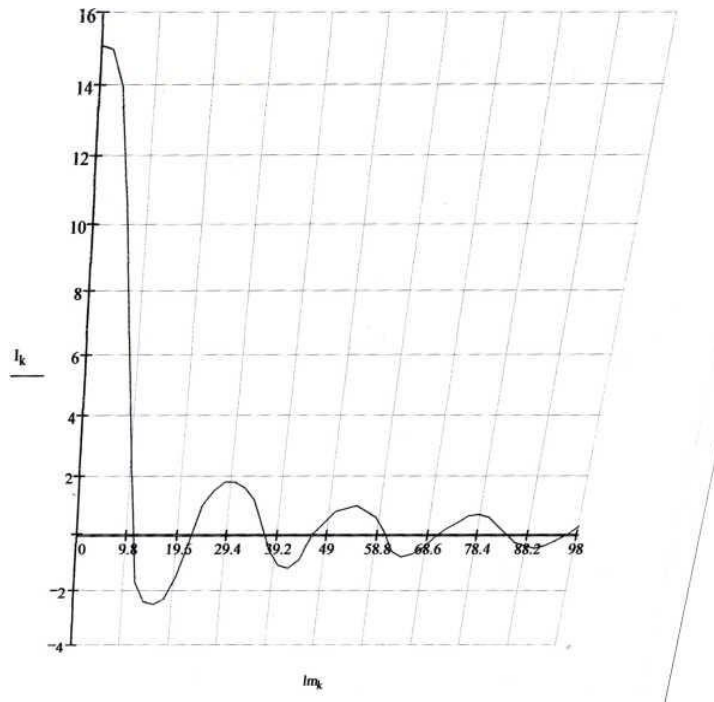


Рисунок А.1 – Апаратна функція фур'є-спектрометра – інтерферограма

$$l_k := lm_k \cdot 10^{-6}$$

Здійснимо віднімання від кожного з значень I інтенсивності інтерферограми півінтенсивності при різниці ходу пучків рівній $l = 0$, одержимо результуючу інтерферограму.

Максимальне значення інтенсивності I (при $l = 0$) інтерферограми буде рівне:

$$10 := \max(I)$$

$$10 = 15.1$$

Отже, результуюча інтерферограма буде:

$$I_{rez_k} := I_k - \frac{1}{2} 10$$

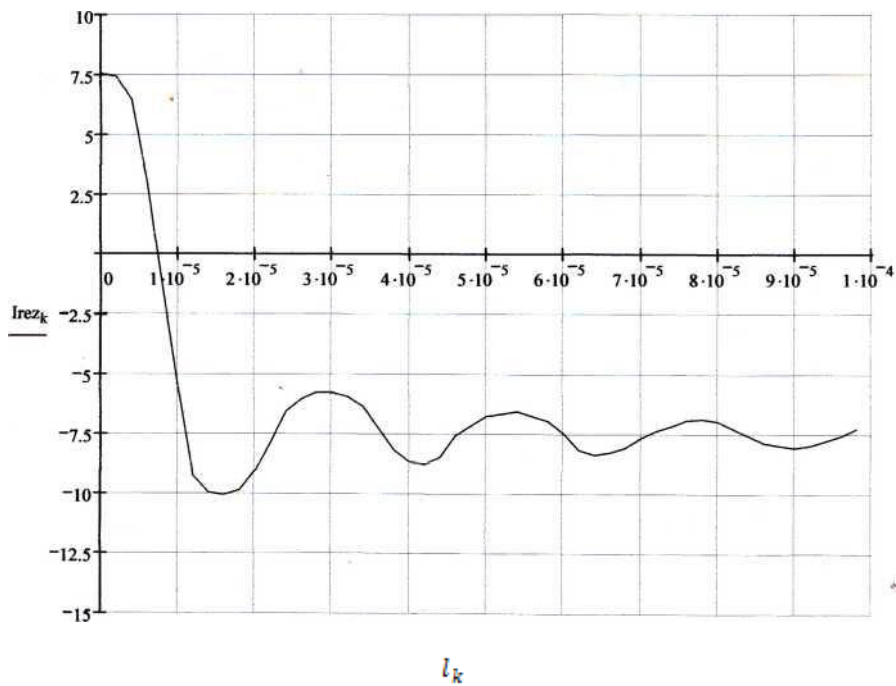


Рисунок А2 – Графік функції отриманий після віднімання

Задамо діапазон зміни довжин хвиль або хвильових чисел згідно яких будуватимемо спектрограму:

$$\lambda := 5 \cdot 10^{-6} - 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\sigma := 50000, 60000 \dots 200000 \text{ м}^{-1}$$

Отримаємо гармонічну функцію, яка залежить від σ і l :

$$y_{k,\sigma} := \cos(2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot l_k)$$

Для отримання підінтегральної функції, з якої в подальшому отримаємо спектр, помножимо дану функцію на інтерферограму:

$$K_{k,\sigma} := I_{rez_k} \cdot y_{k,\sigma}$$

Щоб отримання інтенсивність спектру при кожному конкретному σ , візьмемо інтеграл від попередньої функції K . Оскільки інтеграл це площа під кривою, то знайдемо площі під кривими K для кожного σ при зміні значень різниці ходу пучків l :

$$S_\sigma := \sum_{k=1}^{N-1} \int_{I_k}^{I_{k+1}} \left[\frac{(x - I_k) \cdot (K_{k+1,\sigma} - K_{k,\sigma})}{I_{k+1} - I_k} \right] dx$$

$$S_\sigma =$$

$2.35601 \cdot 10^{-5}$
$1.54058 \cdot 10^{-5}$
$4.94175 \cdot 10^{-6}$
$3.04868 \cdot 10^{-6}$
$4.70148 \cdot 10^{-6}$
$3.38455 \cdot 10^{-6}$
$5.78265 \cdot 10^{-6}$
$8.82388 \cdot 10^{-6}$
$7.43474 \cdot 10^{-6}$
$4.74646 \cdot 10^{-6}$
$3.71495 \cdot 10^{-6}$
$6.95861 \cdot 10^{-7}$
$2.95369 \cdot 10^{-6}$
$1.71374 \cdot 10^{-6}$
$1.69217 \cdot 10^{-6}$
$3.44045 \cdot 10^{-6}$

$$B_\sigma := 2 \cdot S_\sigma$$

Продовження додатку А

Оскільки ми брали тільки додатню частину інтерферограми для обробки, а функція $I(l)$ є парною, тобто від'ємна і додатня частини інтерферограми є симетричні, то для одержання інтенсивність спектру помножимо відповідні σ значення інтенсивності B на 2:

$$B_{\sigma} =$$

$$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$$

$4.71201 \cdot 10^{-5}$
$3.08115 \cdot 10^{-5}$
$9.88351 \cdot 10^{-6}$
$6.09737 \cdot 10^{-6}$
$9.40296 \cdot 10^{-6}$
$6.7691 \cdot 10^{-6}$
$1.15653 \cdot 10^{-5}$
$1.76478 \cdot 10^{-5}$
$1.48695 \cdot 10^{-5}$
$9.49292 \cdot 10^{-6}$
$7.4299 \cdot 10^{-6}$
$1.39172 \cdot 10^{-6}$
$5.90738 \cdot 10^{-6}$
$3.42748 \cdot 10^{-6}$
$3.38433 \cdot 10^{-6}$
$6.8809 \cdot 10^{-6}$

$$B_{\text{ср}} := \frac{\sum_{\sigma} B_{\sigma}}{16}$$

$$B_{\text{ср}} = 1.20051 \times 10^{-5}$$

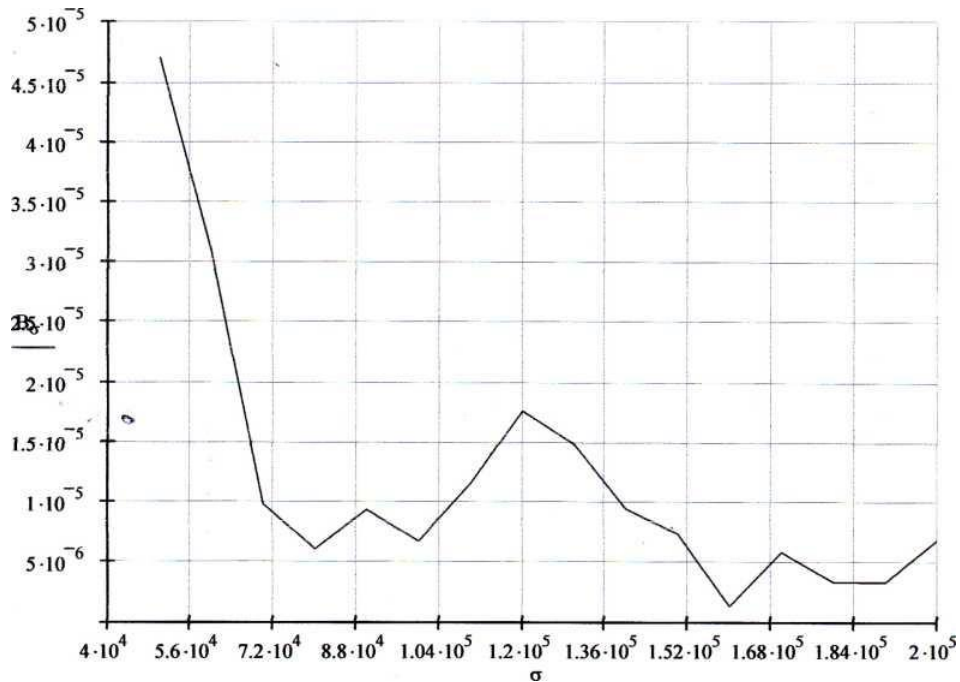


Рисунок А.3 – Залежність інтенсивності спектральної яскравості від хвильового числа

Визначення температури виконаємо за формулою виведеною з закону Планка:

$$c_1 := 3.741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}\cdot\text{м}^2 \quad c_2 := 1.438786 \cdot 10^{-2} \text{ м}\cdot\text{К}$$

$$T_\sigma := \frac{c_2}{\ln \left[\frac{c_1 + B_\sigma \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)^5}{B_\sigma \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)^5} \right]} \cdot \frac{1}{\sigma}$$

25.20656
28.89483
31.68722
34.94874
39.13227
42.38457
46.70433
50.93145
54.26095
57.07823
60.14964
60.77586
66.58274
68.94139
72.22733
76.95002

Просумуємо значення температури:

$$T := \sum_{\sigma} T_\sigma$$

Одержимо температуру в градусах Кельвіна:

$$T = 816.85612 \text{ K}$$

Переведемо її в градуси Цельсія:

$$T_c := T - 273$$

Температура в градусах Цельсія:

$$T_c = 543.85612 \text{ }^\circ\text{C}$$