

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

На правах рукопису

Кривенчук Юрій Павлович

УДК 536.51.083:535-92

**Вимірювання температури за зсувом
частоти комбінаційного розсіювання
світла**

05.11.04 – *прилади та методи вимірювання теплових величин*

Дисертація на здобуття вченого ступеня

Кандидата технічних наук

Наукові керівники:
професор Микитин Ігор Петрович
професор Томас Фрьогліх

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

/Я.Т.Луцик/

Львів-2016

ЗМІСТ

Зміст	2
Перелік умовних скорочень	4
Вступ	5
Розділ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБ'ЄКТІВ МАЛИХ РОЗМІРІВ.....	11
1.1 Метод теплового розширення	12
1.2 Терморезистивний метод	13
1.3 Термоелектричний метод.....	15
1.4 Шумовий метод.....	16
1.5 Акустичний метод.....	18
1.6 Пірометричний метод.....	19
1.7 Метод комбінаційного розсіювання світла	20
1.8 Висновки до першого розділу	25
Розділ 2 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ СХЕМ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	27
2.1 Синтез програмно-математичних моделей похибок та спектрів КРС	30
2.2 Дослідження первинного кола оптичної схеми	33
2.3 Дослідження вторинного кола оптичних схем засобу вимірювання температури	38
2.3.1 Вторинне коло із режекторного фільтром.....	39
2.3.2 Вторинне коло оптичної схеми засобу вимірювання температури полум'я.....	43
2.3.3 Вторинне коло з використанням призми та вузькосмугового фільтра	46
2.3.4 Вторинне коло з використанням мікроскопа та діафрагми	48

2.3.5 Вторинне коло з режекторним фільтром та поляризатором.....	50
2.4 Висновки до розділу	54
Розділ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ЧАСТОТИ АНТИСТОКСОВОЇ КОМПОНЕНТИ СПЕКТРУ КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА.....	56
3.1 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для H_2O	56
3.2 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для Al_2O_3	61
3.3 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для C_6H_{12}	66
3.4 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для гуми	71
3.5 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для $C_{10}H_8$	76
3.6 Висновки до розділу	82
Розділ 4 ГРАДУЮВАННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ПОБУДОВАНОГО НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА	83
4.1 Градуювання засобу вимірювання за температурою	83
4.2 Градуювання засобу вимірювання за спектром	87
4.3 Висновки до розділу	91
Висновки	92
Література.....	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Скорочення, термін, позначення	Пояснення
ЕЧАКС	Еквівалентна частота антистоксової компоненти спектру
КРС	Комбінаційне розсіювання світла
ПП	Первинний перетворювач
АЧТ	Абсолютно чорне тіло
ПК	Персональний комп'ютер

ВСТУП

Науково-технічний прогрес тісно пов'язаний з вдосконаленням засобів та методів вимірювальної техніки. Це в повній мірі відноситься до термометрії, яка безупинно розвивається. Розширюється діапазон вимірювання, розробляються нові методи та засоби вимірювання температури, які володіють необхідними метрологічними характеристиками. Точність дотримання температурного режиму в більшості технологічних процесів є основним параметром, від якого залежить якість кінцевого продукту.

Методи вимірювання температури поділяються на контактні та безконтактні, кожні з яких мають свої переваги та недоліки. Кожен з методів має свою сферу застосування та використовується на сьогоднішній день в народному господарстві, техніці та наукових дослідженнях. До прикладу, контактні методи вимірювання температури змінюють температурне поле досліджуваного об'єкту за рахунок контакту первинного перетворювача та об'єкту вимірювання. Пірометричні методи позбавлені цього недоліку. Однак, засобам пірометрії притаманна методична похибка, пов'язана з тим, що фундаментальні фізичні закони, які лежать в основі їх принципу дії, виконуються лише для абсолютно чорного тіла. Тому пірометричні засоби, що відкалібровані за абсолютно чорним тілом, при вимірюванні температури реального об'єкту покажуть іншу температуру, ніж його дійсна термодинамічна.

Актуальність проблеми. Як в Україні, так і за кордоном широко застосовуються різноманітні вироби та сенсори розроблені на базі мікро та наноструктурованих матеріалів. Розроблено цілий ряд компонентів електронної техніки, які є в сотні разів меншими за своїх попередників. До прикладу, в Японії виготовляються конденсатори на основі наноструктурованих матеріалів, які є за розмірами в 1000 разів менші від аналогічних за ємністю конденсаторів, виготовлених іншими виробниками. В ході виготовлення таких мініатюрних

компонентів електронної техніки необхідно контролювати температуру. Існуючі засоби вимірювань не завжди підходять для вирішення цієї задачі. Тому актуальним є пошук нових методів та засобів вимірювання температури малих об'єктів. Одним із перспективних напрямків для вирішення цієї проблеми є метод комбінаційного розсіювання світла.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в Україні, а саме: за держбюджетною науково-дослідницькою роботою Міністерства освіти і науки України – фаховий напрямок “Метрологія і приладобудування”; тема: “Вимірювання температури мікро- та наноструктурованих об'єктів методом комбінаційного розсіювання світла” (ДБ\КРС, 2015-2016 р., № ДР 0115U000431).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розвиток та вдосконалення методів та засобів безконтактного вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі завдання:

1. Проаналізовано існуючі методи та засоби вимірювання температури.
2. Запропоновано критерії оптимального вибору методу вимірювання температури малорозмірних об'єктів.
3. На основі запропонованих критеріїв підтверджено доцільність застосування методу комбінаційного розсіювання світла для вимірювання температури малорозмірних об'єктів.
4. Проведено дослідження характеристик оптичних схем з метою застосування їх в засобах вимірювання температури на основі методу комбінаційного розсіювання світла.
5. Синтезовано програмно-математичні моделі функцій перетворення оптичних елементів та оптичних схем.
6. Розроблено моделі представлення антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.
7. Досліджено залежності непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла від роздільної здатності за частотою при випадковій, лінійній та нелінійній складових похибки передавальної характеристики елементів оптичної схеми.

8. Досліджено залежності непевності результату вимірювання температури від непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

9. Отримано інтерполяційні залежності температури від еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

Об'єкт дослідження: метод вимірювання температури з використанням ефекту комбінаційного розсіювання світла.

Предмет дослідження: залежність зсуву спектру комбінаційного розсіювання світла від температури.

Методи досліджень. В дисертаційній роботі використовуються загальна теорія інформаційно-вимірювальної техніки, спеціальні розділи фізики, теорія математично-статистичного аналізу випадкових процесів, метод Монте-Карло, методи підвищення точності вимірювальних засобів, теорія похибок та опрацювання результатів вимірювань, методологія оцінювання непевності результатів вимірювань, методи математичного та програмного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше синтезовано програмні моделі антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла, що дає змогу провести теоретичні дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання температури, побудованих на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

2. Вперше отримано залежності непевності визначення температури від непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти для різних матеріалів, що дозволяє поставити вимоги до непевності визначення еквівалентної частоти спектру за заданої непевності вимірювання температури.

3. Вперше отримано залежність непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла від роздільної здатності спектроаналізатора, методу визначення еквівалентної частоти спектру із врахуванням випадкової, лінійної та нелінійної похибок елементів оптичного кола, що дозволяє оптимізувати параметри вхідного кола

засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла, та вимоги до роздільної здатності за частотою спектроаналізатора.

4. Удосконалено програмні моделі функцій перетворення оптичних елементів та оптичних схем, які дозволяють спростити теоретичні дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання температури, побудованих на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

1. Отримано інтерполяційні вирази температурної залежності еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла для різних матеріалів.

2. Запропоновано методи градуювання засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за спектром та температурою, що дозволяє покращити метрологічні характеристики засобу вимірювання.

3. Результати дисертаційних досліджень використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» на кафедрі Інформаційно-вимірювальних технологій у лекційних курсах «Методи та засоби нановимірювань та нанотехнологій», «Нанотехнології та вимірювальна техніка» та «Основи термометрії», при проведенні лабораторних, практичних і науково-дослідних робіт студентів.

Особистий внесок здобувача. Більшість теоретичних та експериментальних досліджень виконано автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належить участь у визначенні задач, теоретичних дослідженнях, розробленні способів та методів, моделюванні, а також в експериментальній перевірці та реалізації результатів досліджень. Зокрема: [1] – розроблено схему вимірювання температури кремнієвої підкладки в реакторі іонно-плазмового напилення з використанням термометра випромінювання; [2] – проведено експериментальні дослідження, проаналізовано основні похибки вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла; [3] – досліджено вплив геометричної

форми досліджуваного об'єкту на похибку вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла; [4] – на основі експериментальних даних досліджено залежність зсуву частоти комбінаційного розсіювання світла від температури; [5] – досліджено залежності похибки вимірювання температури від багатомодовості джерела когерентного монохроматичного світла; [6] – досліджено вплив відстані між досліджуваним об'єктом та оптичним входом спектрофотометра на похибку вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла; [7] – синтезовано програмну модель та досліджено непевності визначення частоти зсуву комбінаційного розсіювання світла трьома методами (пікової інтенсивності, медіанним, центру мас); [8] – побудовано програмно-математичну модель розподілу температури твердого тіла. Внесок автора в цих роботах був визначальним. У процесі виконання науково-дослідних робіт, під час розроблення та реалізації схем, макетів пристроїв було залучено співавторів. У цих випадках частка участі здобувача відображена у звітах та відзначена у відповідних документах.

Апробація роботи

Деякі основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах.

1. ІХ Міжнародна науково-технічна конференція “Методи і засоби вимірювань фізичних величин” – “Температура-2012”, Львів. – 2012.
2. Міжнародна науково-технічна конференція “Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань” - “Системи - 2013”, Львів. – 2013.
3. XIX Międzynarodowa konferencja metrologów MKM'2014 , Gdańsk – Sztokholm , 2014.
4. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2015», м. Славське 2015.

5. 20-th International Jubilee Modeling School of AMSE-UAPL Ukraine, Shatsk, 2015.
6. Міжнародна науково-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: Досвід, проблеми та перспективи», Львів, 2015.
7. Всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті”, м. Львів 2015.
8. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2016», м. Славське 2016.

Публікації

За тематикою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, серед яких 8 статей у наукових журналах та збірниках наукових праць; з них 8 праць опубліковано у фахових виданнях, а три з них в наукометричних виданнях «Метрологія та прилади. 2013. № II (40). ISSN 2307-2180, с. 215 – 219», «Технічні вісті, 2015/1(41), 2(42), ISSN 1992-8149, e-ISSN 2412-5709, с.67-70» «Sensors & Transducers, Vol. 189, Issue 6, June 2015, pp. 116-120», індексованих в Scopus.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБ'ЄКТІВ МАЛИХ РОЗМІРІВ

У сучасній термометрії застосовується велике розмаїття методів та засобів, що спричинене особливостями температури, як вимірюваного параметру, а також експлуатаційними вимогами до засобів вимірювання, діапазоном вимірюваних температур, специфікою об'єктів та умов вимірювання, особливістю фізичних характеристик і використовуваних термометричних властивостей чутливих елементів первинних перетворювачів (ПП) [1, 2, 3, 4].

Стрімкий розвиток нанотехнологій характеризується створенням нових матеріалів, мікро- та наноструктурованих об'єктів, які знаходять широке застосування у різних галузях науки, техніки і промисловості. Для належного перебігу технологічного процесу при виготовленні таких матеріалів необхідно забезпечити вимірювання та жорсткий контроль температури. При цьому зрозуміло, що до засобів вимірювання температури таких об'єктів ставляться високі метрологічні та експлуатаційні вимоги.

Реалізація процесу коректного вимірювання температури для кожного конкретного випадку вимагає докладного аналізу умов теплової взаємодії системи об'єкт-термометр. В більшості випадків під час вимірювання температури однозначно змінюється теплова картина досліджуваного об'єкту [5, 6]. Тому необхідним є проведення оцінки недоліків та переваг методів та засобів вимірювання температури для визначення найбільш оптимальних методів для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

На практиці знайшли широке застосування такі методи вимірювання температури:

- теплового розширення;

- терморезистивний;
- термоелектричний;
- шумовий;
- акустичний;
- пірометричний;
- комбінаційного розсіювання світла.

1.1 Метод теплового розширення

Метод теплового розширення базується на залежності геометричних розмірів об'єкта від температури. Теплове розширення притаманне усім речовинам у всіх агрегатних станах. Коли речовина нагрівається, її частинки починають інтенсивніше рухатися, що приводить до збільшення середніх відстаней між ними. [1, 4, 8, 9, 12]. Засоби вимірювання температури на основі теплового розширення можуть використовувати ефект як лінійного так і об'ємного розширення. У таблиці 1.1 представлено перелік типових засобів вимірювання температури, які ґрунтуються на ефекті теплового розширення, та їх основних метрологічних та технічних характеристик.

Таблиця 1.1. Засоби вимірювання температури, які ґрунтуються на ефекті теплового розширення

Назва	Принцип роботи	T, °C	δT , %	Інерційність, с
ТБУ-100	Прогинання пластини	0...+200	2,5;	20
Watts T63/50 (F+R801 OR 63mm 0-120°C)		0...+120	2	20
ТТЖ, ТТЖ-У, ТСЖТ, СП-2	Зміщення меніску у капілярі	-35...+50	1	10
ТТЖ М		0...+100	1	10

Продовження таблиці 1.1

ТКП-160СГ- М2-УХЛ2	Об'ємне розширення	0...+120	1,5	20
ТКП-160СГ- М2-Т2		+100...+200	2,5	20
ТКП-160СГ- М2-ТВ3		+200...+300	2,5	20
ТКП-160СГ- М1-УХЛ2		0...+120	1,5	20
ТКП-160СГ- М1-Т2		+100...+200	2,5	20
ТКП-160СГ- М1-ТВ3		+200...+300	2,5	25

Переваги методу:

- зручність застосування;
- відносно широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- складне конструктивне виконання;
- невисока точність;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень.

1.2 Терморезистивний метод

Принцип дії терморезистивних первинних перетворювачів базується на використанні властивості зміни електричного опору матеріалів в функції зміни температури. Для створення терморезистивних первинних перетворювачів використовуються матеріали, які мають значний питомий електричний опір, високу стабільність температурного коефіцієнту електричного опору, високу відтворюваність електрофізичних параметрів, стабільність хімічних і фізичних властивостей при нагріванні та є інертні до впливу досліджуваного середовища.

У таблиці 1.2 представлено основні типові терморезистивні засоби вимірювання температури, та їх основні метрологічні та технічні характеристики.

Таблиця 1.2. Основні типи терморезистивних засобів вимірювання температури

Назва	T, °C	$\Delta \cdot T$, °C	Інерційність, с
ЕЧМ-0183	-50...150	$(0.50C + 6.5 \times 10^{-3} t)$	9
ТОМІ-0591	-30...60	$(0.250C + 3.5 \times 10^{-3} t)$	240
ТСМ-0890	-50...150	$\pm(0,25+0,0035 t)$	20
ТСМ-1290	-50...150	$\pm(0,25+0,0035 t)$	120
ТСМ-0987	-50...100	$(0.250C + 3.5 \times 10^{-3} t)$	70
ТСМР-1291	0...100	$(0.250C + 3.5 \times 10^{-3} t)$	20
ТСМ-8045P	-50...75	$(0.50C + 6.5 \times 10^{-3} t)$	15
ЕЧП-0183	-200...750	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	1,5
ТСП-341-01	0...400	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	20
ТСП-1388	-50...120	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	3
ТСП-1290	-50...150	$\pm(0,3+0,005 t)$	120
ТСП-0690	-50...150	$\pm(0,3+0,005 t)$	10
ТСП-1390	50...400	$\pm(0,3+0,005 t)$	20
ТСП-8045P	-50...75	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	15
ТСП-8050	-40..40 (повітря) -2...35 (вода)	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	150
ТСП-8052	-200...600	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	8
ТСП-0690	-50...150	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	10

Переваги методу:

- зручність застосування;
- широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- наявність саморозігрівання чутливого елементу;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень

1.3 Термоелектричний метод

Для вимірювання температури, зокрема, об'єктів малих розмірів застосовують термоелектричні первинні перетворювачі, в основі роботи яких лежить термоелектричний ефект, а саме: в замкнутому контурі з двох різнорідних напівпровідників або провідників виникає е.р.с., у разі, якщо місця з'єднань перебувають за різних температур. У таблиці 1.3 представлено типові термоелектричні засоби вимірювання температури та їх метрологічні та технічні характеристики.

Таблиця 1.3. Типові термоелектричні засоби вимірювання температури

Назва	T, °C	ΔT , °C	Інерційність, с
ТХА-1090	-50...400	До 333 °C $\pm 2,5$ понад 333 °C $\pm 0,0075t$	30
ТХК-1090	-50...400	До 300 °C $\pm 2,5$ понад 300 °C $\pm 0,0075t$	30
ТХК-1190	-50...400	До 300 °C $\pm 2,5$ понад 300 °C $\pm 0,0075t$	5
ТХА-1590	-50...400	- 50 °C ... 375 °C $\pm 1,5$ понад 375 °C $\pm 0,004 t $	0,3
ТХК-1590	-50...400	- 50 °C ... 375 °C $\pm 1,5$ понад 375 °C $\pm 0,004 t $	0,3
ТХА-1690	-50...400	- 50 °C ... 333 °C $\pm 1,5$ понад 333 °C $\pm 0,0075 t $	1,0
ТХК-1690	-50...400	- 50 °C ... 300 °C $\pm 1,5$ понад 300 °C $\pm 0,0075 t $	1,0
ТХК-2388	-40...600	0,7+0,005 t	180
ТХК-2988М	-40...550	0,7+0,005 t	60
ТХК-3088	0...300	2,5	5
ТПП-1788	0...1300	1,5	5
ТВР-301-01	1200...1550	$\pm 0,004t$	5
ТПР-1988	600...1600	$\pm 2,40C$	50
ТВР-0688	1200...1800	$\pm 0,004t$	2
ТПР-0573	600...1350	$\pm 2,40C$	180
ТПР-0290	1000...1800	$\pm 0,004t$	2

Таким чином вихідна напруга термопарі залежать від різниці температур її злютів (робочого злюту та злюту порівняння).

Переваги методу:

- зручність застосування;
- широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- необхідність термостатування температури злютів порівняння;
- незначний вплив теплопровідності матеріалів термоелектродів на результат вимірювання;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень

1.4 Шумовий метод

До контактних методів вимірювання температури також належить і шумовий метод, в основі якого лежить отримана Х. Найквістом залежність середнього значення квадрату шумової напруги (СЗКШН) на електрично ненавантаженому опорі від температури, що отримана методом статистичної термодинаміки незалежно від конкретних фізико-хімічних властивостей матеріалу первинного перетворювача.

У таблиці 1.4 представлено основні методи вимірювання СЗКШН, що базуються на використанні шумового методу.

Таблиця 1.4. Основні засоби вимірювання температури, що базуються на використанні шумового методу.

Метод вимірювання СЗКШН	Т, К	δT , %	Швидкодія
Імпульсний порівняння	77 - 273К	± 0.1 К	
Імпульсний порівняння	273 - 900К	$\pm 0.1 - 0.3$ К	28 с
Кореляційний порівняння	800 - 2500К	$\leq \pm 1\%$	10 с

Продовження таблиці 1.4

Кореляційний порівняння	2 - 4К	$\leq \pm 0.01\%$ $\pm 0.3\text{мК}$	9 год
Кореляційний порівняння	4 - 1600К	$\pm 1\%$ $\pm 0.01\%$	2 с 12 циклів по 8 год
Кореляційний прямого вимірювання	273-473К	$\pm 10\text{мК}$ (оцінка)	60 год
Кореляційний прямого вимірювання	273 - 373К	$\pm 3\text{К}$	0.25 год
Потужність шуму	725 - 1275К	$\pm 1\%$	10 с
Потужність шуму	725 - 1275К	$\pm 0.5\%$	1 - 100 с
Детектор rf-SQUID	2.2мК - 4.2К	$\pm 10\% \pm$ $\pm 1\%$	1200 с 4000 с
Детектор rf-SQUID	1 - 4.2К 4.2 - 7.2К	$\pm 0.23\%$ $\pm 0.2\%$	5 год 3.5 год
Детектор rf-SQUID	0.2 - 0.4К	$\pm 0.22\%$	0.5 год
Порівняння	4 - 300К	$\leq \pm 1\%$	5 с
Порівняння	500 - 1000К	$\pm 0.02\%$ (оцінка)	

Переваги методу:

- результат вимірювання температури не залежить від матеріалу чутливого елемента первинного перетворювача.
- Широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- низька завадостійкість засобу вимірювання за рахунок незначного рівня вихідного сигналу первинного перетворювача;
- тривалий час вимірювання;
- додаткова похибка за рахунок залежності опору від температури;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень.

1.5 Акустичний метод

Акустична термометрія базується на температурній залежності швидкості поширення акустичних коливань у речовині. При цьому, в якості первинного перетворювача можуть використовувати як гази так і рідини і тверді речовини. Діапазон вимірювання визначається стійкістю матеріалу чутливого елемента первинного перетворювача до температури та можливістю поширення у матеріалі акустичних коливань.

Акустичні перетворювачі температури використовуються переважно для вимірювання середніх і високих температур та складаються з випромінювача і приймача акустичних хвиль (просторово рознесених). Термометри такого типу серійно не виготовляються, існують лише лабораторні та одиничні варіанти реалізації засобу вимірювання. В таблиці 1.5 представлено типові характеристики засобів вимірювання температури акустичним методом.

Таблиця 1.5. Типові характеристики засобів вимірювання температури акустичним методом

Агрегатний стан чутливого елемента	T, °C	δT , %	Інерційність, мс
Твердий	-200...3000	0,1	2
Рідкий			
Газоподібний			

Переваги методу:

- широкий діапазон вимірювання температури;
- можливість довготривалої роботи в агресивних середовищах тривалий час;
- в якості первинного перетворювача може використовуватися сам об'єкт вимірювання;

Недоліки методу:

- необхідність індивідуального градування первинного перетворювача.

1.6 Пірометричний метод

В основі пірометрії лежить формула Планка, яка описує залежність спектральної густини енергії потоку випромінювання абсолютно чорного тіла від температури та довжини хвилі. Найпоширенішими є такі типи засобів пірометрії:

- візуальні оптичні;
- повного випромінювання (радіаційні);
- часткового випромінювання;
- спектрального відношення.

Серед згаданих вище пірометрів найбільш перспективними з метрологічної точки зору є пірометри спектрального відношення, оскільки для них вплив невизначеності реального числового значення коефіцієнта випромінюючої здатності об'єкта незначно впливає на результат вимірювання.

Пірометричним методам вимірювання температури властиві методичні похибки, які постають у зв'язку з тим, що фізичні закони, які лежать в основі цих методів, справджуються лише для абсолютно чорного випромінювача. Будь-яке фізичне тіло випромінює енергії менше ніж чорне тіло, нагріте до тієї ж температури, а тому - пірометричні засоби для вимірювання температури, відградувані за моделлю абсолютно чорного тіла, покажуть меншу температуру, ніж дійсна термодинамічна.

У таблиці 1.6 представлено основні характеристики типових засобів вимірювання пірометрії.

Таблиця 1.6. Основні характеристики типових засобів вимірювання пірометрії.

<i>Назва</i>	<i>T, °C</i>	<i>δT, %</i>	<i>Інерційність, с</i>
ПП-1	-20...+2000	± 1	1.0
ПТ-1	-40...1100	± 1	0,5
ПД-9	400...1400	±1	1.0, 0.2, 0.1
СТ-2	300...2000	±1	1.0, 0.2, 0.1
ПД-4	800...2500	± 0.5 ± 0.2	1.0, 0.2, 0.1, 0.05
ПД-5	400...1400	± 0.5	0.5
ПД-6	300...1000	± 0.5	1.0, 0.2, 0.1, 0.05
ПД-7	300...2500	± 0.5	1.0, 0.2, 0.1, 0.05
ПД-10	300...2500	± 1	1.0, 0.2, 0.1, 0.05

Переваги методу:

- можливість вимірювання, зокрема надвисоких температур;
- не спотворюється температурне поле об'єкта досліджень;
- можливість вимірювання температури віддалених та важкодоступних об'єктів.

Недоліки методу:

- відсутність інформації про реальне значення коефіцієнта випромінюючої здатності об'єкта суттєво збільшує похибку вимірювання температури.
- вплив оптичних властивостей середовища на результат вимірювання температури.

1.7 Метод комбінаційного розсіювання світла

Метод базується на залежності параметрів спектру комбінаційного розсіювання світла (КРС) від температури [75]. Спектри комбінаційного розсіювання проявляються при електронній поляризації молекул, яка викликана ультрафіолетовим або видимим світлом (100-800 нм). При цьому поляризує

випромінювання не повинно поглинатися досліджуваною речовиною і має бути монохроматичним (до прикладу лазер). У спектрі комбінаційного розсіювання коливальні частоти спостерігаються у вигляді комбінаційних зміщень лінії з частотою ν_0 (частота поляризованого випромінювання) [9, 30, 63]. Взаємодіючи з фотоном $h\nu_0$ молекула збуджується до нестійкого стану. Більшість збуджених частинок швидко релаксують – повертаються в основний стан, випромінюючи квант $h\nu_0$, що відповідає релеївському розсіюванню (рисунок 1.).

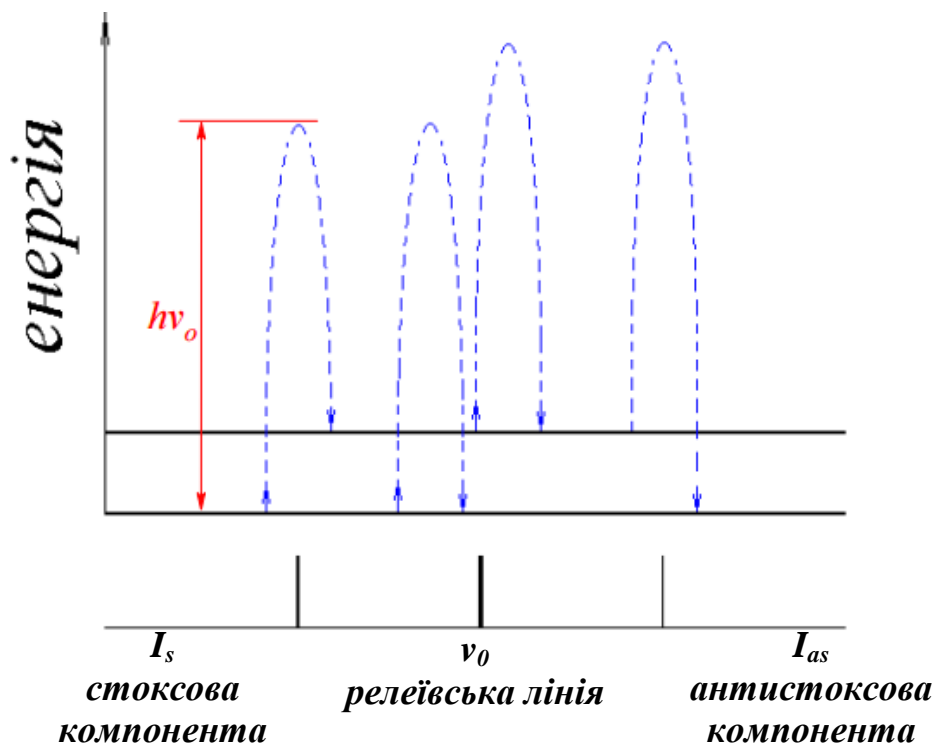


Рисунок 1.1 - Енергетичні переходи молекул в процесі комбінаційного розсіювання світла [74].

Однак частина збуджених молекул релаксують не до основного, а до першого збудженого коливального стану. При цьому випромінюється квант з меншою енергією: $h(\nu_0 - \nu_i)$, що відповідає у спектрі стоксовій компоненті. Якщо до взаємодії з фотоном молекула була у збудженому коливальному стані, то при релаксації може повернутись до основного коливального рівня, випромінюючи квант з більшою енергією: $h(\nu_0 + \nu_i)$, що відповідає у спектрі антистоксовій компоненті (рисунок 1.).

Засоби вимірювання температури на основі методу КРС можна побудувати за такими залежностями:

1. залежності температури від співвідношення інтенсивностей стоксової (I_s) та антистоксової (I_{as}) компонент спектру КРС;
2. залежності зсуву частоти КРС від температури;

Обидва способи мають методичну похибку вимірювання температури, яка пов'язана із нагріванням досліджуваного об'єкту лазерним променем. Під час вимірювання температура досліджуваного об'єкту постійно зростає за рахунок енергії отриманої від лазерного променя.

При використанні першого способу спочатку вимірюється стоксова, а потім антистоксова компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла. Загальний час вимірювання може сягати до 40 с. Тому вимірювання антистоксової компоненти відбувається за іншої температури досліджуваного зразка, що призводить до суттєвого зростання методичної похибки вимірювання температури методом КРС.

У другому способі вимірюється лише антистоксова компонента спектру КРС (рисунок 1.2), яка із зміною температури змінює значення ЕЧАКС КРС.

Час вимірювання зменшується, як мінімум вдвічі порівняно з першим методом, зменшується нагрів досліджуваного об'єкту лазерним променем, що дає змогу зменшити методичну похибку вимірювання температури методом КРС. Відомо, що при температурах 300÷400 К інтенсивність антистоксової лінії дуже мала, тому метод термометрії за відношенням I_s / I_{as} менш зручний, аніж метод за зсувом частоти КРС [37, 38, 39].

З вимірювальних характеристик термометрії КРС найбільш важливою є висока просторова роздільна здатність, яка близька до половини довжини хвилі зондуємого світла. При іонному або електронному бомбардуванні поверхні можлива генерація нерівноважних фотонів. При цьому інтенсивність антистоксової лінії КР може істотно збільшитися, що проявиться в аномально низькому відношенні I_s / I_{as} для даної температури.

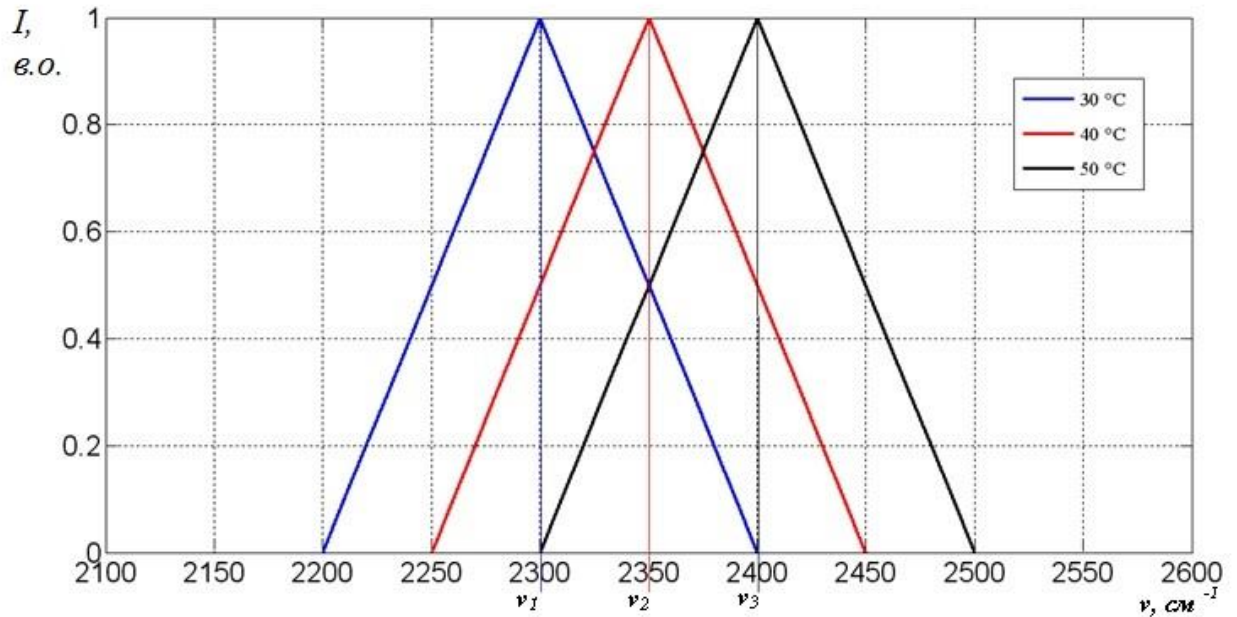


Рисунок 1.2 - Залежність зсуву ЕЧАКС КРС від температури

Проблема реєстрації таких станів полягає в тому, що при зіткненні однієї частинки з поверхнею нерівність локалізована в дуже малих просторово-часових інтервалах (на довжинах порядку 10^{-7} см і часі 10^{-12} с), і при усередненні за площею зонduючого пучка і за часом зондування реєстрований ефект може бути надзвичайно малий [39, 60, 61].

При використанні комбінаційного розсіювання для діагностики іноді виникають суттєві проблеми з реєстрацією спектру розсіяного випромінювання, яка ведеться в режимі рахунку фотонів, внаслідок дуже низької ефективності спонтанного комбінаційного розсіювання, доводиться скорочувати час накопичення сигналу, застосовувати більш потужніший лазер, але при цьому важче виділити слабкий сигнал на фоні шумів. Ще може призводити до нагрівання досліджуваного зразка. Для термометрії поглинаючих зразків малої теплоємності застосування потужного лазера можливо при високих температурах, коли потужність теплових джерел, що нагрівають і охолоджують зразок, значно вища від потужності зонduючого пучка, що поглинається в зразку [33, 36, 38].

Переваги методу:

- не залежить від стану поверхні досліджуваного об'єкту;
- можливість вимірювання температури у віддалених та трудно доступних місцях;
- завадостійкість до електромагнетних полів.

Недоліки методу:

- методична похибка вимірювання температури за рахунок нагрівання досліджуваного об'єкту лазером.

В таблиці 1.7 представлено переваги та недоліки проаналізованих вище методів вимірювання температури.

Таблиця 1.7. Переваги та недоліки найбільш поширених методів вимірювання температури

<i>Метод вимірювання температури</i>	<i>Переваги методу</i>	<i>Недоліки методу</i>	
Теплове розширення	Зручність застосування, широкий діапазон вимірювання	Складне конструктивне виконання, невисока точність	Спотворює температурне поле об'єкта досліджень
Терморезистивний		Значний коефіцієнт саморозігріву	
Термоелектричний		Необхідність термостатування температури з'єднань порівняння, тепловідвід вздовж термоелектродів	
Теплових шумів	Проблеми реалізації завадостійкої лінії зв'язку,		
Акустичний метод	Результат вимірювання не залежить від використовуваного робочого тіла	Складність реалізації первинного перетворювача	

Продовження таблиці 1.7

Пірометричний метод	Можливість вимірювання, зокрема, надвисоких температур; не спотворює температурне поле об'єкта досліджень; можливість вимірювання температури віддалених та важкодоступних об'єктів	Відсутність інформації про реальне значення коефіцієнта випромінюючої здатності об'єкта, що суттєво збільшує похибку вимірювання температури; вплив оптичних властивостей середовища на результат вимірювання температури
Метод комбінаційного розсіювання світла	Не залежить від стану поверхні досліджуваного об'єкту; можливість вимірювання температури у віддалених та трудно доступних місцях; завадостійкість до електромагнетних полів.	Методична похибка вимірювання температури за рахунок нагрівання досліджуваного об'єкту лазером.

Враховуючи результати проведеного аналізу, переваги та недоліки розглянутих методів, для вирішення поставленої мети оптимальним та перспективним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти антистоксової компоненти спектру.

1.8 Висновки до першого розділу

1. Проведено аналіз основних переваг та недоліків контактних і безконтактних методів вимірювання температури. Проаналізовано можливість їх застосування для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

2. Враховуючи результати проведеного аналізу, для вимірювання температури об'єктів малих розмірів оптимальним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла.

3. Для реалізації засобу вимірювання температури об'єктів малих розмірів доцільним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти антистоксової компоненти спектру, що забезпечує зменшення часу вимірювання та методичної похибки.

РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ СХЕМ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Враховуючи проведений в першому розділі аналіз, для розроблення засобу вимірювання температури на основі методу комбінаційного розсіювання світла оптимальним є застосування способу, який ґрунтується на температурній залежності частоти КРС. Це дає змогу покращити метрологічні характеристики засобів вимірювання температури та зменшити час вимірювання.

Структурна схема засобу вимірювання температури за зсувом частоти КРС (рисунок 2.1), складається з лазера, оптичної схеми та спектроаналізатора. Оптична схема умовно поділяється на дві частини: первинне коло (оптичні елементи які розташовані до досліджуваного об'єкту) та вторинне коло (оптичні елементи які розташовані після досліджуваного об'єкту).

Гранична похибка вимірювання температури таким засобом становить:

$$\delta T = \delta_m + \delta_l + \delta_{пк} + \delta_{вк} + \delta_{са} \quad (2.1)$$

де δ_m – відносна методична похибка, δ_l – відносна частотна похибка лазера, $\delta_{пк}$ – відносна похибка первинного оптичного кола, $\delta_{вк}$ – відносна похибка вторинного оптичного кола, $\delta_{са}$ – відносна похибка спектроаналізатора.

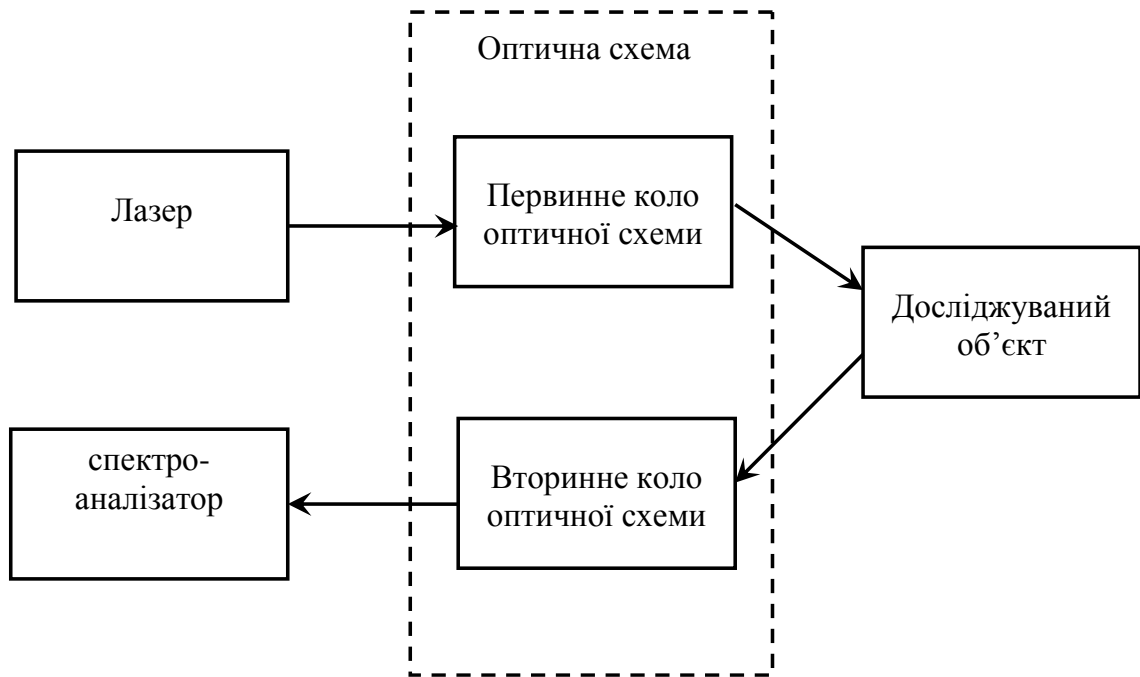


Рисунок 2.1. Структурна схема засобу вимірювання температури на основі комбінаційного розсіювання світла

У таблиці 2.1 наведено основні метрологічні характеристики спектроаналізаторів, а у таблиці 2.2 – технічні характеристики лазерів.

Таблиця 2.1. Метрологічні характеристики спектроаналізаторів

Назва приладу	Спектральний діапазон вимірювання	Відносна похибка	Ціна, грн
СФ-46	190-1100 нм	1%	30 000
ПЭ-5300ВИ	315-1000 нм	0.5%	40 695
MS 3501i	267-800 нм	0.5%	405 000
EnSpectr R532	400-528 нм	0.02%	1 320 000
X-Rite Color i 7	360-750 нм	0.01%	16 890 000

Таблиця 2.2. Метрологічні характеристики лазерів

Назва лазера	Потужність	Частота	Відносна похибка за частотою
HeNe-Laser G040813000	15 мВт	632.8 нм	0.00008 %
HeNe-Laser G040809000	10 мВт	632.8 нм	0.00003 %
HeNe-Laser G040801000	0,6 мВт	632.8 нм	0.00015 %
HeNe-Laser G040807000	5 мВт	632.8 нм	0.00003 %

За результатами досліджень мінімальна похибка спектроаналізатора становить 0.01%, а похибка лазера - 0.003%. Методична похибка була досліджена в роботі [158]. Також спираючись на дану роботу досліджено залежність методичної похибки від часу вимірювання (рисунок 2.2) та залежність методичної похибки від потужності лазера та тривалості вимірювання представлено на рисунок 2.2.

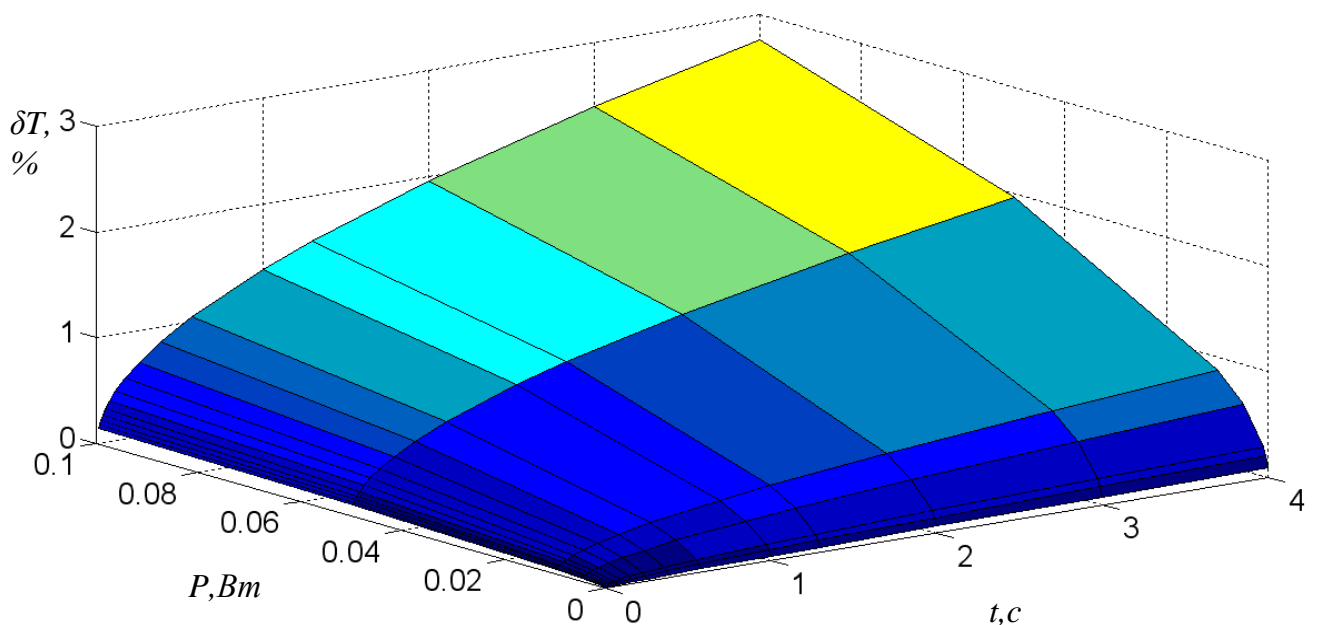


Рисунок 2.2. Залежність методичної похибки від потужності лазера та тривалості вимірювання

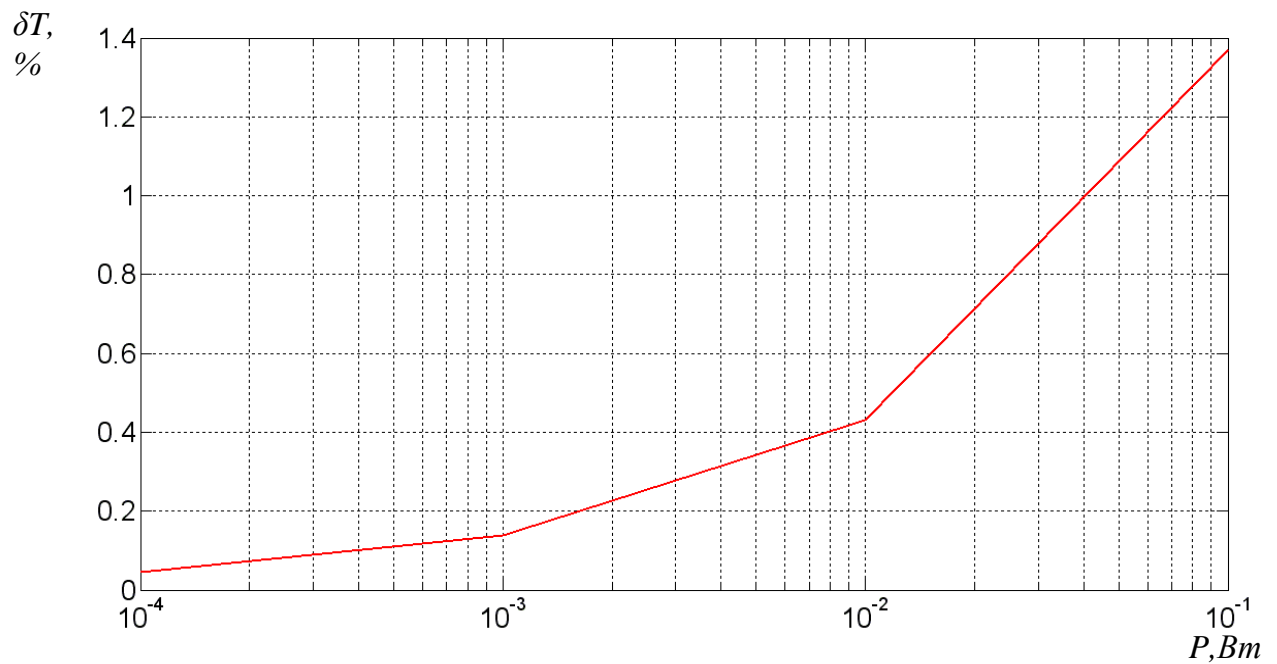


Рисунок 2.3. Залежність методичної похибки від потужності лазера за тривалості вимірювання 1с

Враховуючи вираз (2.1) основну увагу потрібно приділити дослідженню похибок первинного та вторинного кола оптичної схеми та похибки експериментального визначення залежності ЕЧАКС КРС від температури.

2.1 Синтез програмно-математичних моделей похибок та спектрів КРС

Реальні спектри КРС мають різну форму [74, 75, 76, 77, 78], серед них найчастіше зустрічаються спектри, близькі до прямокутної, трикутної, трапецієподібної та пилкоподібної форми. Приклади спектрів КРС наведено на рисунку 2.4.

Для дослідження моделей функцій перетворення оптичних елементів та вторинних кіл оптичних схем синтезовано моделі спектрів КРС різних форм (рисунок 2.5) із такими характеристиками:

- прямокутний з координатами (1к, 2к, 3к, 4к) за частотою 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2200 см^{-1} , 3к - 2400 см^{-1} , 4к - 2400 см^{-1} ;
- трапецієподібний 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2250 см^{-1} , 3к - 2350 см^{-1} , 4к - 2200 см^{-1} ;
- трикутний 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2300 см^{-1} , 3к - 2400 см^{-1} ;
- пилкоподібний 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2200 см^{-1} , 3к - 2400 см^{-1} .

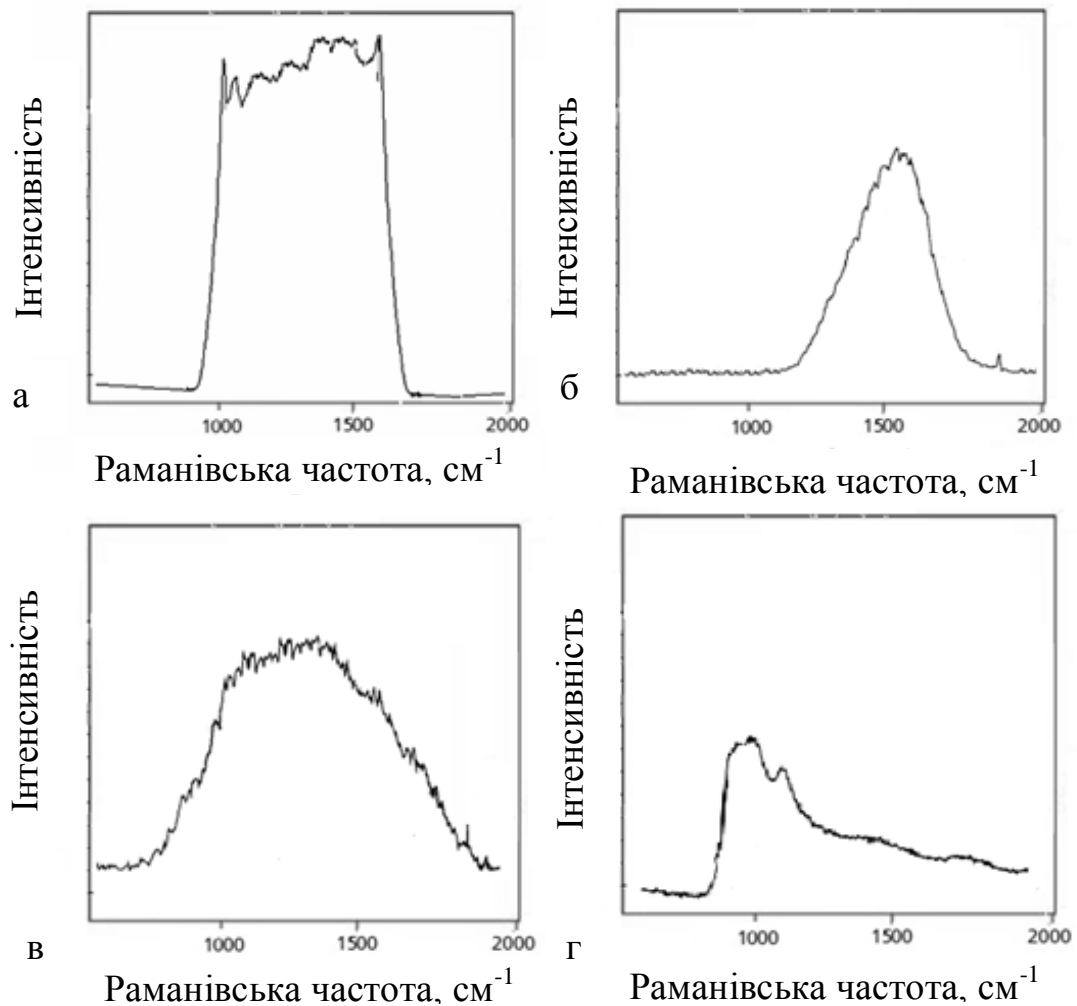


Рисунок 2.4 - Форми спектрів КРС [74, 75, 76, 77]

Моделі дозволяють змінювати ширину спектрів КРС.

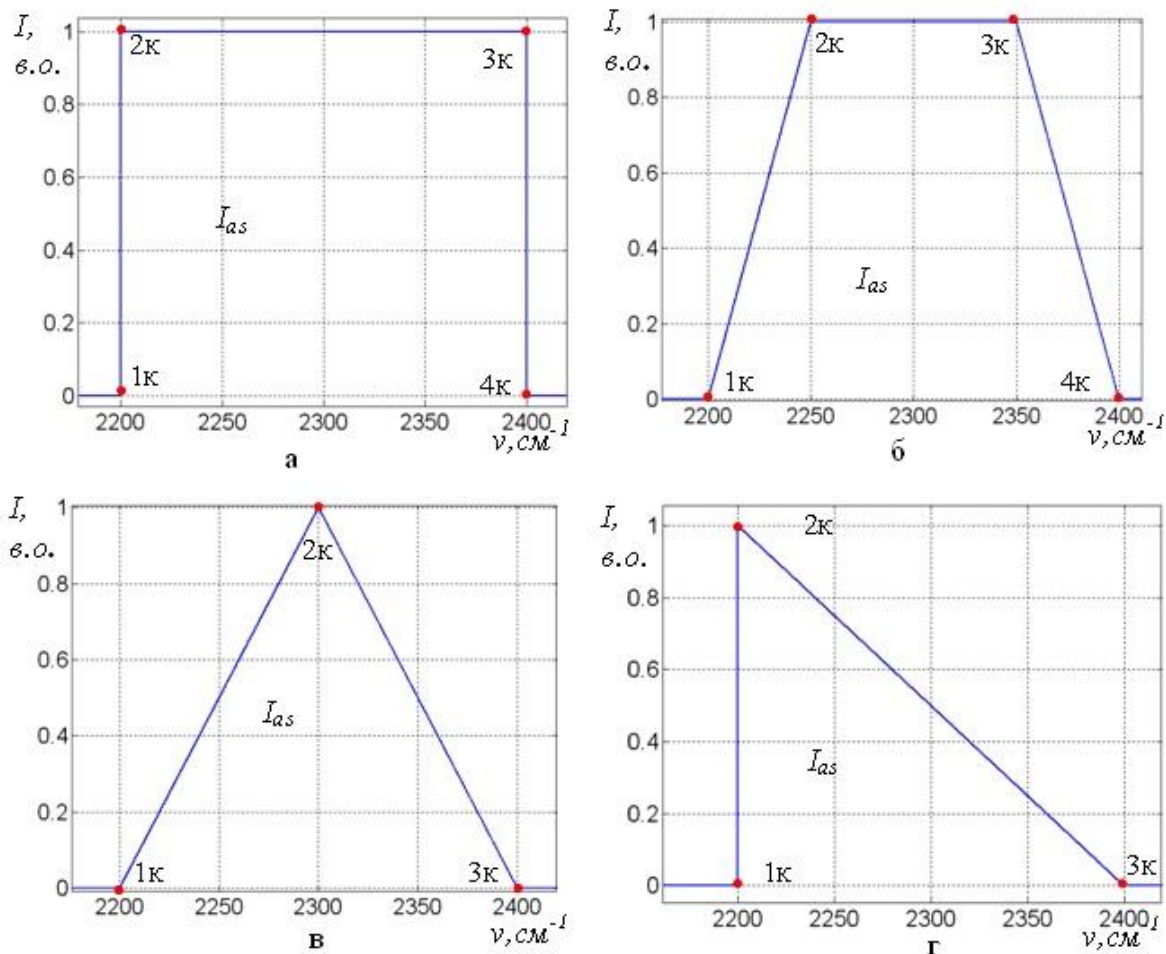


Рисунок 2.5 - Моделі спектрів КРС (а) прямокутний, (б) трапецієподібний, (в) трикутний, (г) пилкоподібний

ЕЧАКС КРС можна визначити двома методами:

- методом центру мас,
- медіанним методом.

Всі функції перетворення оптичних елементів досліджувалися із врахуванням лінійної, нелінійної, випадкової складових похибки та моделей спектрів КРС.

2.2 Дослідження первинного кола оптичної схеми

Лазерне випромінювання, проходячи крізь первинне коло оптичної схеми, може змінитися за інтенсивністю, оскільки пропускна здатність оптичних елементів не дорівнює 1 (100%). Кожен оптичний елемент має індивідуальну передавальну характеристику. Зміна значення інтенсивності лазерного променя не змінює форму спектру КРС [79], а лише пропорційно зменшує або збільшує інтенсивність частотних складових КРС.

Враховуючи сказане вище, проведено дослідження впливу інтенсивності лазерного випромінювання на значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру (ЕЧАКС) КРС. Значення ЕЧАКС КРС визначалось методом центру мас.

На рисунку 2.6 представлено результати дослідження залежності значення ЕЧАКС КРС від інтенсивності лазерного випромінювання для прямокутної моделі спектру КРС з урахуванням сумарної похибки функції перетворення елементів оптичної схеми.

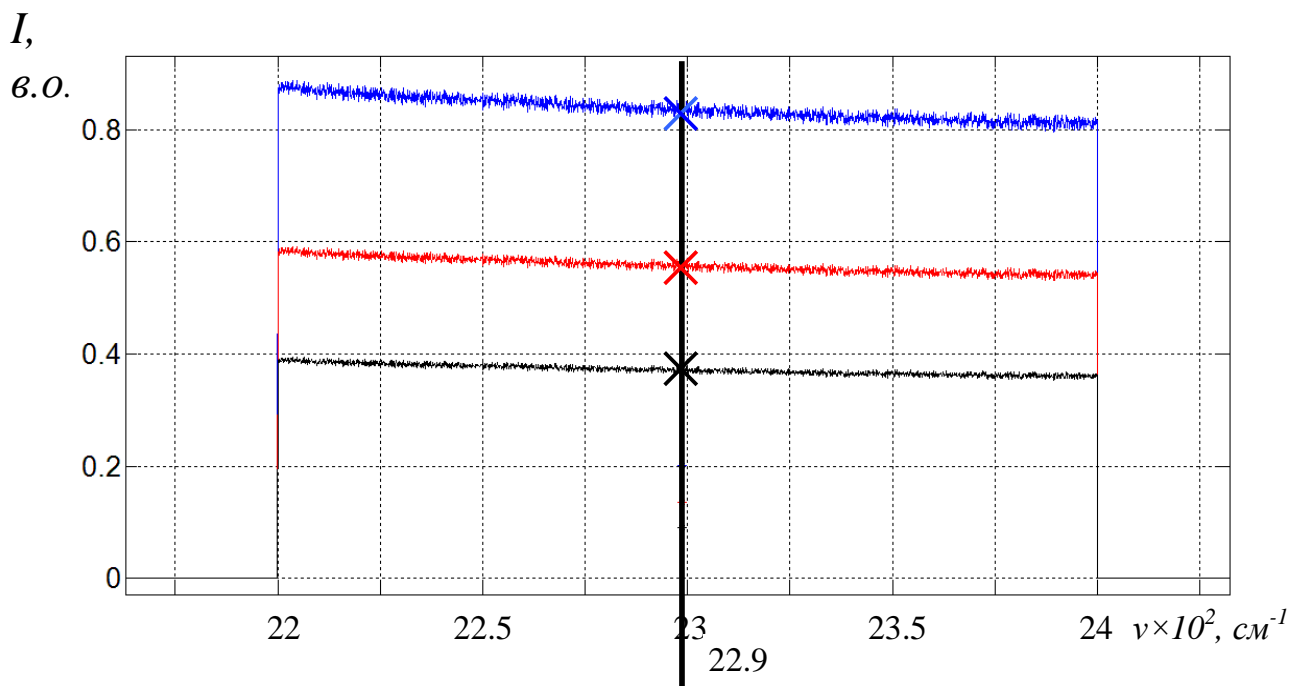


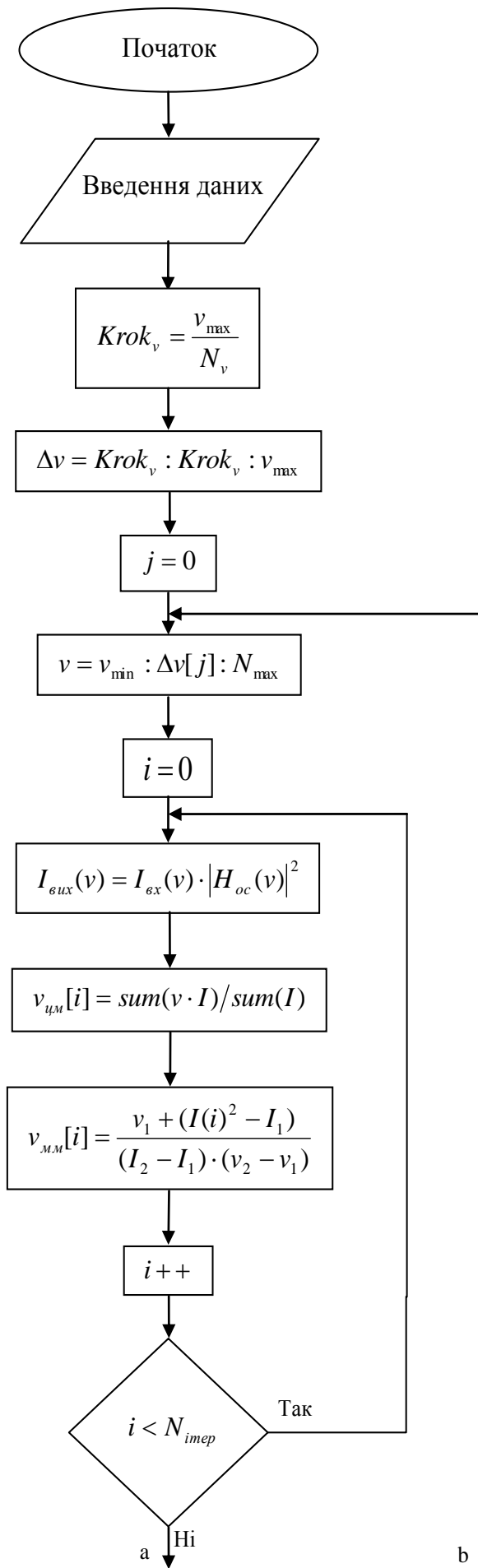
Рисунок 2.6 - Залежність ЕЧАКС КРС від інтенсивності випромінювання лазера

Дослідження проводилося за таких параметрів: ширина спектру 2200-2400 cm^{-1} , випадкова складова похибки передавальної характеристики оптичних елементів - 1%, лінійна складова - 5%, нелінійна складова 5%. Рівень послаблення сигналу – 10%, 40%, 60%. Роздільна здатність за частотою 1 cm^{-1} .

Значення ЕЧАКС КРС розраховувалося методом центру мас для кожного з спектрів. Для кожного з досліджуваних спектрів, які відрізнялися лише за рівнем послаблення сигналу, а значення кожної гармоніки спектрів пропорційно змінювалися відносно рівня послаблення сигналу, отримане значення ЕЧАКС КРС було однакове, а саме 2290 cm^{-1} . Таким чином, проведені дослідження показали, що зміна інтенсивності лазерного променя не впливає на похибку визначення значення ЕЧАКС КРС.

Враховуючи, що складові похибки вимірювання в (2.1) δ_m , δ_l , δ_{ca} є відомими, а похибка первинного оптичного кола δ_{nk} не впливає на похибку визначення значення ЕЧАКС КРС, доцільно є досліджувати вторинні кола оптичних схем (похибка вторинного оптичного кола δ_{bk}).

Для дослідження непевності знаходження еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС двома методами синтезовано програмну модель, алгоритм роботи якої представлено на рисунку 2.7. В алгоритмі використовуються такі позначення: $Krok_v$ – роздільна здатність за частотою спектроаналізатора; v_{max} – максимальне значення роздільної здатності; v_{min} – мінімальне значення роздільної здатності; N_v – кількість значень роздільної здатності за частотою; Δv – роздільні здатності для дослідження; v – крок за роздільною здатністю до частоти; $I_{ex}(v)$ - вхідний спектр, що потрапляє на вторинне коло оптичної схеми; $H_{oc}(v)$ – комплексна частотна характеристика оптичної схеми; $I_{vix}(v)$ - вихідний спектр; $v_{cm}[i]$ – еквівалентна частота антистоксової компоненти спектру КРС знайдена за методом центру мас; $v_{mm}[i]$ – еквівалентна частота антистоксової компоненти спектру КРС, знайдена медіанним методом; N_{iter} – кількість випадково генерованих спектрів КРС;



b

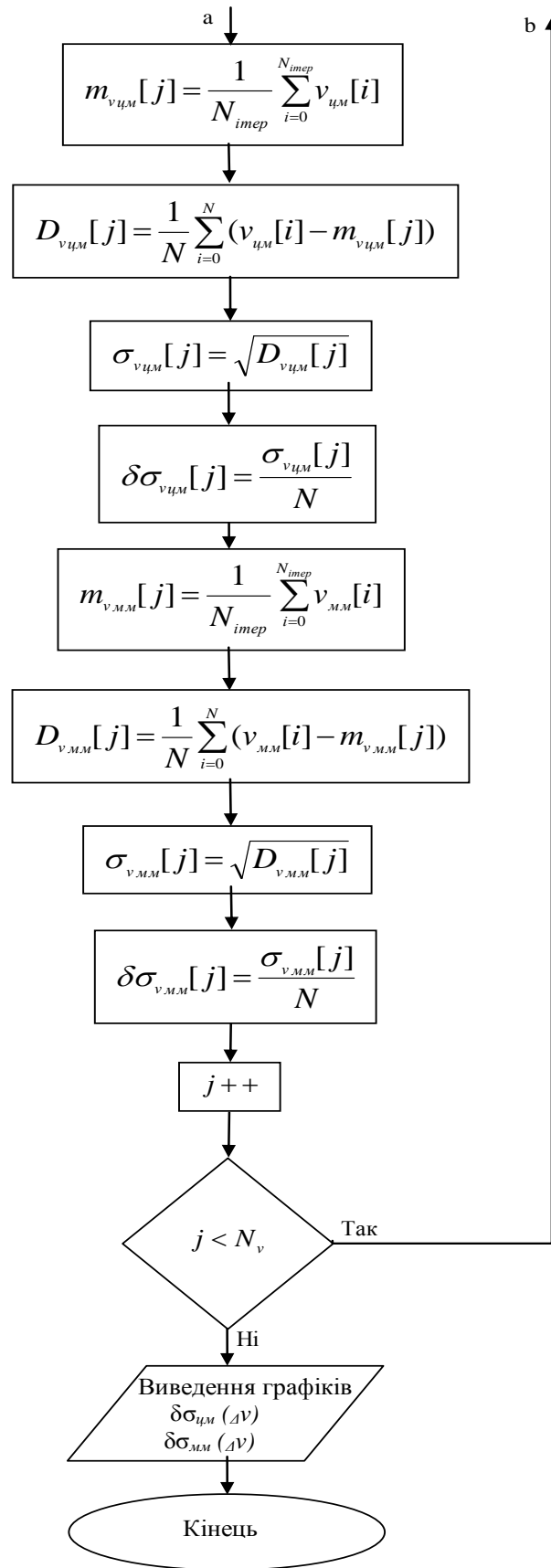


Рисунок 2.7 - Блок схема алгоритму роботи програми для знаходження залежності непевності визначення ЕЧАКС КРС.

$m_{v_{цм}} [j]$ – математичне сподівання еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдене методом центру мас; $D_{v_{цм}} [j]$ – дисперсія еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдена методом центру мас; $\sigma_{v_{цм}} [j]$ – середньо квадратичне відхилення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдене методом центру мас; $u_{v_{цм}}$ – непевність визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдена методом центру мас; $m_{v_{мм}} [j]$ – математичне сподівання еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдене медіанним методом; $D_{v_{мм}} [j]$ – дисперсія еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдена медіанним методом; $\sigma_{v_{мм}} [j]$ – середньо квадратичне відхилення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдене медіанним методом; $u_{v_{мм}}$ – непевність визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС, знайдена медіанним методом.

Проведено дослідження залежності непевності визначення і еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС від кількості випадкових послідовностей (N) функції перетворення елементів оптичної схеми (рисунок 2.8).

Дослідження показало, що при різних кількостях випадкових послідовностей непевність визначення непевності ЕЧАКС КРС буде різною. Для 10 випадкових послідовностей непевність становить 10,79862%, 100 послідовностей - 6,18%, для 1 тисячі послідовностей - 1,49%, а для 10 тисяч послідовностей - 0,45%.

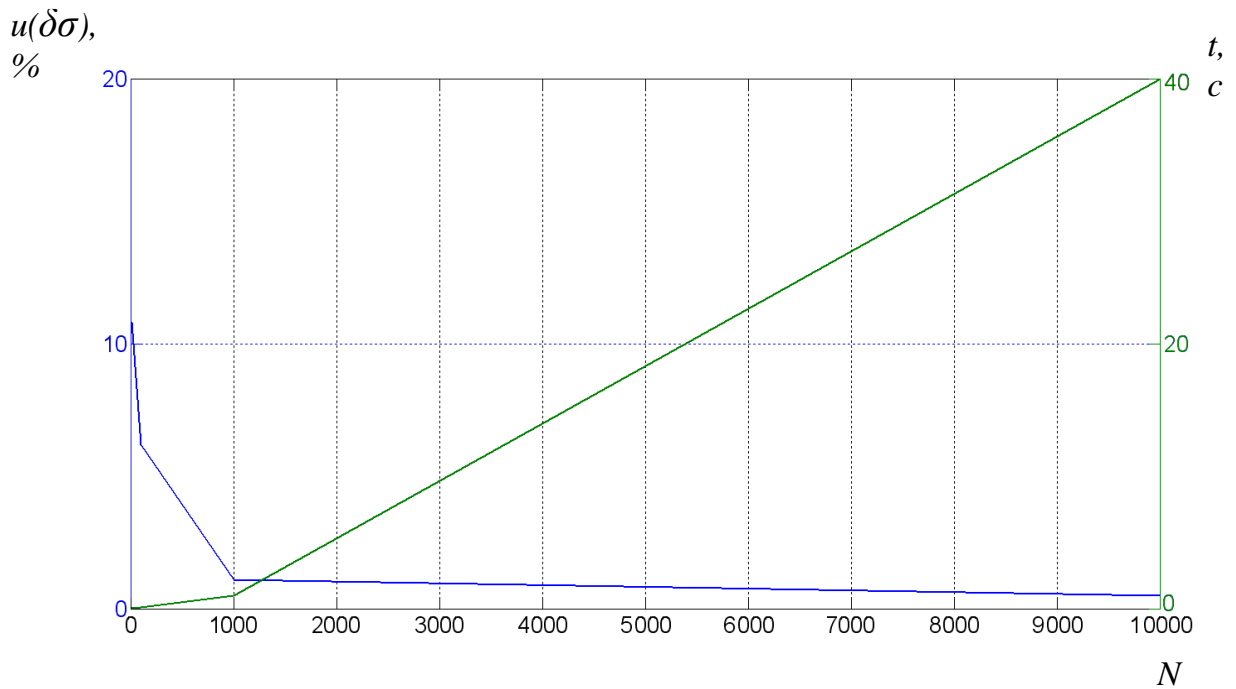


Рисунок 2.8 - Залежність визначення непевності ЕЧАКС КРС від кількості випадкових послідовностей

Побудована програмна модель визначення непевності ЕЧАКС КРС дозволяє працювати з будь якою кількістю випадкових послідовностей, проте при збільшенні кількості послідовностей час виконання суттєво зростає. Тому дослідження проводилися для 1000 випадкових послідовностей, за якого час виконання програми становить 0.96 с., до порівняння при 10000 випадкових послідовностях час виконання програми 40 с.

2.3 Дослідження вторинного кола оптичних схем засобу вимірювання температури

Проведено дослідження залежності непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС від роздільної здатності за частотою із врахуванням лінійної, нелінійної та випадкової складових похибки функції перетворення елементів оптичної схеми методом Монте-Карло для

п'яти типових вторинних кіл оптичних схем, які найчастіше використовуються в процесі отримання спектру КРС.

2.3.1 Вторинне коло із режекторного фільтром

На рисунку 2.9 зображено структуру вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури із режекторним фільтром.

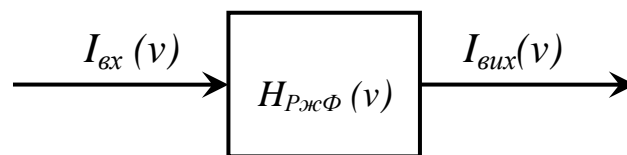


Рисунок 2.9 - Структура вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури із режекторного фільтром

Функція перетворення вторинного кола оптичної схеми описується виразом:

$$I_{ВИХ}(\nu) = I_{ВХ}(\nu) \cdot |H_{РжФ}(\nu)|^2 \quad (2.2)$$

де, $I_{вх}(\nu)$, - вхідний спектр, що потрапляє на вторинне коло оптичної схеми, $H_{РжФ}(\nu)$ – комплексна частотна характеристика режекторного фільтра, $I_{вих}(\nu)$, - вихідний спектр.

На рисунках 2.10 - 2.15 представлено залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для відповідно прямокутної, трапецієподібної, трикутної та пилкоподібної моделей спектрів КРС (рисунок 2.5) при лінійній, нелінійній та сумарній похибці (з врахуванням

випадкової похибки) функції перетворення елементів оптичної схеми з роздільною здатністю спектроаналізатора за частотою 1 та 10см^{-1} .

Дослідження проводилося за таких параметрів: смуга частот режекторного фільтра від 1890 до 1869см^{-1} , довжина хвилі лазера 532 нм. Лінійна, нелінійна складові моделі похибки функції перетворення оптичних елементів становить 2%.

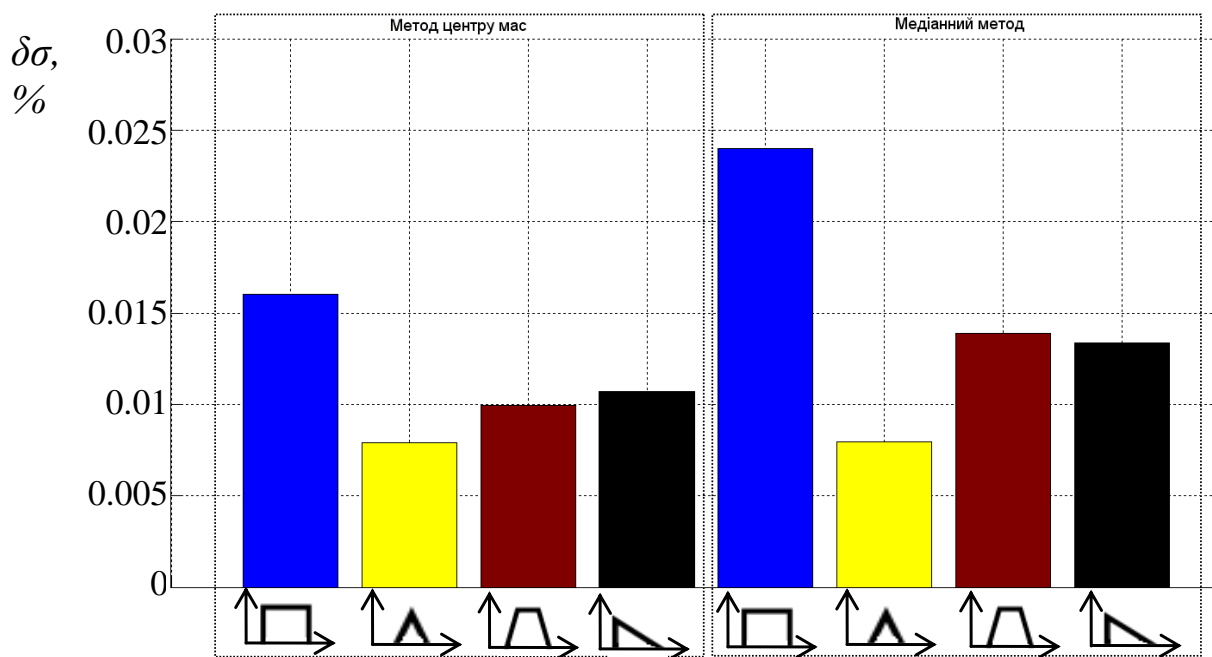


Рисунок 2.10 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та лінійній складовій похибки функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 1см^{-1}

Дослідження показали, що для прямокутної моделі спектру КРС при впливі лінійної складової похибки відносного середньоквадратичного відхилення визначення ЕЧАКС КРС методом центру мас для роздільної здатності спектроаналізатора 1см^{-1} відносно середньоквадратичне відхилення значення ЕЧАКС становить 0.016 % (рисунок 2.10), при впливі нелінійної несиметричної складової похибки – 0.0164 % (рисунок 2.12), а при сумарній похибці – 0.0168 % (рисунок 2.14).

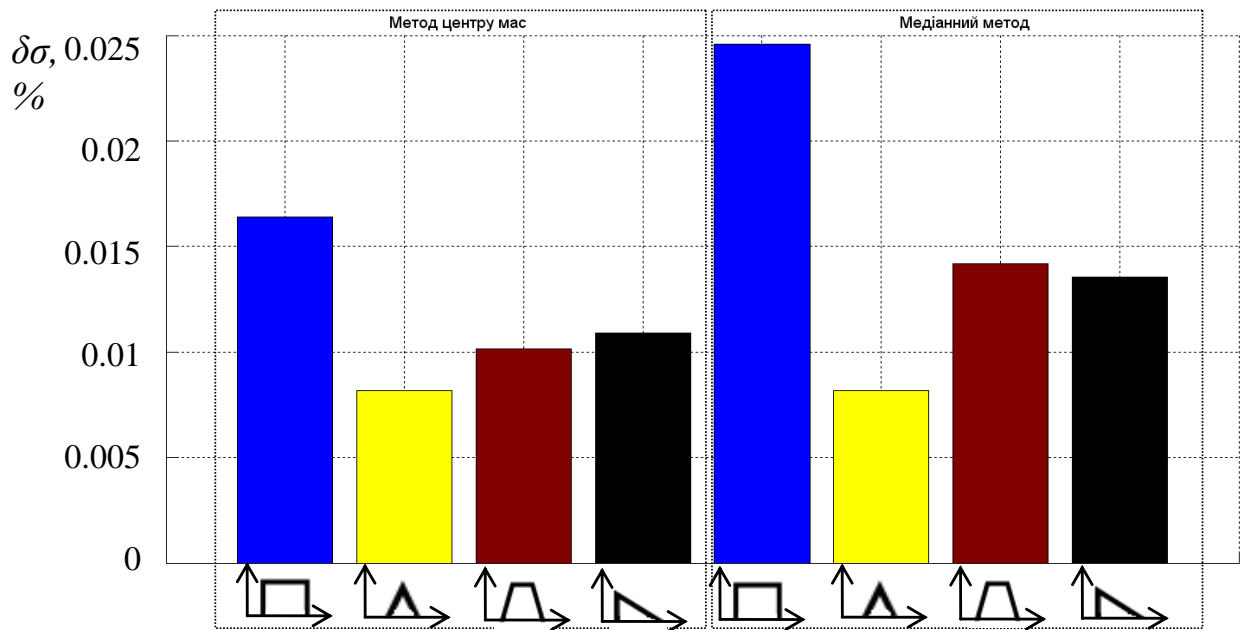


Рисунок 2.11 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та лінійній складовій похибки функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 10см^{-1}

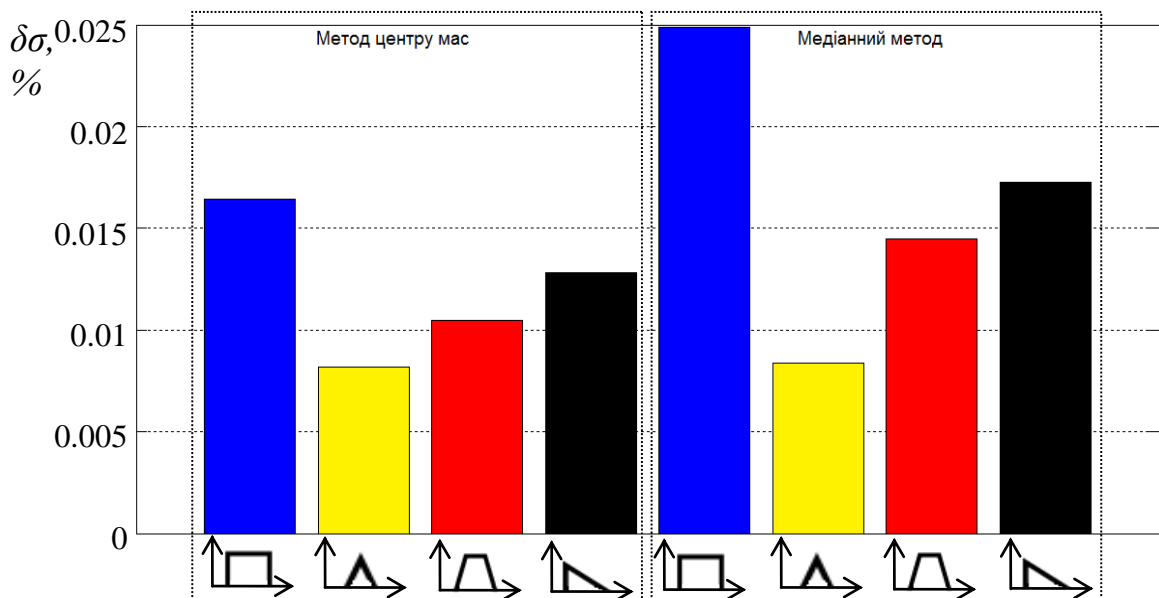


Рисунок 2.12 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та нелінійній складовій похибки функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 1см^{-1}

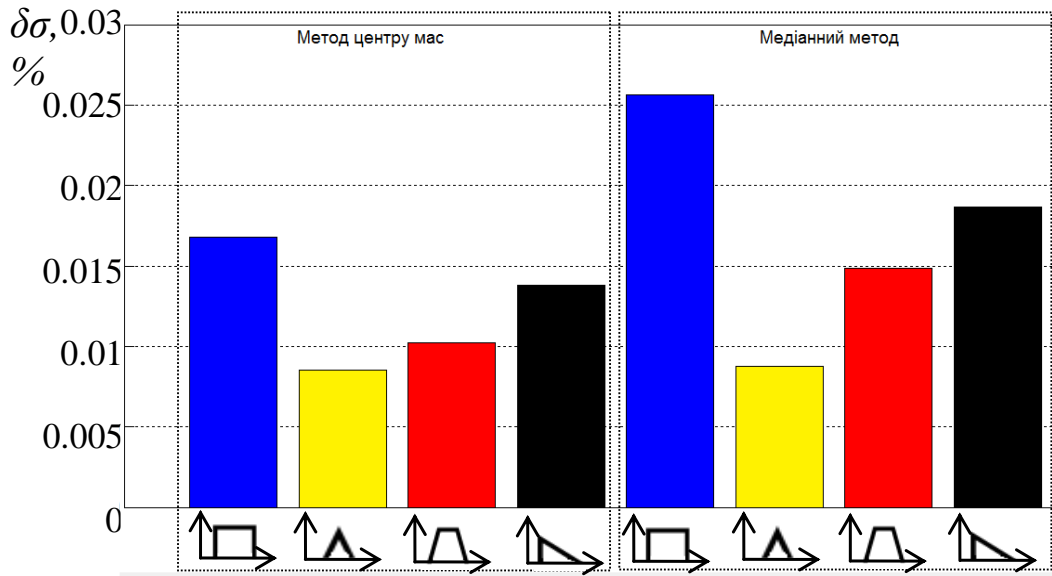


Рисунок 2.13 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та нелінійній складовій похибки функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 10 см^{-1}

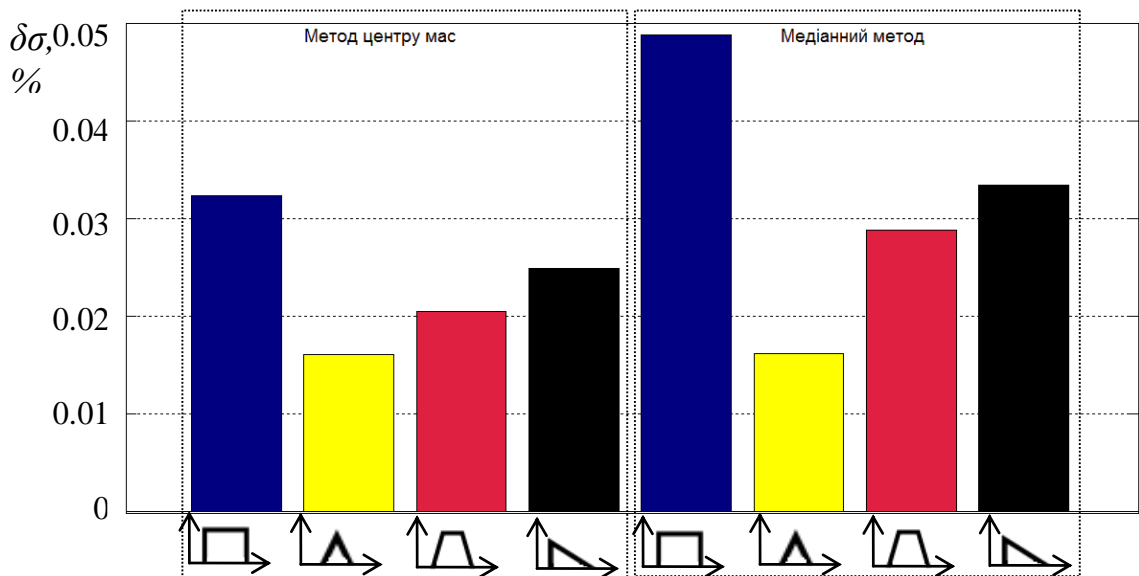


Рисунок 2.14 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 1 см^{-1}

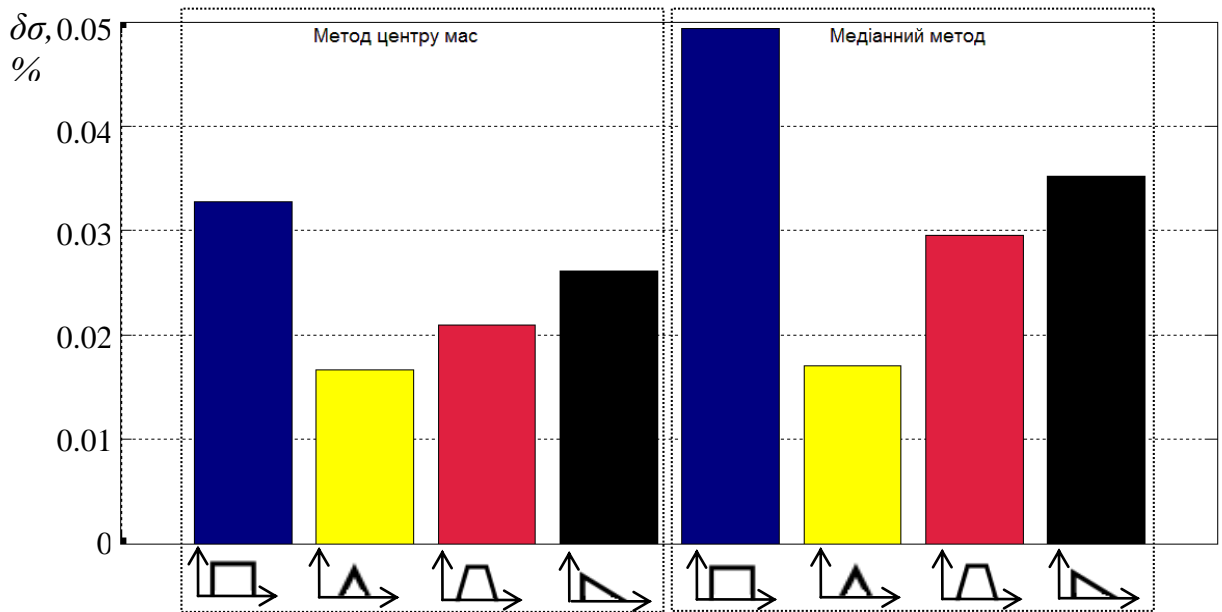


Рисунок 2.15 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 10 см^{-1}

При лінійній складовій похибки вона становить 0.0024% (рисунок 2.10), при нелінійній складовій похибки – 0.0025% (рисунок 2.12), а при сумарній похибці – 0.0049% (рисунок 2.14).

2.3.2 Вторинне коло оптичної схеми засобу вимірювання температури полум'я

На рисунку 2.16 зображено структуру вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури полум'я.

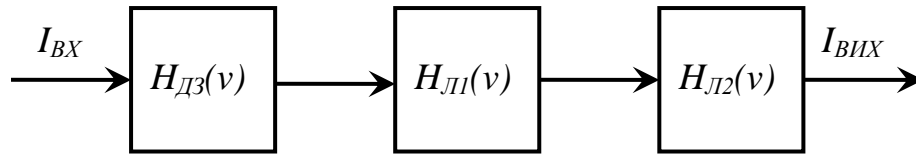


Рисунок 2.16 - Структура вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури полум'я

Функція перетворення вторинного кола оптичної схеми (рисунок 2.16) описується виразом:

$$I_{вих}(\nu) = I_{вх}(\nu) \cdot |H_{Л1}(\nu)|^2 \cdot |H_{Л2}(\nu)|^2 \cdot |H_{ДЗ}(\nu)|^2 \quad (2.3)$$

де, $I_{вх}(\nu)$ - вхідний спектр, $H_{ДЗ}(\nu)$ - комплексна частотна характеристика дзеркала, $H_{Л1}(\nu)$, $H_{Л2}(\nu)$ - комплексна частотна характеристика першої та другої збиральних лінз, $I_{вих}(\nu)$ - вихідний спектр.

На рисунках 2.16 - 2.17 представлено залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла для відповідно, прямокутного, трапецієподібного, трикутного та пилкоподібного моделей спектрів КРС (рисунок 2.5) при сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми.

Дослідження проводилося за таких параметрів: смуга частот збиральних лінз від 1428 до 2500 см^{-1} , крок за частотою 1 та 10 см^{-1} .

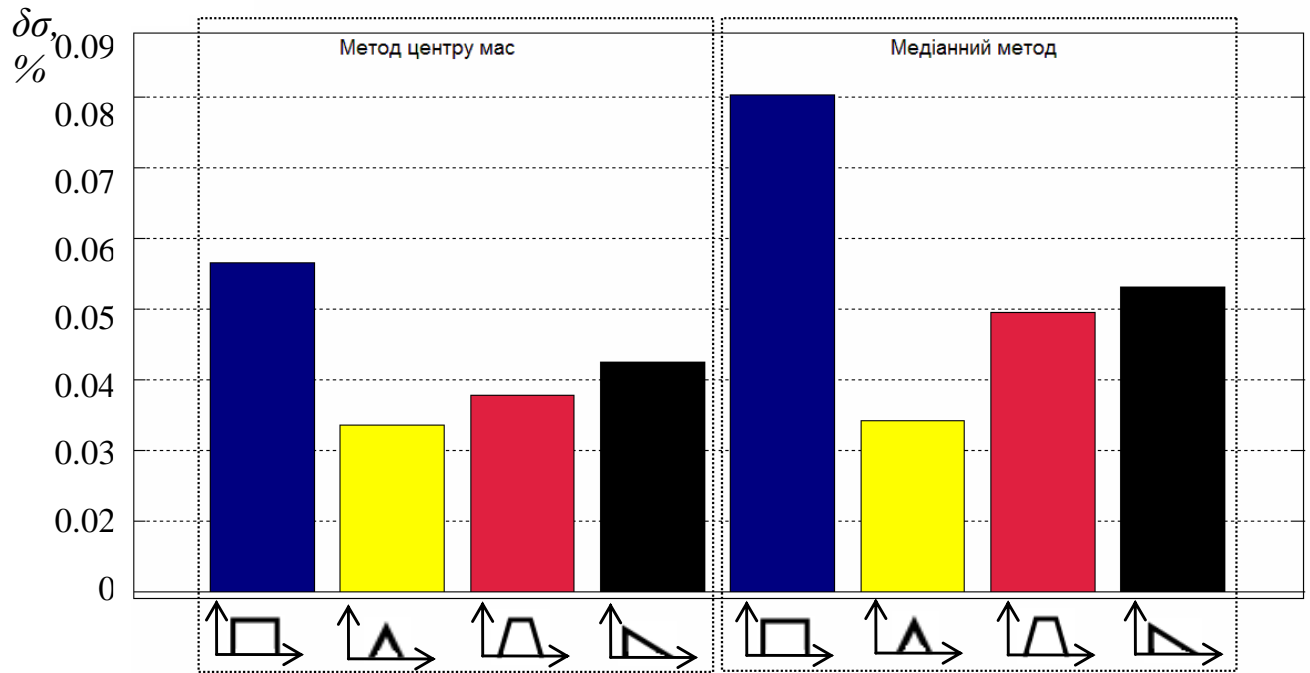


Рисунок 2.17 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 1 см^{-1}

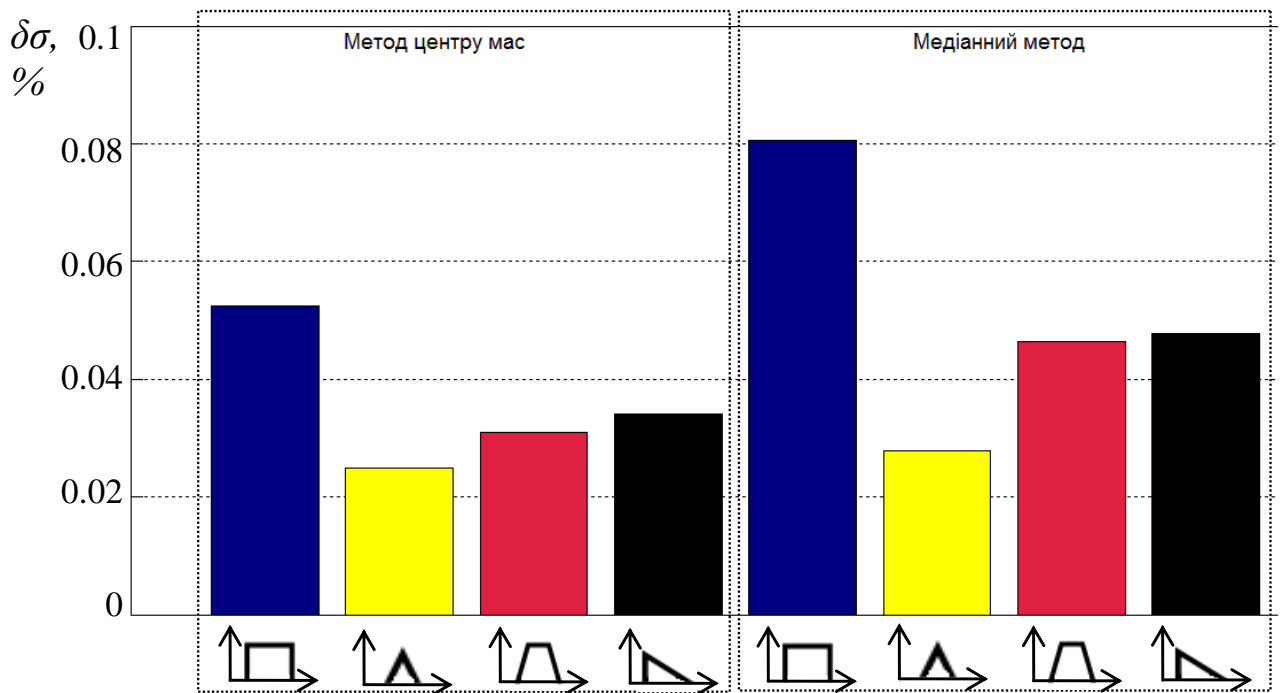


Рисунок 2.18 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 10 см^{-1}

2.3.3 Вторинне коло з використанням призми та вузькосмугового фільтра

На рисунку 2.19 представлено структуру вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури з використанням призми та вузькосмугового фільтра.

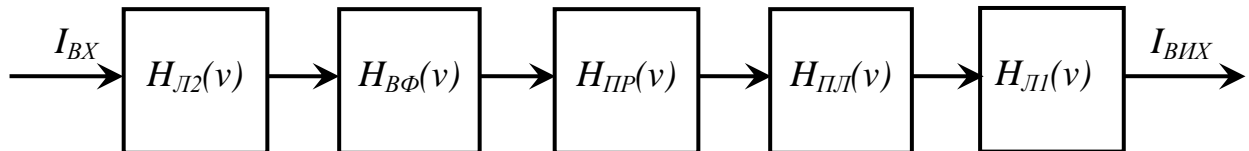


Рисунок 2.19 - Структура вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури з використанням призми та вузькосмугового фільтра

Функція перетворення вторинного кола оптичної схеми (рисунок 2.19) описується виразом:

$$I_{BИX}(v) = I_{BХ}(v) \cdot |H_{Л1}(v)|^2 \cdot |H_{Л2}(v)|^2 \cdot |H_{PP}(v)|^2 \cdot |H_{BФ}(v)|^2 \cdot |H_{ПЛ}(v)|^2 \quad (2.4)$$

де $I_{вх}(v)$ - вхідний спектр, $H_{Л1}(v)$, $H_{Л2}(v)$ - комплексна частотна характеристика першої та другої збиральних лінз, $H_{ПЛ}(v)$ - комплексна частотна характеристика поляризатора, $H_{PP}(v)$ - комплексна частотна характеристика призми, $I_{BИX}(v)$ - вихідний спектр.

На рисунках 2.20, 2.21 представлено залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру для відповідно, прямокутного, трапецієподібного, трикутного та пилкоподібного моделей спектрів КРС (рисунок 2.5) при сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми.

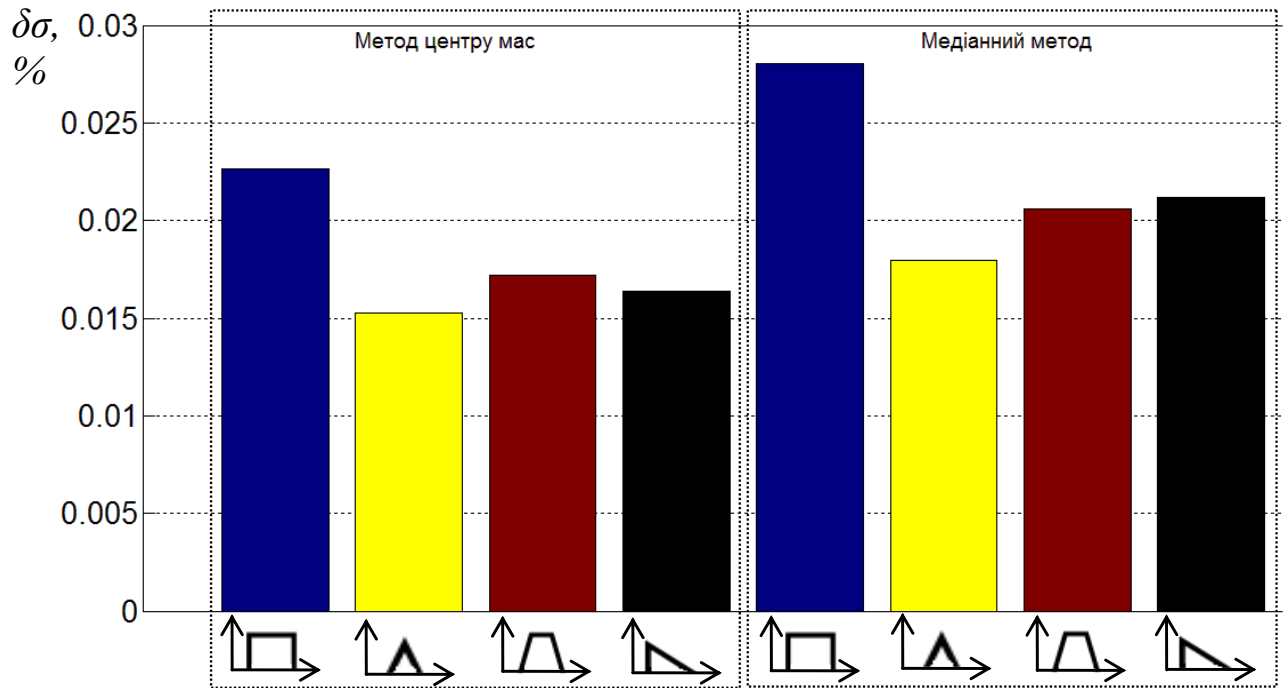


Рисунок 2.20 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 1 cm^{-1}

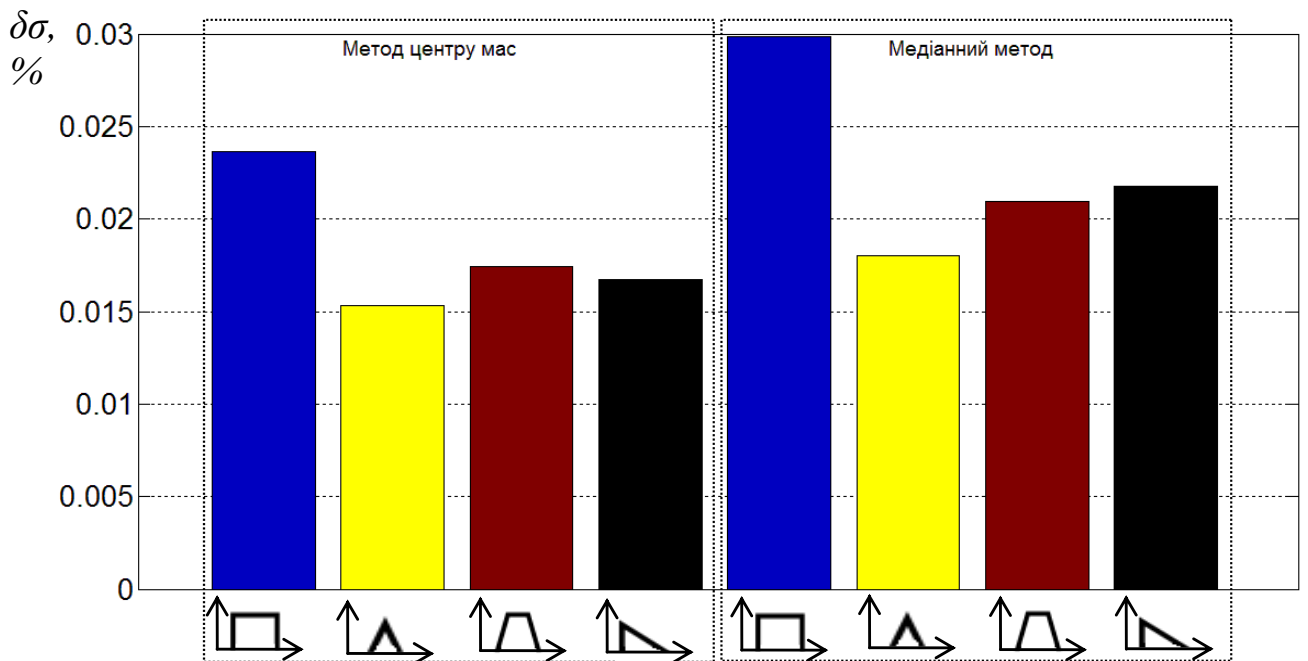


Рисунок 2.21 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 10 cm^{-1}

Дослідження проводилося за таких параметрів: смуга частот збиральних лінз від 1428 до 2500 см^{-1} , смуга частот режекторного фільтра від 1890 - 1869 см^{-1} , крок за частотою 1 та 10 см^{-1} .

2.3.4 Вторинне коло з використанням мікроскопа та діафрагми

На рисунку 2.22 представлено структуру вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури з використанням мікроскопа та діафрагми.

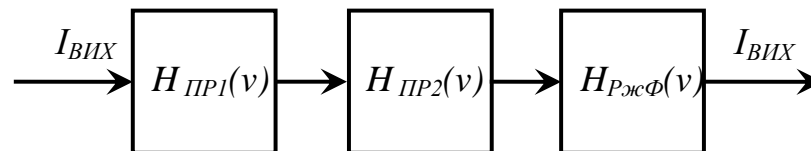


Рисунок 2.22 - Структура вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури з використанням мікроскопа та діафрагми

Функція перетворення вторинного кола оптичної схеми (рисунок 2.22) описується виразом:

$$I_{BИX}(v) = I_{BХ}(v) \cdot |H_{PP1}(v)|^2 \cdot |H_{PP2}(v)|^2 \cdot |H_{PжФ}(v)|^2 \quad (2.5)$$

де $I_{BХ}(v)$ - вхідний спектр, $H_{PP1}(v)$, $H_{PP2}(v)$ - комплексні частотні характеристики першої та другої призми, $H_{PжФ}(v)$ - комплексна частотна характеристика режекторного фільтра, $I_{BИX}(v)$ - вихідний спектр.

На рисунках 2.23 - 2.24 представлено залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення еквівалентної частоти

антистоксової компоненти спектру для відповідно, прямокутного, трапецієподібного, трикутного та пилкоподібного моделей спектрів комбінаційного розсіювання світла (рисунок 2.5) при сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми.

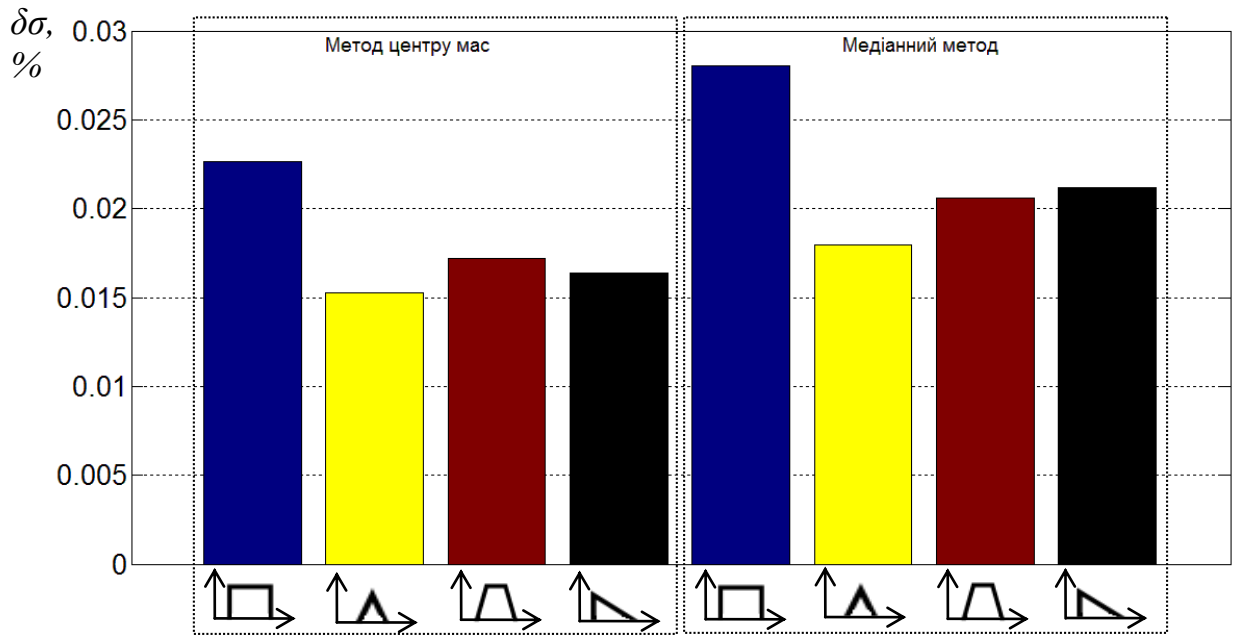


Рисунок 2.23 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 1 см^{-1}

Дослідження проводилося за таких параметрів: смуга частот режекторного фільтра від $1890 - 1869 \text{ см}^{-1}$, крок за частотою 1 та 10 см^{-1} .

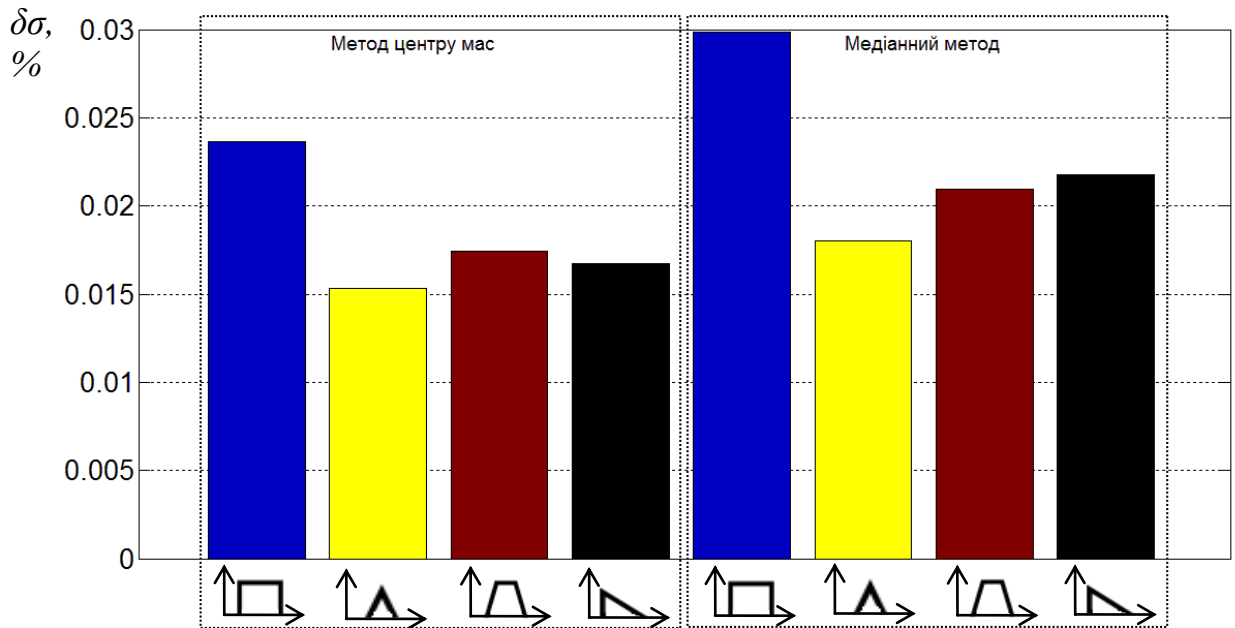


Рисунок 2.24 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 10 см^{-1}

2.3.5 Вторинне коло з режекторним фільтром та поляризатором

Структурна оптична схема засобу вимірювання температури з режекторним фільтром та поляризатором представлена на рисунку 2.25.

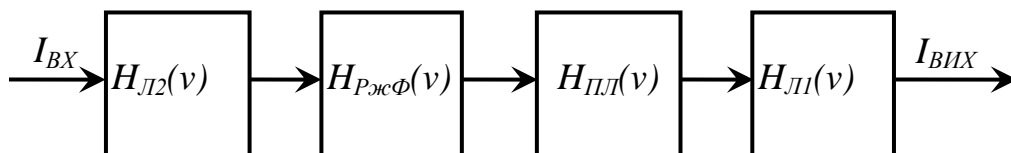


Рисунок 2.25 - Структурна оптична схема засобу вимірювання температури з режекторним фільтром та поляризатором

Функція перетворення вторинного кола оптичної схеми має вигляд:

$$I_{ВИХ}(v) = I_{ВХ}(v) \cdot |H_{Л1}(v)|^2 \cdot |H_{Л2}(v)|^2 \cdot |H_{РжФ}(v)|^2 \cdot |H_{ПЛ}(v)|^2 \quad (2.6)$$

де, $I_{ВХ}(v)$ – вхідний спектр, $H_{Л1}(v)$, $H_{Л2}(v)$ - комплексні частотні характеристики першої та другої збиральних лінз, $H_{ПЛ}(v)$ - комплексна частотна характеристика поляризатора, $H_{РжФ}(v)$ - комплексна частотна характеристика режекторного фільтра, $I_{ВИХ}(v)$ – вихідний спектр.

На рисунках 2.26 - 2.27 представлено залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру для відповідно, прямокутного, трапецієподібного, трикутного та пилкоподібного моделей спектрів комбінаційного розсіювання світла (рисунок 2.5) при сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми.

Дослідження проводилося за таких параметрів: смуга частот збиральних лінз від 1428 до 2500 см^{-1} , смуга частот режекторного фільтра від 1890 - 1869 см^{-1} , поляризатор із координатами 1428, 1620, 2237, 2500 см^{-1} , крок за частотою 1 та 10 см^{-1} .

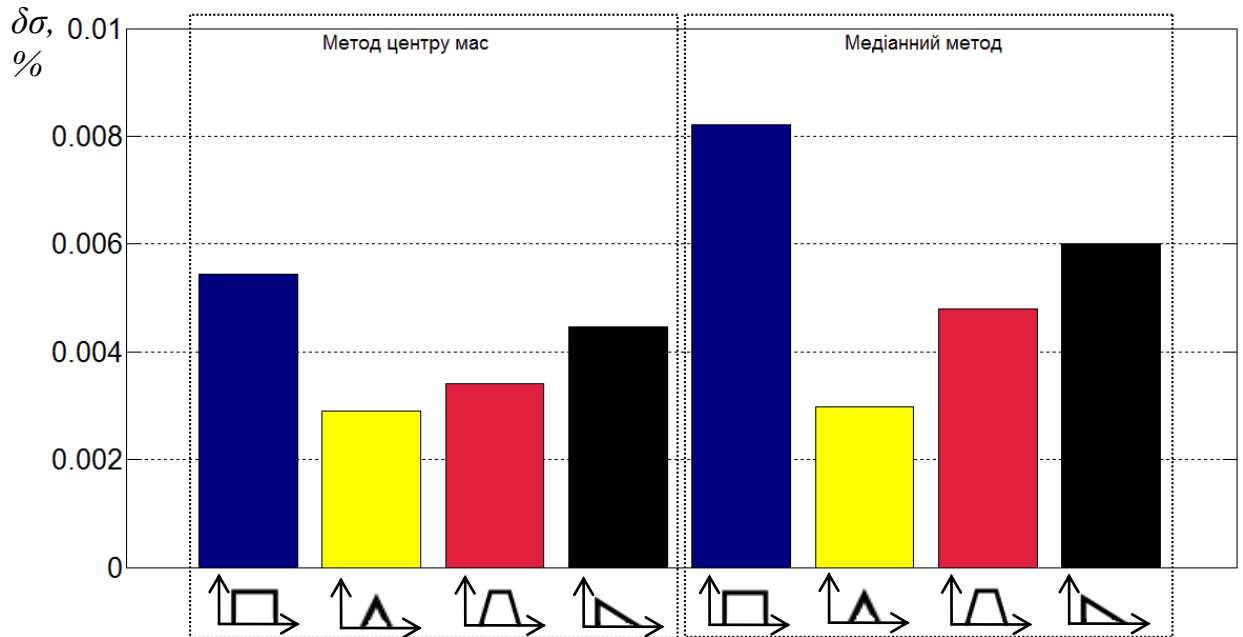


Рисунок 2.26 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільчій здатності 1 cm^{-1}

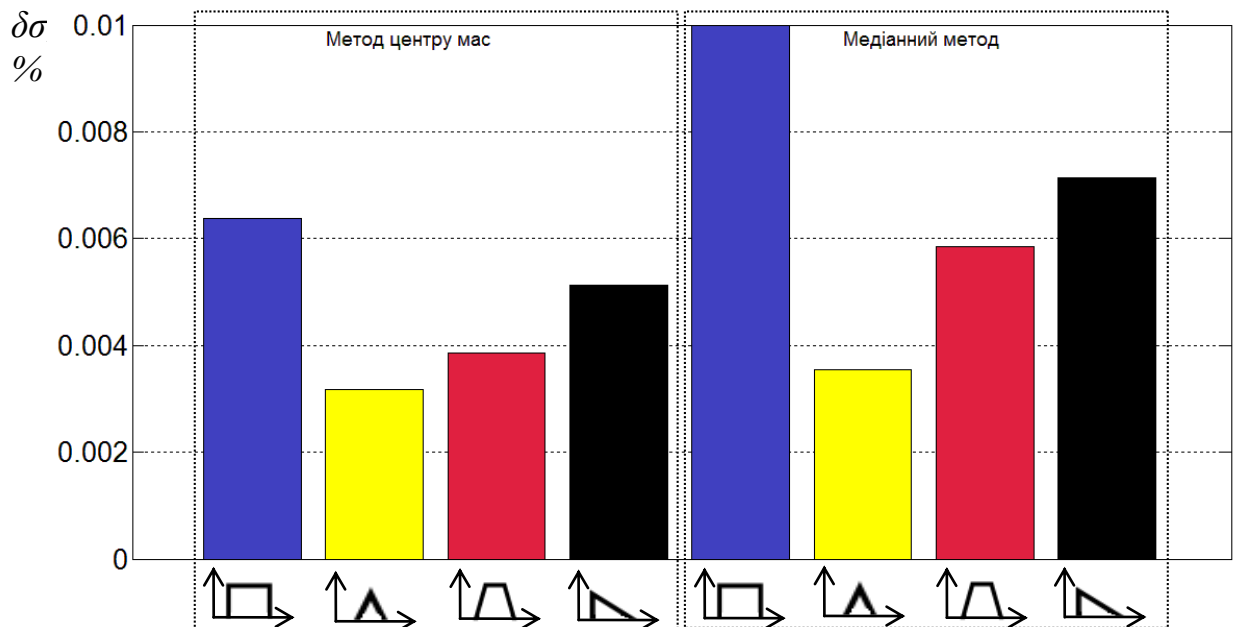


Рисунок 2.27 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільчій здатності 10 cm^{-1}

Проведені дослідження показали, що при впливі моделі сумарної похибки функції перетворення оптичних елементів для всіх оптичних схем, досліджуваних моделей спектрів КРС враховуючи мінімальну залежність відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС забезпечує метод центру мас.

На рисунку 2.28 представлено результати дослідження залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС КРС від роздільної здатності спектроаналізатора за частотою із врахуванням сумарної похибки елементів оптичної схеми яка становить 2%.

Граничне значення похибки вимірювання температури засобом який базується на ефекті КРС розраховується з (2.1) та набуває наступного вигляду:

$$\delta T = 0,04 + 0,00008 + 0,02 + 0,09 \approx 0,15\% \quad (2.7)$$

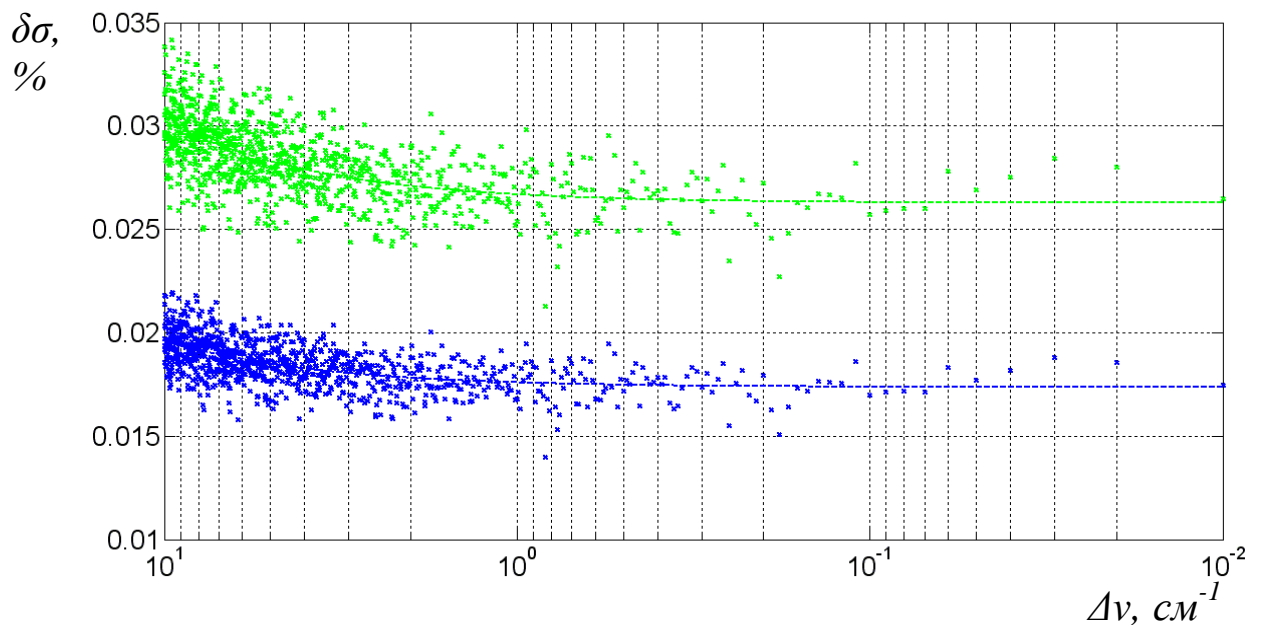


Рисунок 2.28 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС від роздільної здатності за частотою спектроаналізатора при впливі сумарної похибки

Отримані результати досліджень (рисунок 2.28) показали, що існує певне значення роздільної здатності спектроаналізатора за частотою, зменшення якого практично не призводить до зменшення залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС. Так, наприклад, для роздільної здатності, меншої за 1 см^{-1} , залежність відносного середньоквадратичного відхилення ЕЧАКС КРС практично не змінюється і становить приблизно 0.00083% для метод центру мас та 0,00126% для медіанного методу визначення ЕЧАКС.

Отримані результати рисунок 2.28 дозволяють за необхідного відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС КРС поставити вимоги до метрологічних та технічних характеристик спектроаналізатора або оцінити довірчу відносну похибку визначення ЕЧАКС КРС за конкретними технічними характеристиками спектроаналізатора.

2.4 Висновки до розділу

1. Отримано вираз відносної похибки засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за зсувом еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру.

2. Синтезовано моделі антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла різної форми.

3. Створено програмні моделі оптичних елементів та оптичних схем засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

4. Оптимальним для визначення значення ЕЧАКС КРС є метод центру мас. Його використання забезпечує мінімальну довірчу відносну похибку визначення ЕЧАКС КРС у порівнянні з іншими методами.

5. Досліджено залежність значення ЕЧАКС КРС від інтенсивності лазерного випромінювання та встановлено, що зміна інтенсивності лазерного променя не впливає на похибку визначення значення ЕЧАКС КРС.

6. Досліджено залежність відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС КРС від роздільної здатності спектроаналізатора за частотою. Існує певне значення роздільної здатності спектроаналізатора, при зменшенні якого значення відносного середньоквадратичного відхилення ЕЧАКС КРС практично не зменшується. Це дозволяє вибрати спектроаналізатор з оптимальними характеристиками для засобу вимірювання температури, який побудований на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ЧАСТОТИ АНТИСТОКСОВОЇ КОМПОНЕНТИ СПЕКТРУ КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА

У розділі представлено результати експериментальних досліджень спектрів КРС для п'яти досліджуваних зразків в температурному діапазоні від 18 до 70°C. Для кожного із досліджуваних матеріалів проводилося по сто досліджень у різний час, з інтервалом в 3 дні, та знайдено еквівалентну частоту антистоксової компоненти спектру КРС методом центру мас, а також отримано інтерполяційні вирази ЕЧАКС КРС від температури. Досліджено залежності похибки апроксимації від кількості коефіцієнтів апроксимаційної кривої для кожної з досліджуваних об'єктів, та визначено найкращу кількість коефіцієнтів. Обладнання за допомогою якого проводилися експерименти: HE-NE лазер SL-03, $\lambda = 632,9$ нм, спектроаналізатор MS 3501i, дослідження проводилися за нормальних умов.

3.1 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для H₂O.

У діапазоні температур від 18°C до 70°C із кроком 1°C для кожної температури вимірювалося 10 реалізацій спектру антистоксової компоненти КРС для досліджуваних речовин: H₂O, Al₂O₃, C₆H₁₂, гума, C₁₀H₈. У кожній температурній точці для 10 отриманих реалізацій спектру антистоксової компоненти КРС методом центру мас розраховувалися значення ЕЧАКС, а також усереднене значення ЕЧАКС та непевність визначення ЕЧАКС КРС.

На рисунку 3.1,а представлено спектри антистоксової компоненти КРС для H₂O за температури 18°C, відповідні значення ЕЧАКС КРС, які розраховані методом центру мас (рисунок 3.1,а), та усереднене значення ЕЧАКС КРС (рисунок 3.1,б).

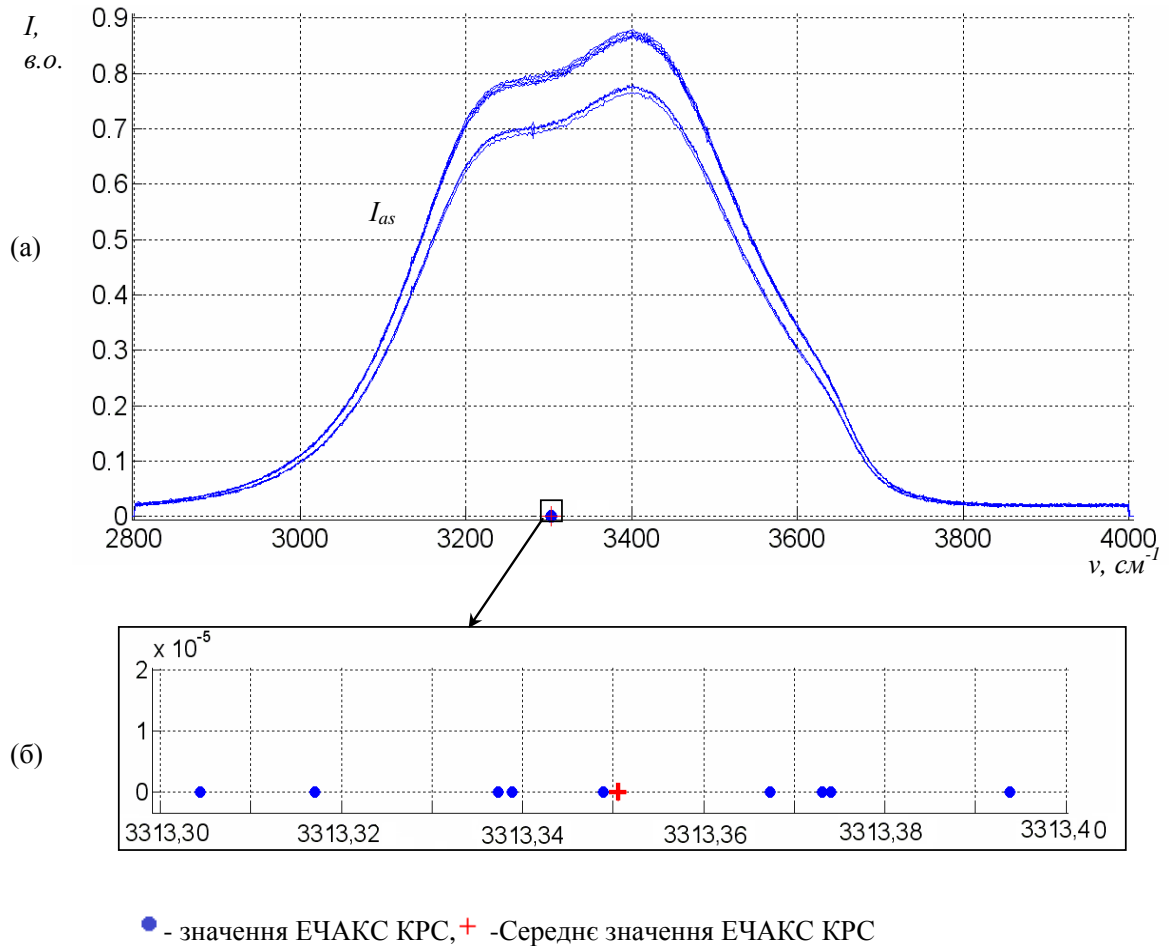


Рисунок 3.1 - Результати дослідження спектрів КРС для H₂O: а) спектри антистоксової компоненти КРС за температури 18⁰С, б) відповідні значення ЕЧАКС КРС та усереднене значення ЕЧАКС КРС

У таблиці 3.1 подано результати дослідження залежності ЕЧАКС КРС від температури та непевності визначення середнього значення ЕЧАКС КРС за експериментально отриманими спектрами антистоксової компоненти КРС для H₂O з кроком 5⁰С. Результати дослідження із кроком 1⁰С подано в додатку А.1.

Таблиця 3.1. Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього значення ЕЧАКС КРС для Н₂О

№ п/п Т, °С	Значення ЕЧАКС КРС ν , cm^{-1}										$m\nu$, cm^{-1}	$D\nu$, cm^{-2}	$\sigma\nu$, cm^{-1}	$u\nu$, cm^{-1}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
18	3313,31	3313,33	3313,34	3313,34	3313,34	3313,39	3313,38	3313,37	3313,37	3313,37	3313,35	0,000489268	0,022	0,070
20	3313,13	3313,15	3313,13	3313,17	3313,19	3313,14	3313,16	3313,20	3313,13	3313,18	3313,16	0,000613342	0,025	0,078
25	3312,17	3312,18	3312,18	3312,12	3312,17	3312,13	3312,17	3312,15	3312,14	3312,19	3312,16	0,000551712	0,023	0,074
30	3310,42	3310,40	3310,41	3310,40	3310,43	3310,44	3310,37	3310,37	3310,44	3310,42	3310,41	0,000629701	0,025	0,080
35	3307,92	3307,90	3307,92	3307,89	3307,87	3307,89	3307,90	3307,88	3307,91	3307,92	3307,9	0,000263415	0,016	0,051
40	3304,66	3304,65	3304,67	3304,67	3304,65	3304,68	3304,65	3304,70	3304,64	3304,66	3304,66	0,000275102	0,017	0,053
45	3300,67	3300,66	3300,68	3300,71	3300,64	3300,64	3300,66	3300,64	3300,68	3300,65	3300,66	0,000457751	0,021	0,068
50	3295,96	3295,94	3295,93	3295,93	3295,94	3295,93	3295,91	3295,95	3295,93	3295,96	3295,94	0,000215698	0,015	0,047
55	3290,46	3290,46	3290,49	3290,45	3290,43	3290,42	3290,45	3290,48	3290,47	3290,45	3290,46	0,000379688	0,019	0,062
60	3284,21	3284,24	3284,24	3284,20	3284,20	3284,20	3284,19	3284,27	3284,23	3284,23	3284,22	0,000537504	0,023	0,073
65	3277,26	3277,26	3277,24	3277,29	3277,25	3277,25	3277,26	3277,22	3277,23	3277,28	3277,25	0,000398327	0,020	0,063
70	3269,52	3269,51	3269,51	3269,51	3269,50	3269,57	3269,56	3269,57	3269,57	3269,50	3269,53	0,000823692	0,029	0,091

У таблиці 3.1 застосовано такі позначення: T - температура, за якої отримано спектри антистоксової компоненти КРС; m_v - математичне сподівання ЕЧАКС КРС; D_v - дисперсія ЕЧАКС КРС; σ_v - середньоквадратичне відхилення ЕЧАКС КРС; u_v - непевність визначення значення ЕЧАКС КРС.

За результатами досліджень (таблиця 3.1) абсолютне значення непевності визначення ЕЧАКС КРС у діапазоні температур від 18⁰С до 70⁰С для Н₂О не перевищує 0,091см⁻¹.

Враховуючи табличні значення температури T та середні значення ЕЧАКС КРС m_v (таблиця 3.1), отримано інтерполяційний вираз який описує залежність ЕЧАКС КРС від температури

$$v = A + BT + CT^2, \quad (3.1)$$

де $A=3309,70$, см⁻¹, $B= 0,47$, см⁻¹/°С, $C= -0,01$, см⁻¹/°С², v – ЕЧАКС КРС, см⁻¹, T – температура, °С.

На рисунок 3.2 представлено графічну залежність ЕЧАКС КРС від температури для Н₂О, побудовану за інтерполяційним виразом (3.1).

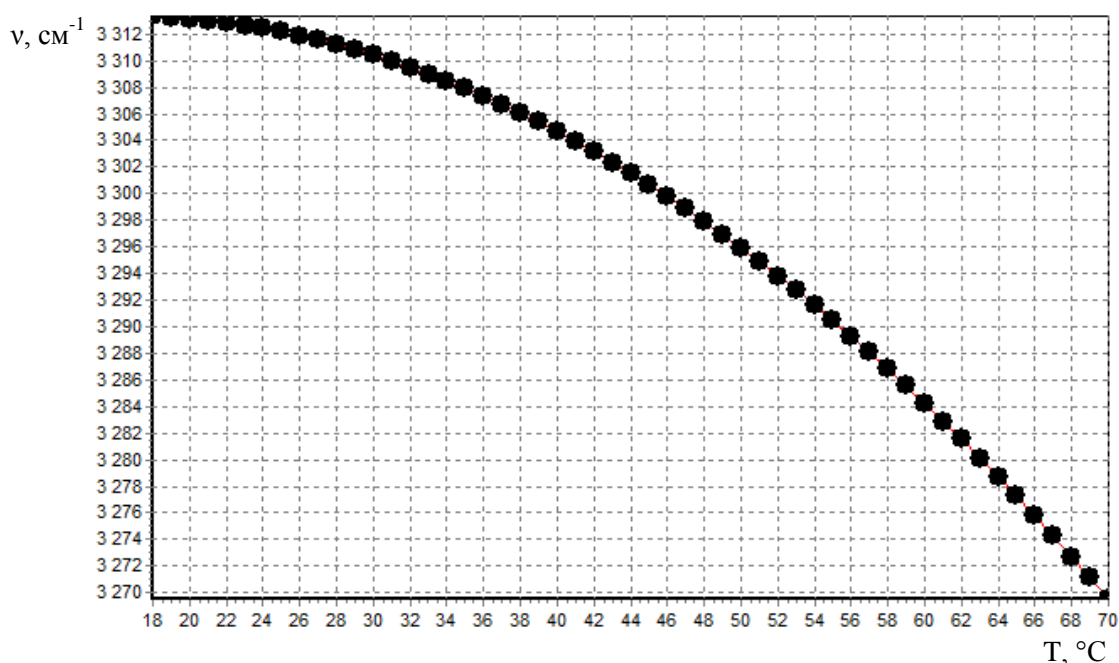


Рисунок 3.2 - Залежність ЕЧАКС КРС від температури для Н₂О.

Абсолютна похибка апроксимації не перевищує $0,017 \text{ см}^{-1}$, а відносна похибка – 0.00052% .

Враховуючи вираз (3.1), абсолютна похибка розрахунку ЕЧАКС КРС за інтерполяційним рівнянням описується виразом

$$\Delta\nu = \frac{\partial(A + BT + CT^2)}{\partial T} \cdot \Delta T = (B + 2CT) \cdot \Delta T, \quad (3.2)$$

де ΔT - температурна абсолютна похибка.

Виходячи з (3.2) абсолютна похибка розрахунку значення температури описується виразом

$$\Delta T = \frac{\Delta\nu}{B + 2CT}. \quad (3.3)$$

Перейшовши від абсолютних значень похибки до відносних, отримаємо

$$\delta\nu = \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{BT + 2CT^2}{A + BT + CT^2} \cdot \delta T, \quad (3.4)$$

тоді

$$\delta T = \frac{A + BT + CT^2}{BT + 2CT^2} \cdot \delta\nu. \quad (3.5)$$

Перейшовши від похибок до непевностей [161] вираз (3.5) матиме вигляд

$$u_T = \left| \frac{A + BT + CT^2}{BT + 2CT^2} \right| \cdot uv. \quad (3.6)$$

На рисунку 3.3 представлено залежність непевності визначення температури від непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС.

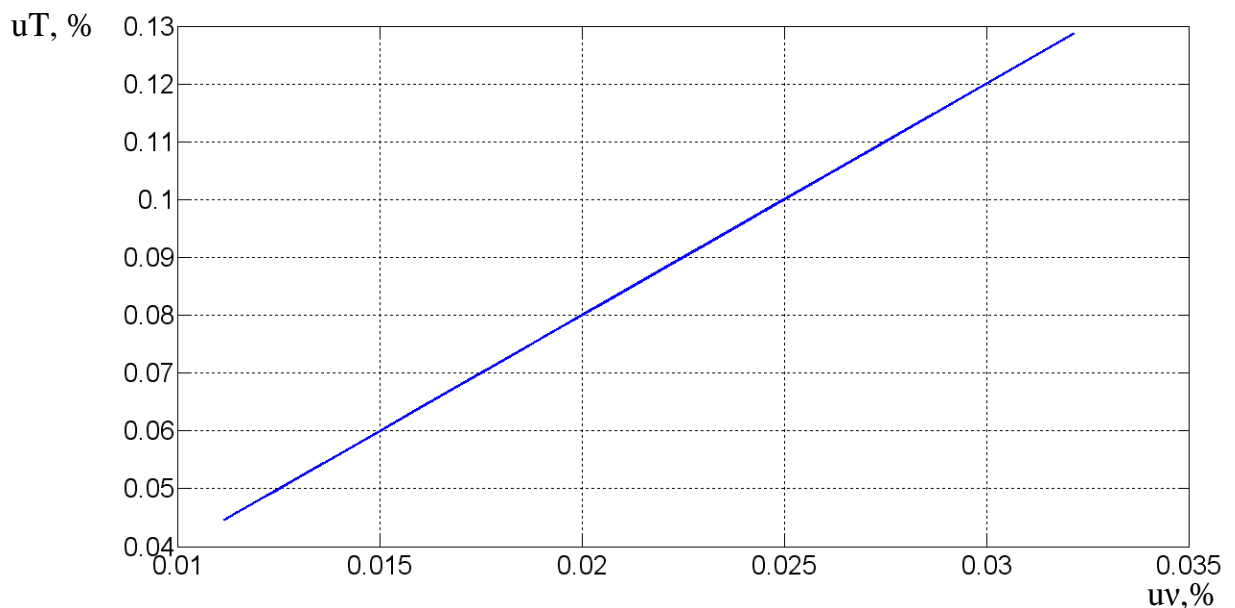


Рисунок 3.3 - Залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС для H₂O

3.2 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для Al₂O₃

На рисунку 3.4,а представлено спектри антистоксової компоненти КРС для Al₂O₃ за температури 38⁰С, відповідні значення ЕЧАКС КРС, які розраховані методом центру мас (рисунок 3.4,а), та усереднене значення ЕЧАКС КРС (рисунок 3.4,б).

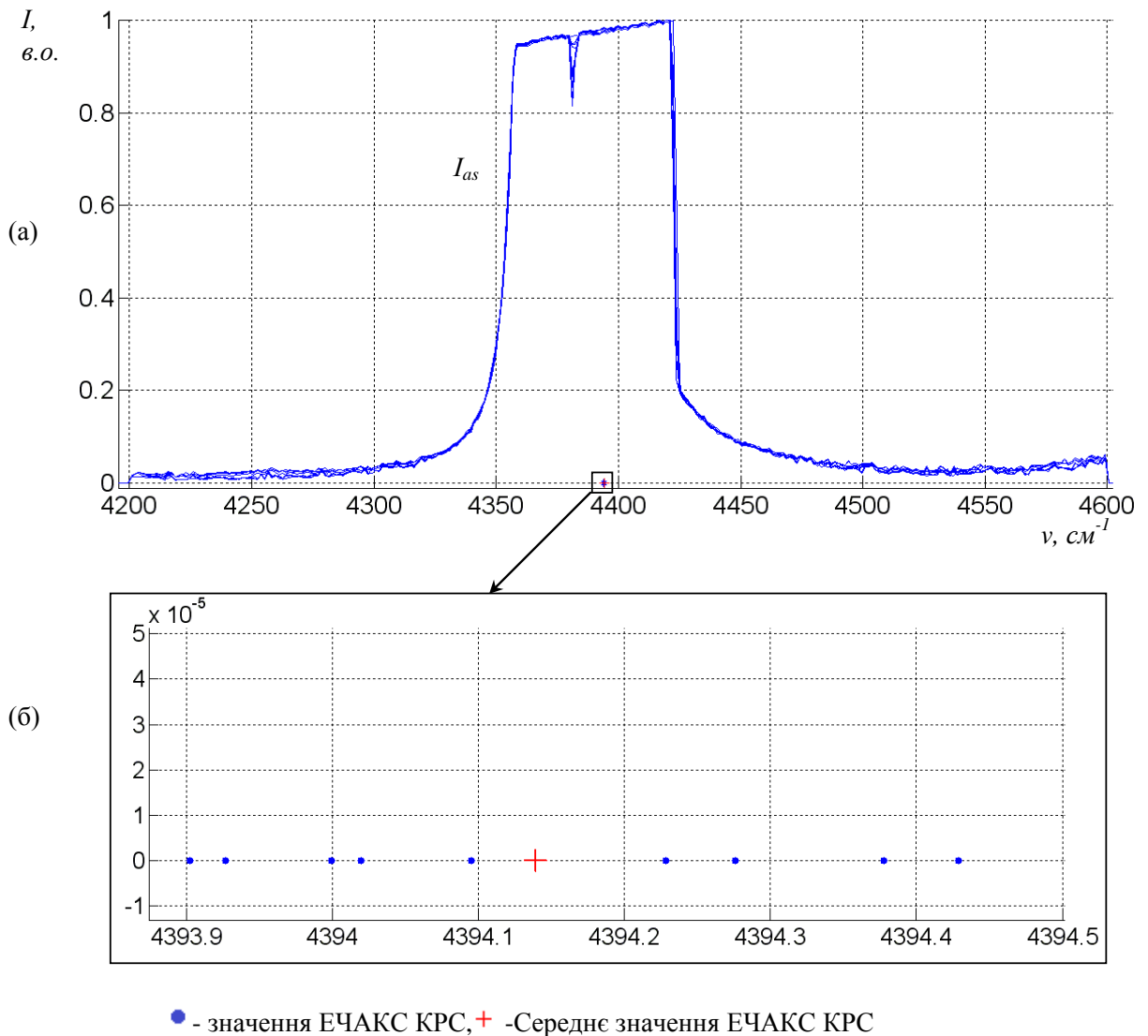


Рисунок 3.4 - Результати дослідження спектрів КРС для Al_2O_3 : а) спектри антистоксової компоненти КРС за температури 38°C , б) відповідні значення ЕЧАКС КРС та усереднене значення ЕЧАКС КРС

У таблиці 3.2 подано результати дослідження залежності ЕЧАКС КРС від температури та непевності визначення середнього значення ЕЧАКС КРС за експериментально отриманими спектрами антистоксової компоненти КРС для Al_2O_3 з кроком 5°C . Результати дослідження із кроком 1°C подано в додатку А.2.

Таблиця 3.2. Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього значення ЕЧАКС КРС для Al_2O_3

№ п/п T, °C	Значення ЕЧАКС КРС ν , cm^{-1}										$m\nu$, cm^{-1}	$D\nu$, cm^{-2}	$\sigma\nu$, cm^{-1}	uv , cm^{-1}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
20	4593,44	4593,46	4593,44	4593,47	4593,49	4593,45	4593,46	4593,49	4593,44	4593,48	4593,46	0,000345005	0,019	0,059
25	4561,56	4561,57	4561,57	4561,52	4561,56	4561,53	4561,56	4561,54	4561,53	4561,57	4561,55	0,000310338	0,018	0,056
30	4510,52	4510,50	4510,51	4510,50	4510,52	4510,53	4510,48	4510,48	4510,53	4510,51	4510,51	0,000354207	0,019	0,060
35	4440,35	4440,33	4440,34	4440,32	4440,31	4440,32	4440,33	4440,32	4440,34	4440,34	4440,33	0,000148171	0,012	0,039
40	4351,04	4351,03	4351,04	4351,05	4351,03	4351,05	4351,03	4351,07	4351,03	4351,04	4351,04	0,000154745	0,012	0,039
45	4242,62	4242,61	4242,62	4242,65	4242,60	4242,60	4242,61	4242,60	4242,63	4242,61	4242,61	0,000257485	0,016	0,051
50	4115,09	4115,08	4115,07	4115,07	4115,08	4115,07	4115,06	4115,09	4115,08	4115,09	4115,08	0,00012133	0,011	0,035
55	3968,41	3968,41	3968,44	3968,41	3968,39	3968,39	3968,40	3968,43	3968,42	3968,41	3968,41	0,000213575	0,015	0,046
60	3802,60	3802,63	3802,63	3802,60	3802,60	3802,59	3802,59	3802,65	3802,62	3802,62	3802,61	0,000302346	0,017	0,055
65	3617,70	3617,70	3617,69	3617,72	3617,69	3617,70	3617,70	3617,67	3617,68	3617,72	3617,7	0,000224059	0,015	0,047
70	3413,64	3413,64	3413,64	3413,64	3413,63	3413,68	3413,67	3413,68	3413,68	3413,63	3413,65	0,000463327	0,022	0,068

У таблиці 3.2 застосовано такі позначення: T - температура, за якої отримано спектри антистоксової компоненти КРС; m_v - математичне сподівання ЕЧАКС КРС; D_v - дисперсія ЕЧАКС КРС; σ_v - середньоквадратичне відхилення ЕЧАКС КРС; u_v - непевність визначення значення ЕЧАКС КРС.

За результатами досліджень (таблиця 3.2) непевність визначення значень ЕЧАКС КРС у діапазоні температур від 18°C до 70°C для Al_2O_3 не перевищує $0,068 \text{ cm}^{-1}$. Враховуючи табличні значення температури T та середні значення ЕЧАКС КРС m_v (таблиця 3.2), отримано інтерполяційне рівняння яке описує залежність ЕЧАКС КРС від температури

$$\nu = A + BT + CT^2 + DT^3, \quad (3.7)$$

де, $A=4529,84, \text{ cm}^{-1}$, $B= 10,83, \text{ cm}^{-1}/^\circ\text{C}$, $C= -0,38, \text{ cm}^{-1}/(^\circ\text{C})^2$,

$D=-5,04 \cdot 10^{-7}, \text{ cm}^{-1}/(^\circ\text{C})^3$, ν – ЕЧАКС КРС, cm^{-1} , T – температура, $^\circ\text{C}$.

На рисунку 3.5 представлено залежність ЕЧАКС КРС від температури для Al_2O_3 та криву, побудовану за інтерполяційним виразом (3.7).

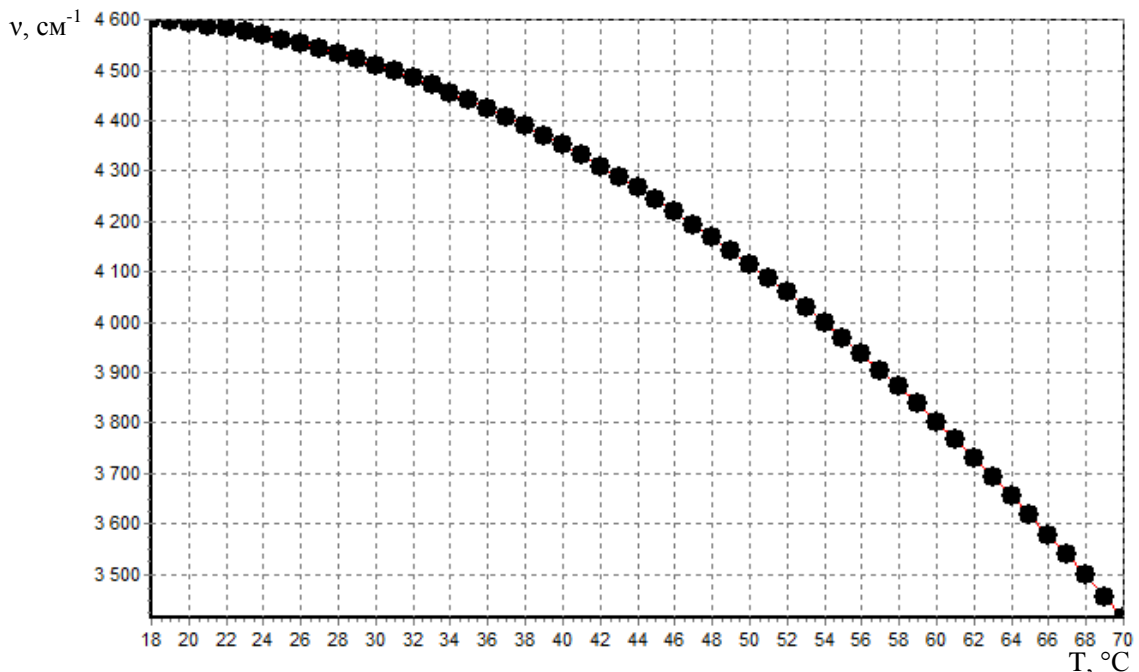


Рисунок 3.5 - Залежність ЕЧАКС КРС від температури для Al_2O_3 .

Абсолютна похибка апроксимації становить $0,012^{\circ}\text{C}$, відносна похибка - 0.00032% .

Враховуючи вираз (3.7), абсолютна похибка розрахунку ЕЧАКС КРС за інтерполяційним рівнянням описується виразом

$$\Delta v = (BT + 2CT + 3DT^2) \cdot \Delta T, \quad (3.8)$$

де ΔT - абсолютна похибка температури.

Виходячи з (3.8) абсолютна похибка розрахунку значення температури описується виразом

$$\Delta T = \frac{\Delta v}{BT + 2CT + 3DT^2}. \quad (3.9)$$

Перейшовши від абсолютних значень похибки до відносних, отримаємо

$$\delta v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{BT + 2CT + 3DT^2}{A + BT + CT^2 + DT^3} \cdot \delta T, \quad (3.10)$$

тоді

$$\delta T = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3}{BT + 2CT + 3DT^2} \cdot \delta v. \quad (3.11)$$

Перейшовши від похибок до непевностей вираз (3.11) матиме вигляд

$$u_T = \left| \frac{A + BT + CT^2 + DT^3}{BT + 2CT + 3DT^2} \right| \cdot u_v. \quad (3.12)$$

На рисунку 3.6 представлено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС.

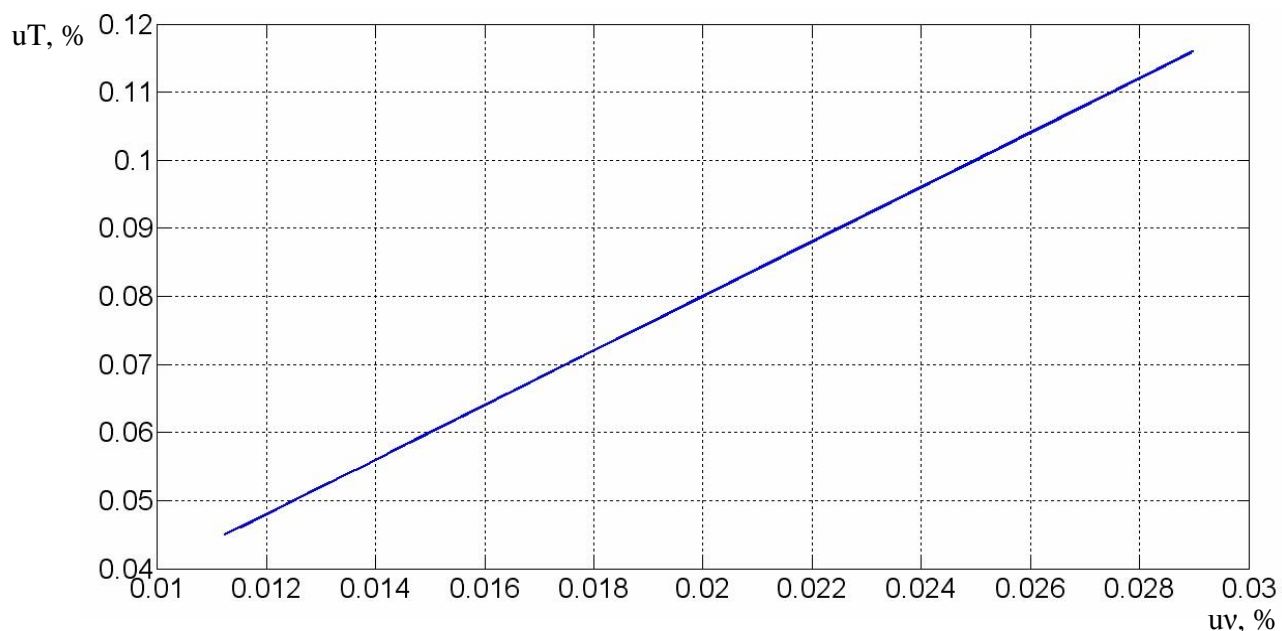


Рисунок 3.6 - Залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС для Al_2O_3 .

3.3 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для C_6H_{12}

На рисунок 3.7,а представлено спектри антистоксової компоненти КРС для C_6H_{12} за температури $49^{\circ}C$, відповідні значення ЕЧАКС КРС, які розраховані методом центру мас (рисунок 3.7,а), та усереднене значення ЕЧАКС КРС (рисунок 3.7,б).

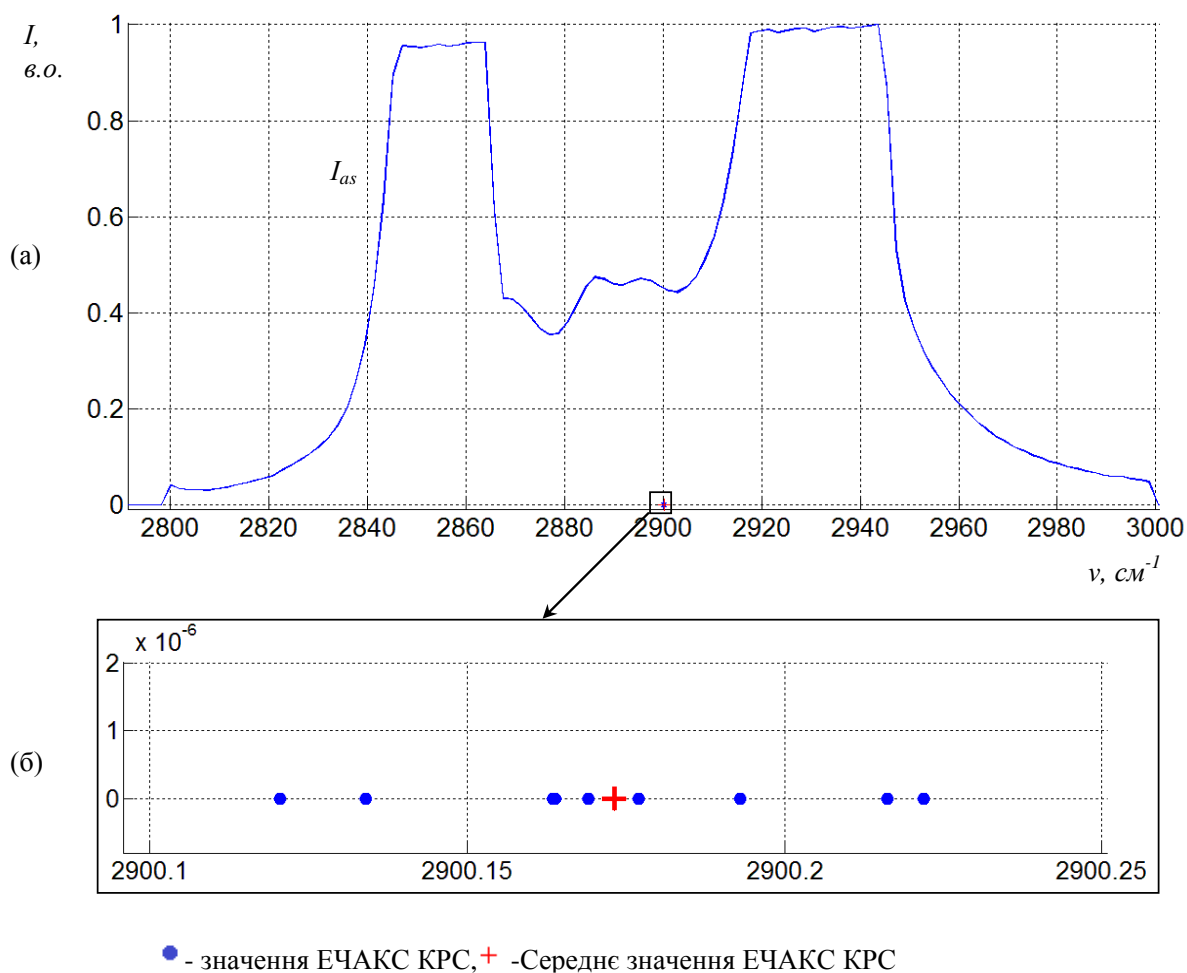


Рисунок 3.7 - Результати дослідження спектрів КРС для C_6H_{12} : а) спектри антистоксової компоненти КРС за температури 49°C , б) відповідні значення ЕЧАКС КРС та усереднене значення ЕЧАКС КРС

У таблиці 3.3 подано результати дослідження залежності ЕЧАКС КРС від температури та непевності визначення середнього значення ЕЧАКС КРС за експериментально отриманими спектрами антистоксової компоненти КРС для C_6H_{12} . з кроком 5°C . Результати дослідження із кроком 1°C подано в додатку А.3.

Таблиця 3.3. Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього

значення ЕЧАКС КРС для C_6H_{12}

№ п/п T, °C	Значення ЕЧАКС КРС ν , cm^{-1}										$m\nu$, cm^{-1}	$D\nu$, cm^{-2}	$\sigma\nu$, cm^{-1}	uv , cm^{-1}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
20	2914,16	2914,17	2914,17	2914,18	2914,19	2914,17	2914,18	2914,20	2914,17	2914,19	2914,18	0,000153336	0,012	0,039
25	2911,75	2911,76	2911,76	2911,73	2911,75	2911,73	2911,75	2911,74	2911,73	2911,76	2911,75	0,000137928	0,012	0,037
30	2909,32	2909,31	2909,31	2909,30	2909,32	2909,33	2909,29	2909,29	2909,33	2909,31	2909,31	0,000157425	0,013	0,040
35	2906,88	2906,87	2906,88	2906,86	2906,86	2906,87	2906,87	2906,86	2906,88	2906,88	2906,87	$6,58538 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026
40	2904,44	2904,44	2904,44	2904,45	2904,43	2904,45	2904,43	2904,46	2904,43	2904,44	2904,44	$6,87756 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026
45	2902,00	2902,00	2902,01	2902,02	2901,99	2901,99	2902,00	2901,99	2902,01	2901,99	2902,00	0,000114438	0,011	0,034
49	2900,16	2900,17	2900,17	2900,13	2900,20	2900,22	2900,12	2900,19	2900,16	2900,17	2900,16	0,000100400	0,010	0,032
50	2899,58	2899,57	2899,57	2899,57	2899,57	2899,57	2899,56	2899,58	2899,57	2899,58	2899,57	$5,39246 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,023
55	2897,14	2897,14	2897,15	2897,13	2897,12	2897,12	2897,13	2897,15	2897,14	2897,13	2897,14	$9,49221 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
60	2894,69	2894,71	2894,71	2894,69	2894,69	2894,69	2894,68	2894,72	2894,70	2894,70	2894,70	0,000134376	0,012	0,037
65	2892,27	2892,27	2892,26	2892,29	2892,26	2892,27	2892,27	2892,25	2892,26	2892,28	2892,27	$9,95817 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,032
70	2889,82	2889,82	2889,82	2889,82	2889,82	2889,85	2889,84	2889,85	2889,85	2889,81	2889,83	0,000205923	0,014	0,045

У таблиці 3.3 застосовано такі позначення: T - температура, за якої отримано спектри антистоксової компоненти КРС; m_v - математичне сподівання ЕЧАКС КРС; D_v - дисперсія ЕЧАКС КРС; σ_v - середньоквадратичне відхилення ЕЧАКС КРС; u_v - непевність визначення значення ЕЧАКС КРС.

За результатами досліджень (таблиця 3.3) непевність визначення значень ЕЧАКС КРС у діапазоні температур від 18°C до 70°C для C_6H_{12} не перевищує $0,045\text{cm}^{-1}$.

Враховуючи табличні значення температури T та середні значення ЕЧАКС КРС m_v (таблиця 3.3), отримано інтерполяційний вираз який описує залежність ЕЧАКС КРС від температури

$$v = A + BT, \quad (3.13)$$

де $A = 2923,91 \text{ cm}^{-1}$, $B = -0,48 \text{ cm}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, v – ЕЧАКС КРС, cm^{-1} , T – температура, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунку 3.8 представлено залежність ЕЧАКС КРС від температури для C_6H_{12} та криву, побудовану за інтерполяційним виразом (3.13).

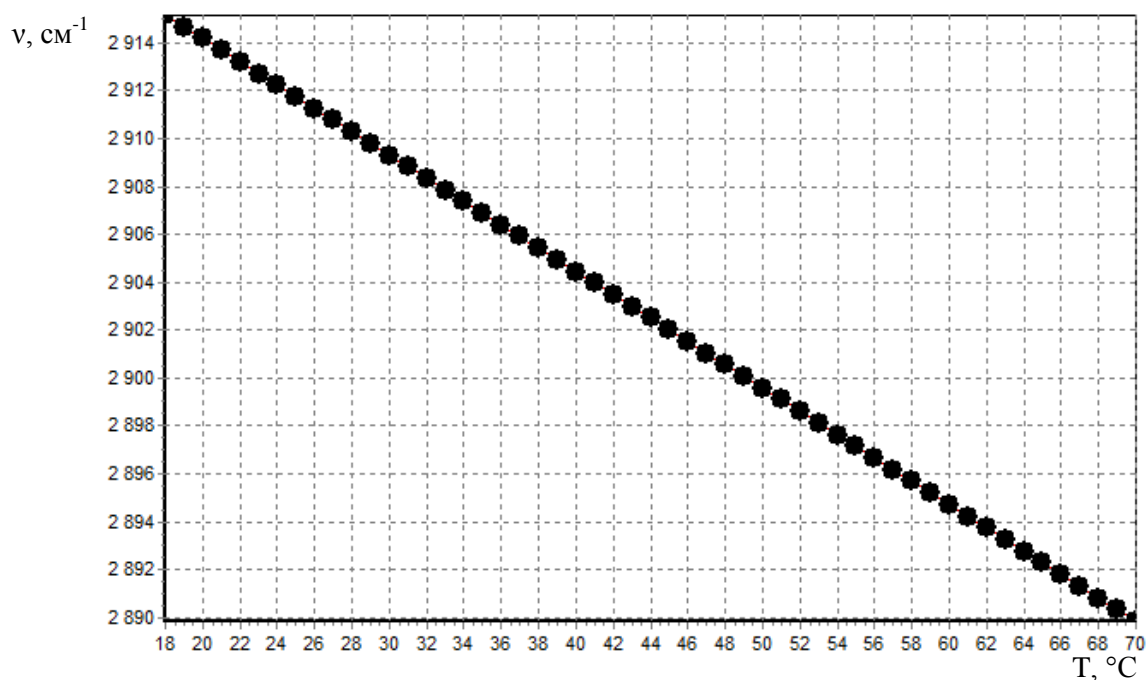


Рисунок 3.8 - Залежність ЕЧАКС КРС від температури для C_6H_{12} .

Абсолютна похибка апроксимації становить $0,0093^{\circ}\text{C}$, відносна похибка - 0.00032% .

Враховуючи вираз (3.13), абсолютна похибка розрахунку ЕЧАКС КРС за інтерполяційним рівнянням описується виразом

$$\Delta v = B \cdot \Delta T, \quad (3.14)$$

де ΔT - абсолютна похибка температури.

Виходячи з (3.14) абсолютна похибка розрахунку значення температури описується виразом

$$\Delta T = \frac{\Delta v}{B}. \quad (3.15)$$

Перейшовши від абсолютних значень похибки до відносних, отримаємо

$$\delta v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{BT}{A + BT} \cdot \delta T, \quad (3.16)$$

тоді

$$\delta T = \frac{A + BT}{BT} \cdot \delta v. \quad (3.17)$$

Перейшовши від похибок до непевностей вираз (3.17) матиме вигляд:

$$u_T = \left| \frac{A + BT}{BT} \right| \cdot u_v. \quad (3.18)$$

На рисунку 3.9 представлено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС.

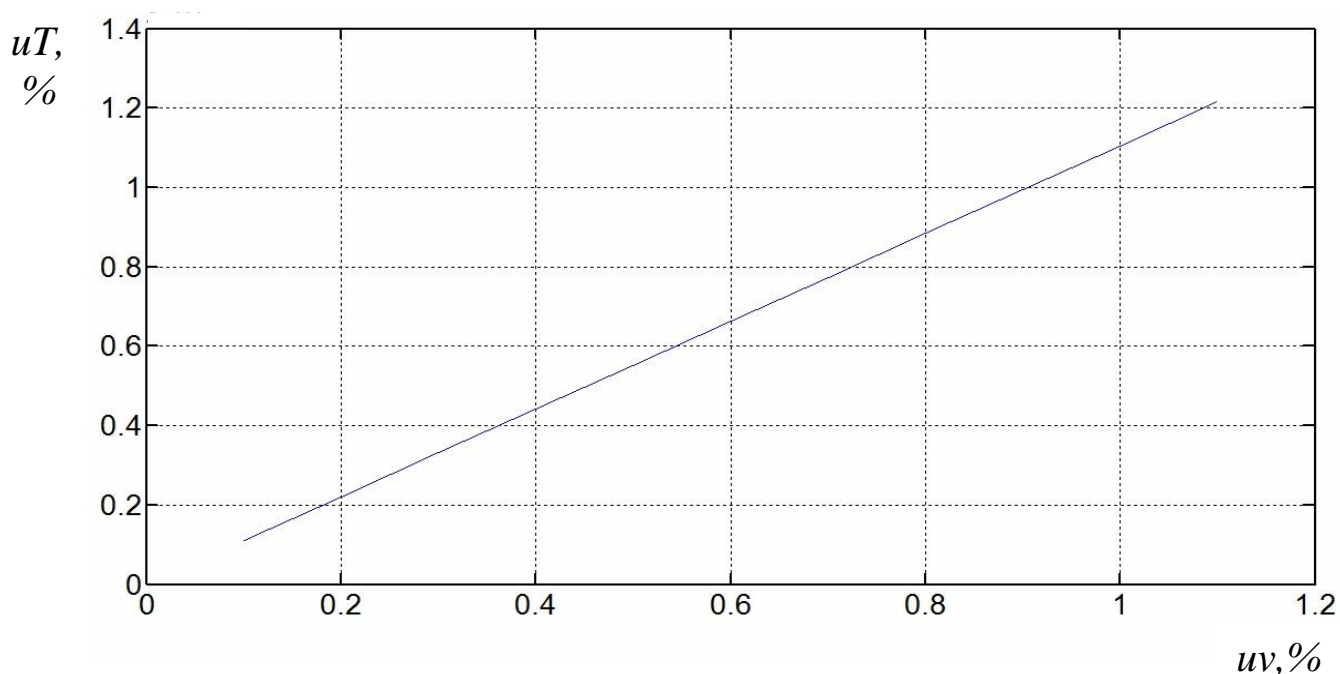


Рисунок 3.9 - Залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС для C_6H_{12} .

3.4 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для гуми

На рисунку 3.10,а представлено спектри антистоксової компоненти КРС для гуми за температури $69^{\circ}C$, відповідні значення ЕЧАКС КРС, які розраховані методом центру мас (рисунок 3.10,а), та усереднене значення ЕЧАКС КРС (рисунок 3.10,б).

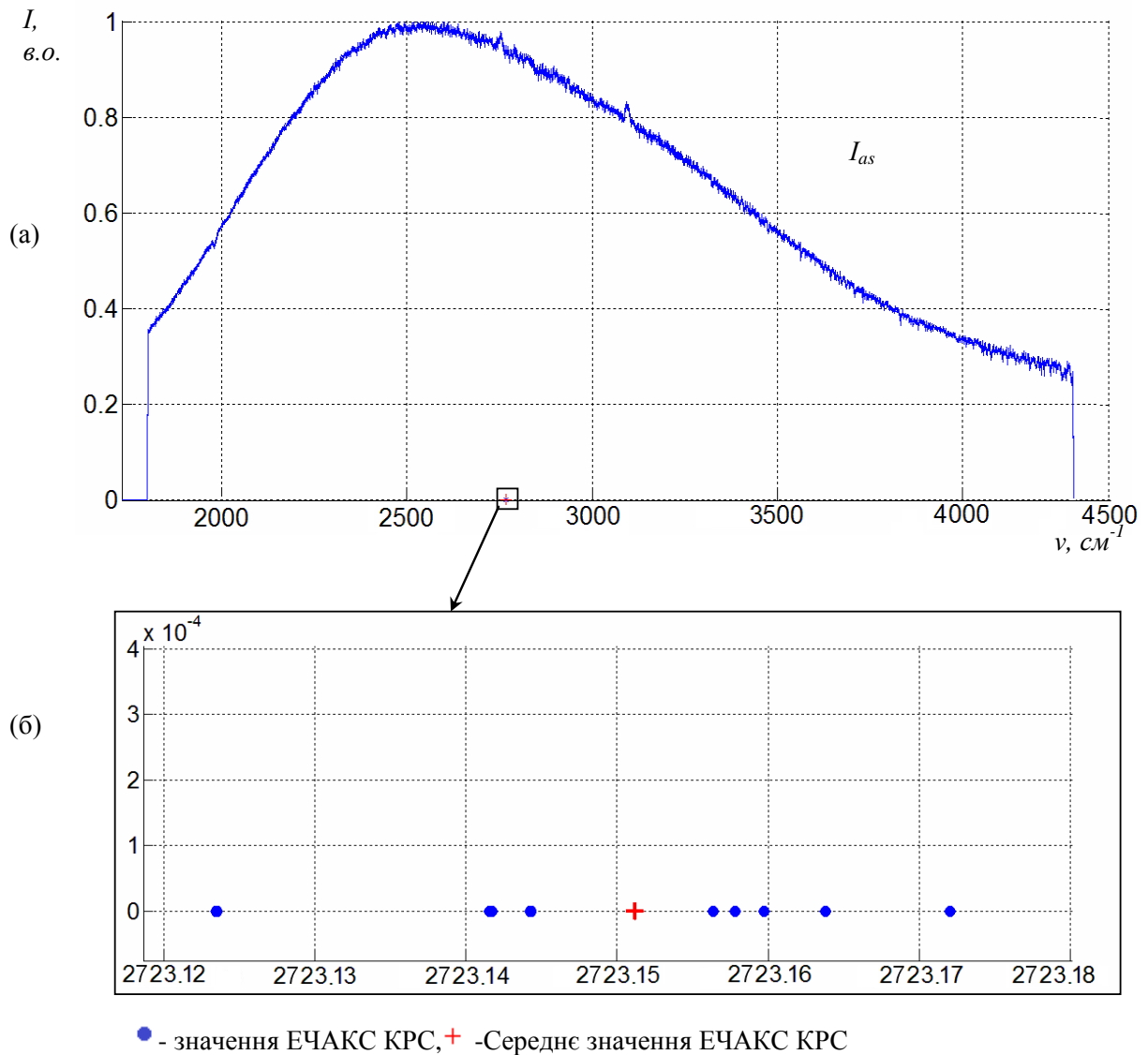


Рисунок 3.10 - Результати дослідження спектрів КРС для гуми: а) спектри антистоксової компоненти КРС за температури 69⁰С, б) відповідні значення ЕЧАКС КРС та усереднене значення ЕЧАКС КРС

У таблиці 3.4 подано результати дослідження залежності ЕЧАКС КРС від температури та непевності визначення середнього значення ЕЧАКС КРС за експериментально отриманими спектрами антистоксової компоненти КРС для гуми з кроком 5⁰С. Результати дослідження із кроком 1⁰С подано в додатку А.4.

Таблиця 3.4. Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього

значення ЕЧАКС КРС для гуми

№ п/п T, °C	Значення ЕЧАКС КРС ν , cm^{-1}										$m\nu$, cm^{-1}	$D\nu$, cm^{-2}	$\sigma\nu$, cm^{-1}	$u\nu$, cm^{-1}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
20	2942,27	2942,28	2942,27	2942,29	2942,30	2942,28	2942,29	2942,30	2942,27	2942,28	2942,28	0,000136063	0,012	0,037
25	2938,33	2938,34	2938,34	2938,30	2938,33	2938,31	2938,33	2938,32	2938,30	2938,33	2938,32	0,000143284	0,012	0,038
30	2930,19	2930,18	2930,18	2930,17	2930,19	2930,20	2930,16	2930,16	2930,18	2930,18	2930,18	0,000122348	0,011	0,035
35	2917,86	2917,85	2917,86	2917,84	2917,84	2917,84	2917,85	2917,84	2917,85	2917,83	2917,85	$7,12567 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,027
40	2901,34	2901,34	2901,35	2901,35	2901,34	2901,35	2901,34	2901,36	2901,36	2901,35	2901,35	$8,05687 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,028
45	2880,65	2880,65	2880,66	2880,67	2880,64	2880,64	2880,65	2880,64	2880,64	2880,64	2880,65	0,000120974	0,011	0,035
50	2855,79	2855,78	2855,78	2855,78	2855,79	2855,78	2855,77	2855,79	2855,80	2855,78	2855,79	$5,79999 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,024
55	2826,73	2826,73	2826,75	2826,73	2826,72	2826,72	2826,73	2826,75	2826,73	2826,72	2826,73	0,000113011	0,011	0,034
60	2793,49	2793,51	2793,51	2793,49	2793,49	2793,49	2793,48	2793,52	2793,49	2793,50	2793,50	0,000132445	0,012	0,036
65	2756,09	2756,09	2756,08	2756,10	2756,08	2756,09	2756,09	2756,07	2756,10	2756,10	2756,09	$9,76869 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
69	2723,16	2723,13	2723,14	2723,13	2723,13	2723,15	2723,16	2723,14	2723,16	2723,13	2723,14	0,000147243	0,012	0,038
70	2714,48	2714,48	2714,48	2714,48	2714,47	2714,51	2714,50	2714,51	2714,49	2714,49	2714,49	0,000146848	0,012	0,038

У таблиці 3.4 застосовано такі позначення: T - температура, за якої отримано спектри антистоксової компоненти КРС; m_v - математичне сподівання ЕЧАКС КРС; D_v - дисперсія ЕЧАКС КРС; σ_v - середньоквадратичне відхилення ЕЧАКС КРС; u_v - непевність визначення значення ЕЧАКС КРС.

За результатами досліджень (таблиця 4) непевність визначення значень ЕЧАКС КРС у діапазоні температур від 18°C до 70°C для гуми не перевищує $0,046\text{cm}^{-1}$.

Враховуючи табличні значення температури T та середні значення ЕЧАКС КРС m_v (таблиця 3.4), отримано інтерполяційний вираз який описує залежність ЕЧАКС КРС від температури

$$\nu = A + BT + CT^2 + DT^3, \quad (3.19)$$

де $A=2916,30, \text{cm}^{-1}$, $B= 2,97, \text{cm}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, $C= -0,08, \text{cm}^{-1}/(^{\circ}\text{C})^2$,
 $D=2,72 \cdot 10^{-7}, \text{cm}^{-1}/(^{\circ}\text{C})^3$, ν – ЕЧАКС КРС, cm^{-1} , T – температура, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунку 3.11 представлено залежність ЕЧАКС КРС від температури для гуми та криву, побудовану за інтерполяційним виразом (3.19).

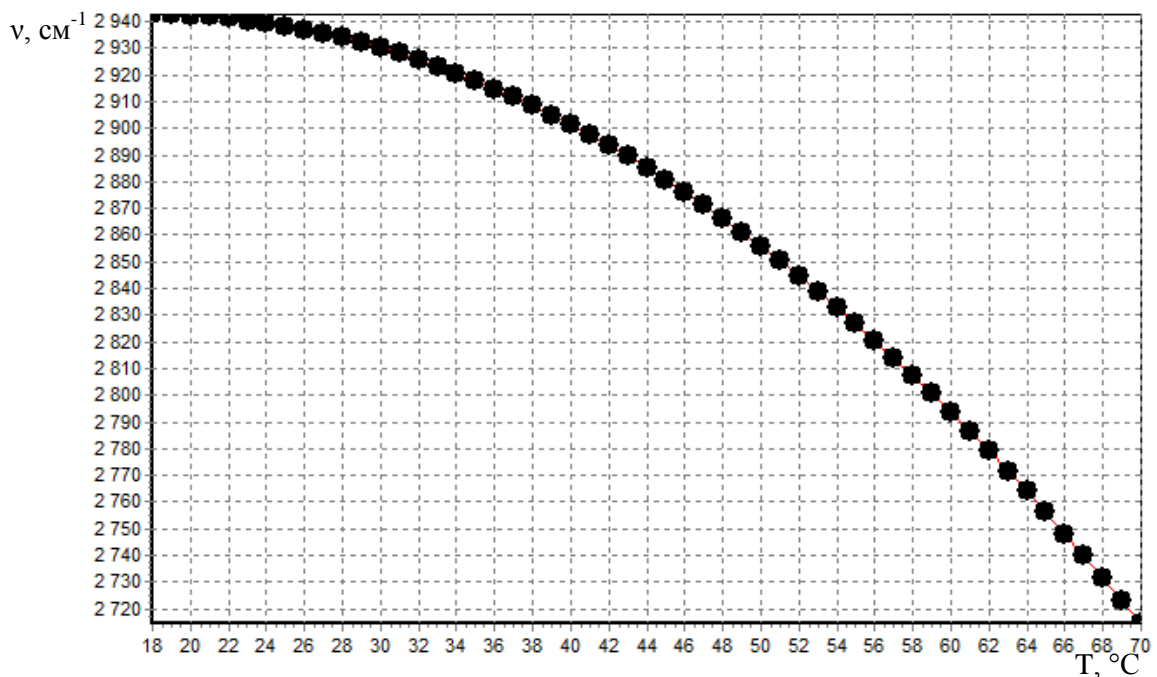


Рисунок 3.11 - Залежність ЕЧАКС КРС від температури для гуми.

Абсолютна похибка апроксимації становить $0,01^{\circ}\text{C}$, відносна похибка - 0.0003% .

Враховуючи вираз (3.19), абсолютна похибка розрахунку ЕЧАКС КРС за інтерполяційний вираз описується

$$\Delta v = (BT + 2CT + 3DT^2) \cdot \Delta T, \quad (3.20)$$

де ΔT - абсолютна похибка температури.

Виходячи з (3.20) абсолютна похибка розрахунку значення температури описується виразом

$$\Delta T = \frac{\Delta v}{BT + 2CT + 3DT^2}. \quad (3.21)$$

Перейшовши від абсолютних значень похибки до відносних, отримаємо

$$\delta v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{BT + 2CT + 3DT^2}{A + BT + CT^2 + DT^3} \cdot \delta T, \quad (3.22)$$

тоді

$$\delta T = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3}{BT + 2CT + 3DT^2} \cdot \delta v. \quad (3.23)$$

Перейшовши від похибок до непевностей вираз (3.23) матиме вигляд

$$u_T = \left| \frac{A + BT + CT^2 + DT^3}{BT + 2CT + 3DT^2} \right| \cdot u_v. \quad (3.24)$$

На рисунку 3.12 представлено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС.

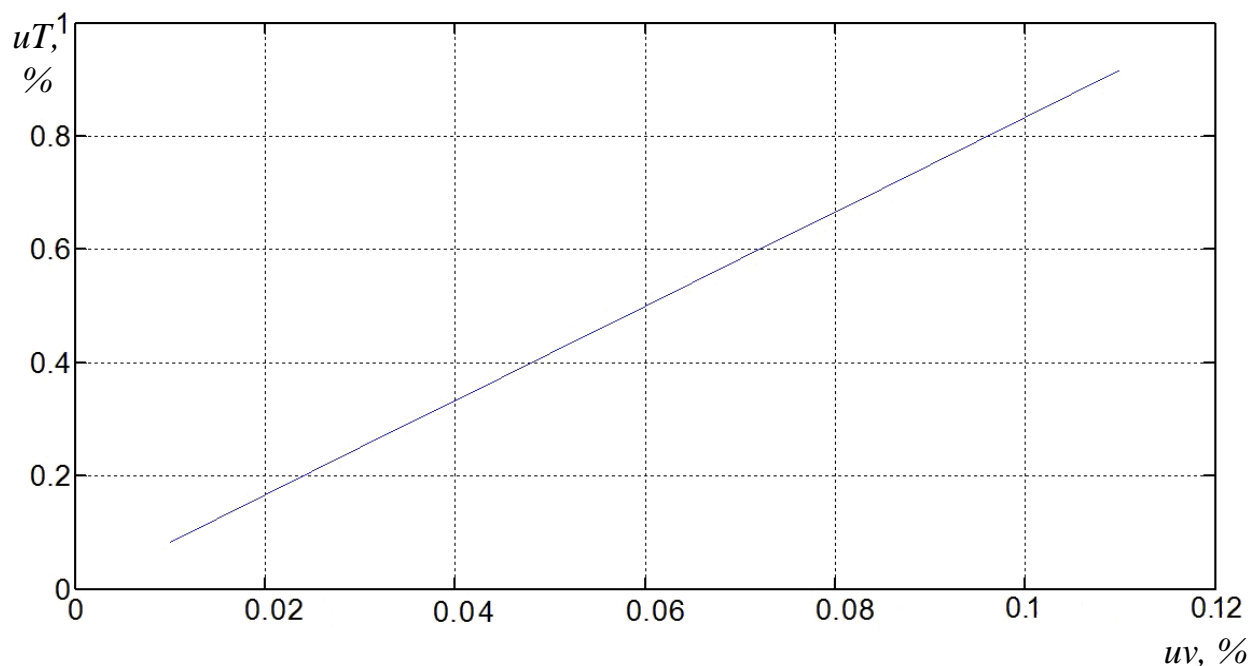


Рисунок 3.12 - Залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС для гуми.

3.5 Дослідження температурної залежності ЕЧАКС КРС для $C_{10}H_8$

На рисунку 13,а представлено спектри антистоксової компоненти КРС для $C_{10}H_8$ за температури $18^{\circ}C$, відповідні значення ЕЧАКС КРС, які розраховані методом центру мас (рисунок 13,а), та усереднене значення ЕЧАКС КРС (рисунок 13,б).

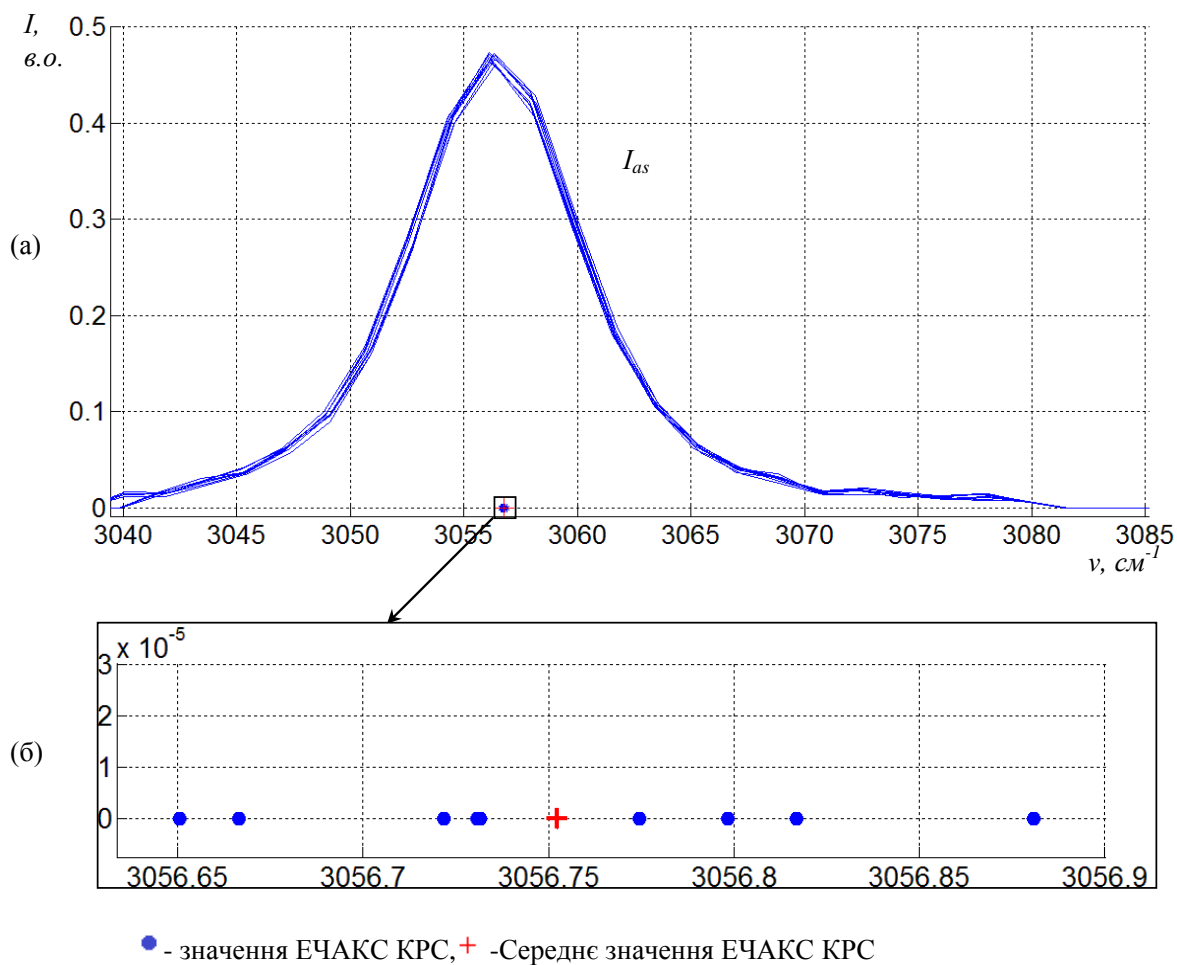


Рисунок 3.13 - Результати дослідження спектрів КРС для C_{10}H_8 : а) спектри антистоксової компоненти КРС за температури 18°C , б) відповідні значення ЕЧАКС КРС та усереднене значення ЕЧАКС КРС

У таблиці 3.5 подано результати дослідження залежності ЕЧАКС КРС від температури та непевності визначення середнього значення ЕЧАКС КРС за експериментально отриманими спектрами антистоксової компоненти КРС для C_{10}H_8 з кроком 5°C . Результати дослідження із кроком 1°C подано в додатку А.5.

Таблиця 3.5. Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього

значення ЕЧАКС КРС для C₁₀H₈

№ п/п T, °C	Значення ЕЧАКС КРС ν , см ⁻¹										$m\nu$, см ⁻¹	D ν , см ⁻²	$\sigma\nu$, см ⁻¹	$u\nu$, см ⁻¹
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
18	3056,88	3056,65	3056,66	3056,72	3056,73	3056,73	3056,77	3056,79	3056,74	3056,88	3056,75	0,000122317	0,011	0,035
20	3108,91	3108,93	3108,92	3108,94	3108,95	3108,92	3108,93	3108,95	3108,92	3108,94	3108,93	0,000153336	0,012	0,039
25	3144,26	3144,26	3144,26	3144,23	3144,25	3144,23	3144,25	3144,24	3144,24	3144,26	3144,25	0,000137928	0,012	0,037
30	3187,45	3187,44	3187,44	3187,43	3187,45	3187,46	3187,42	3187,42	3187,46	3187,44	3187,44	0,000157425	0,013	0,040
35	3238,51	3238,50	3238,51	3238,50	3238,49	3238,50	3238,50	3238,49	3238,51	3238,51	3238,50	$6,58538 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026
40	3297,45	3297,44	3297,45	3297,46	3297,44	3297,46	3297,44	3297,47	3297,44	3297,45	3297,45	$6,87756 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026
45	3364,27	3364,26	3364,27	3364,29	3364,25	3364,25	3364,26	3364,25	3364,27	3364,26	3364,26	0,000114438	0,011	0,034
50	3438,97	3438,96	3438,96	3438,96	3438,97	3438,96	3438,95	3438,97	3438,96	3438,97	3438,96	$5,39246 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,023
55	3521,53	3521,53	3521,55	3521,53	3521,52	3521,52	3521,53	3521,55	3521,54	3521,53	3521,53	$9,49221 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
60	3611,97	3611,98	3611,99	3611,96	3611,97	3611,96	3611,96	3612,00	3611,98	3611,98	3611,97	0,000134376	0,012	0,037
65	3710,30	3710,30	3710,29	3710,32	3710,29	3710,30	3710,30	3710,28	3710,29	3710,31	3710,30	$9,95817 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,032
70	3816,49	3816,49	3816,49	3816,48	3816,48	3816,51	3816,51	3816,52	3816,51	3816,48	3816,49	0,000205923	0,014	0,045

У таблиці 3.5 застосовано такі позначення: T - температура, за якої отримано спектри антистоксової компоненти КРС; m_v - математичне сподівання ЕЧАКС КРС; D_v - дисперсія ЕЧАКС КРС; σ_v - середньоквадратичне відхилення ЕЧАКС КРС; u_v - непевність визначення значення ЕЧАКС КРС.

За результатами досліджень (таблиця 3.5) непевність визначення значень ЕЧАКС КРС у діапазоні температур від 18°C до 70°C для C_{10}H_8 не перевищує $0,045\text{cm}^{-1}$.

Враховуючи табличні значення температури T та середні значення ЕЧАКС КРС m_v (таблиця 3.5), отримано інтерполяційне рівняння яке описує залежність ЕЧАКС КРС від температури

$$v = A + BT + CT^2, \quad (3.25)$$

де $A=3046,41, \text{cm}^{-1}$, $B= -0,02, \text{cm}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, $C= 0,16, \text{cm}^{-1}/(^{\circ}\text{C})^2$, v – ЕЧАКС КРС, cm^{-1} , T – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Абсолютна похибка апроксимації становить $0,009^{\circ}\text{C}$, відносна похибка - 0.00026% .

Враховуючи вираз (3.25), абсолютна похибка розрахунку ЕЧАКС КРС за інтерполяційним рівнянням описується виразом

$$\Delta v = (BT + 2CT) \cdot \Delta T, \quad (3.26)$$

де ΔT - абсолютна похибка температури.

Виходячи з (3.26) абсолютна похибка розрахунку значення температури описується виразом

$$\Delta T = \frac{\Delta v}{BT + 2CT}. \quad (3.27)$$

Перейшовши від абсолютних значень похибки до відносних, отримаємо

$$\delta v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{BT + 2CT^3}{A + BT + CT^2} \cdot \delta T, \quad (3.28)$$

тоді

$$\delta T = \frac{A + BT + CT^2}{BT + 2CT} \cdot \delta v. \quad (3.29)$$

Перейшовши від похибок до непевностей вираз (3.29) матиме вигляд

$$u_T = \left| \frac{A + BT + CT^2}{BT + 2CT} \right| \cdot u_v. \quad (3.30)$$

На рисунку 3.14 представлено залежність ЕЧАКС КРС від температури для H_2O та криву, побудовану за інтерполяційним рівнянням (3.25) для C_{10}H_8 .

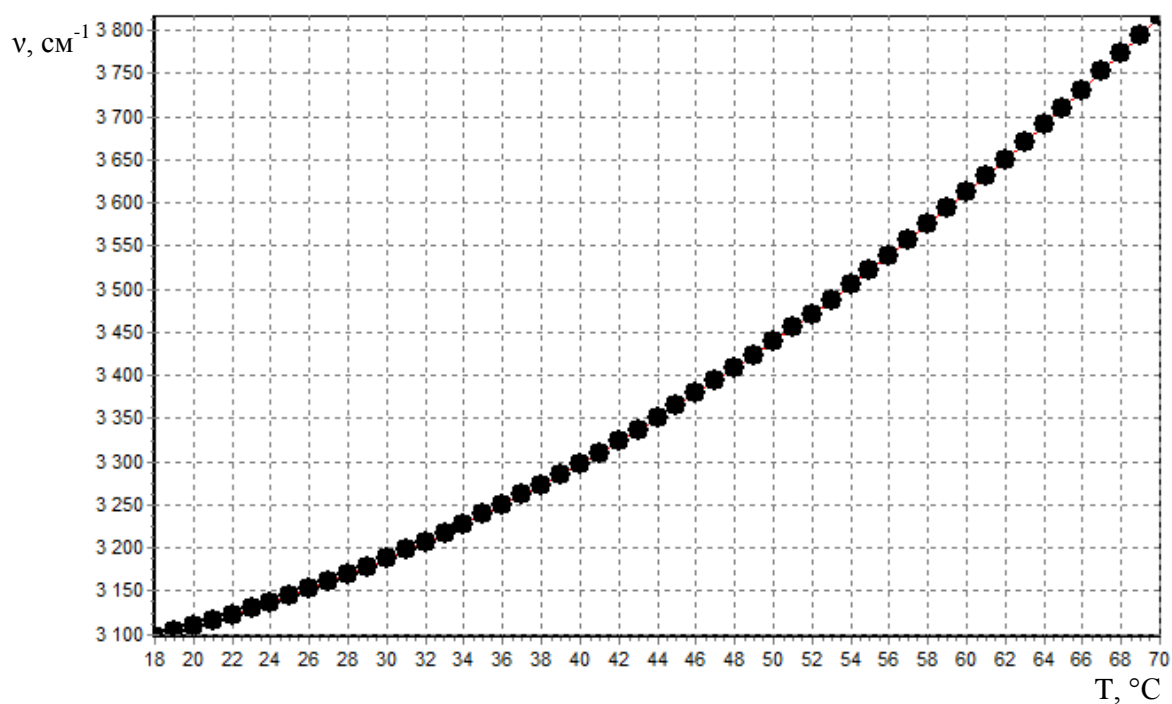


Рисунок 3.14 - Залежність ЕЧАКС КРС від температури для C_{10}H_8 .

На рисунку 3.15 представлено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС.

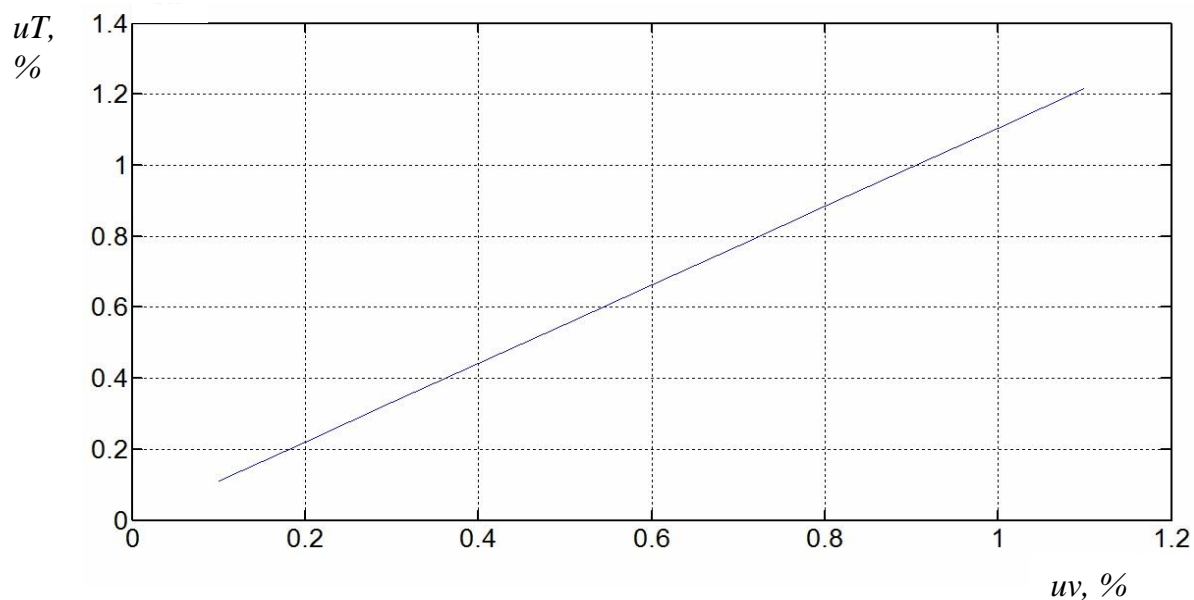


Рисунок 3.15 - Залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС для C_{10}H_8

Отримані залежності та аналітичні вирази дозволяють поставити вимоги до непевності вимірювання ЕЧАКС КРС залежно від необхідної непевності вимірювання температури або оцінити непевність вимірювання температури за непевністю вимірювання ЕЧАКС КРС.

3.6 Висновки до розділу

1. Експериментально отримано спектри КРС для: води, окису алюмінію, циклогексану, гуми та нафталіну.
2. Визначено залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури для кожного з досліджуваних об'єктів.
3. Отримано інтерполяційні вирази які описують залежність ЕЧАКС КРС від температури для п'яти досліджуваних об'єктів.
4. Досліджено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС.
5. Отримані залежності та інтерполяційні вирази дозволяють поставити вимоги до непевності вимірювання ЕЧАКС КРС залежно від необхідної непевності вимірювання температури або оцінити непевність вимірювання температури за непевністю вимірювання ЕЧАКС КРС.

РОЗДІЛ 4 ГРАДУЮВАННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ПОБУДОВАНОГО НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА

Враховуючи той факт, що спектроаналізатор та лазер, які використовуються в засобі вимірювання температури методом КРС як завершені блоки, що мають певні метрологічні характеристики, зменшити похибку вимірювання температури можна лише зменшуючи методичну похибку та похибки вторинного кола оптичної схеми.

Методичну похибку можна зменшити за рахунок використання менш потужних лазерів та зменшення часу вимірювання (рисунок 2.2).

Похибку вторинного кола оптичної схеми можна зменшити лише градуюванням функції перетворення засобу вимірювання. Можливі два способи градуювання:

- за температурою,
- за спектром.

4.1 Градуювання засобу вимірювання за температурою

На рисунку 4.1 представлено структурну схему устави для градуювання засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла. Досліджуваний об'єкт розміщується в термостаті. Джерело когерентного монохроматичного світла випромінює промінь, який проходить через первинне коло оптичної схеми та потрапляє на досліджуваний об'єкт. Відбите випромінювання потрапляє через вторинне коло оптичної схеми на спектроаналізатор де отримується спектр КРС. В даній уставі персональний

комп'ютер використовується для керування процесом градування та опрацювання результатів вимірювання.

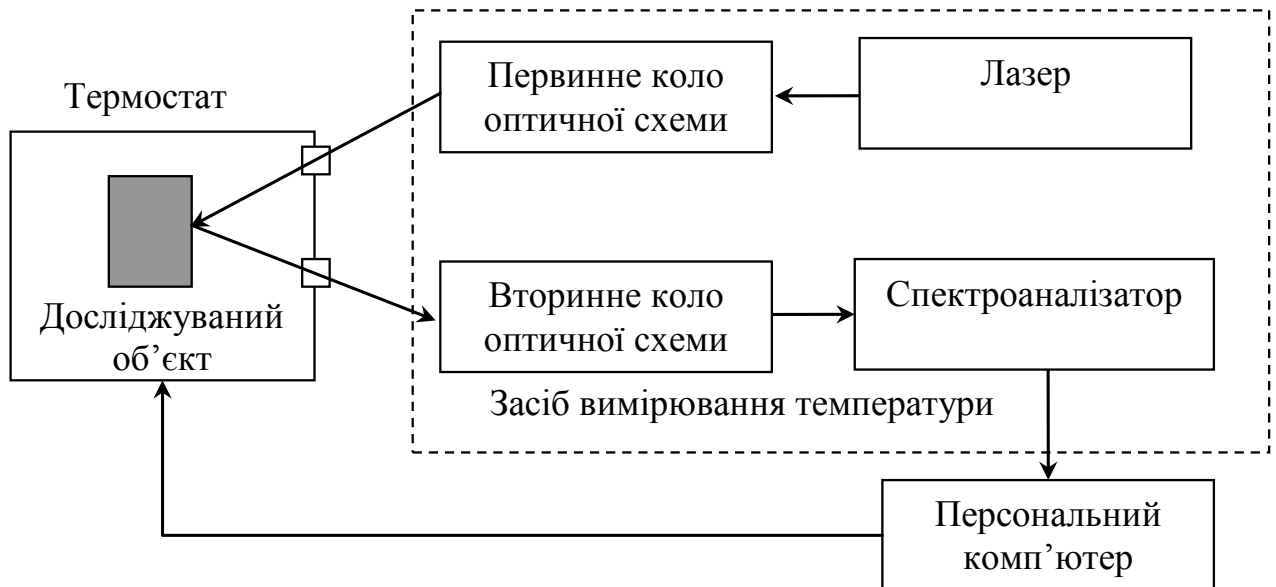


Рисунок 4.1 - Структурна схема устави для градування засобу вимірювання температури за температурою

В термостаті температура може змінюватися з кроком 0.1°K . Для кожної досліджуваної температурної точки десять разів визначаємо спектр КРС. Інформація про спектри КРС передається на персональний комп'ютер де проводиться остаточне опрацювання результатів вимірювання. Для кожного з отриманих спектрів методом центру мас визначається ЕЧАКС КРС. Для десяти значень ЕЧАКС КРС, отриманих у кожній температурній точці, знаходиться математичне сподівання, яке відповідає даній температурній точці.

У випадку, якщо градування буде проводитись, наприклад, із кроком 0.1 K , то у діапазоні температур від 0 до 100°C потрібно буде провести вимірювання у 1000 точках, що суттєво збільшує час градування. Тому необхідно оптимізувати вибір кількості точок для градування.

Основний вплив на характер залежності ЕЧАКС КРС від температури має об'єкт вимірювання (рисунок 3.2, 3.5, 3.8, 3.11, 3.14). Функція перетворення спектроаналізатора, вторинного кола оптичної схеми не вносять суттєвих змін до характеру цієї залежності.

Для лінійної залежності ЕЧАКС КРС від температури достатньо мати три точки для апроксимації. Якщо залежність є нелінійною необхідно мати більше ніж три точки. Для визначення оптимальної кількості точок градування проведено дослідження залежності похибки апроксимації від кількості коефіцієнтів апроксимаційної кривої для кожного із досліджуваних об'єктів (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1. Залежність похибки апроксимації від кількості точок градування

<i>Досліджуваний об'єкт</i>	<i>Кількість точок градування</i>	<i>Відносна похибка, $\times 10^{-3} \%$</i>
H ₂ O	4	0.580
	5	0.542
	6	0.587
	7	0.733
	8	0.686
Al ₂ O ₃	5	0.470
	6	0.297
	7	0.330
	8	0.400
C ₆ H ₁₂	3	0.308
	4	0.329
	5	0.334
	6	0.390
	7	0.416

Продовження таблиці 4.1

	8	0.503
Гума	5	0.520
	6	0.448
	7	0.405
	8	0.420
C ₁₀ H ₈	4	0.284
	5	0.282
	6	0.297
	7	0.335
	8	0.336

Для інтерполяційних виразів (3.1), (3.7), (3.13), (3.19), (3.25), які описують залежність ЕЧАКС КРС від температури, у діапазоні температур 18...70 °С вибиралось n точок для градуювання, кількість яких була як мінімум на одиницю більша за кількості коефіцієнтів у інтерполяційних виразах. Для даної кількості точок градуювання отримано апроксимаційну криву, яка в подальшому порівнювалася із відповідним інтерполяційним виразом (3.1), (3.7), (3.13), (3.19), (3.25) у кожній температурній точці. Максимальне значення похибки для певної кількості точок градуювання представлено в таблиці 4.1.

За результатами проведених досліджень (таблиця 4.1) та за критеріями найменшої похибки апроксимації і мінімальної кількості точок градуювання оптимальна кількість точок є такою:

- H₂O – 5
- Al₂O₃ – 6
- C₆H₁₂ – 3
- Гума – 7
- C₁₀H₈ – 5

Основною перевагою градуювання функції перетворення засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за температурою є те, що відбувається градуювання функції перетворення засобу загалом.

Основним недоліком даного методу є те, що проградуований засіб вимірювання може використовуватися лише для того об'єкту, який застосовувався при градуюванні функції перетворення засобу вимірювання. Якщо змінюється об'єкт вимірювання, то необхідним є повторне градуювання. Також варто відзначити те, що таке градуювання є досить довготривалим.

4.2 Градуювання засобу вимірювання за спектром

На рисунок 4.2 представлено структурну схему устави для градуювання за спектром засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла. Галогенова лампа формує світловий потік із спектром $\dot{I}(\nu)$, який проходить через послаблюючий оптичний елемент із комплексною частотною характеристикою $H_1(\nu)$ та потрапляє на спектроаналізатор із комплексною частотною характеристикою $H_2(\nu)$. Спектроаналізатор реєструє спектр сигналу та передає інформацію про нього на персональний комп'ютер.

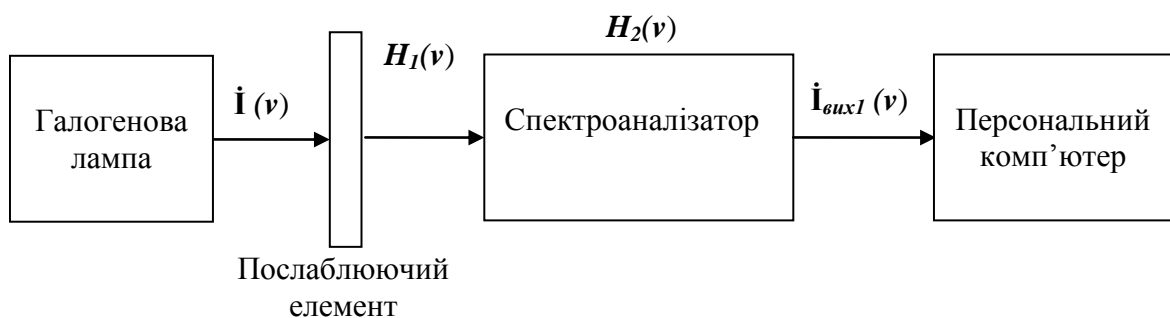


Рисунок 4.2 - - Структурна схема устави для градуювання засобу вимірювання температури за спектром без оптичної схеми

Спектр сигналу $\dot{I}_{вих1}(\nu)$ на виході спектроаналізатора можна визначити за формулою

$$\dot{I}_{вих1}(\nu) = \dot{I}(\nu) \cdot |H_1(\nu)|^2 \cdot |H_2(\nu)|^2. \quad (4.1)$$

Для градуювання необхідно встановити вторинне коло оптичної схеми між послаблюючим елементом та спектроаналізатором (рисунок 4.3) та знову провести вимірювання спектру, інформація про який також передається на персональний комп'ютер.

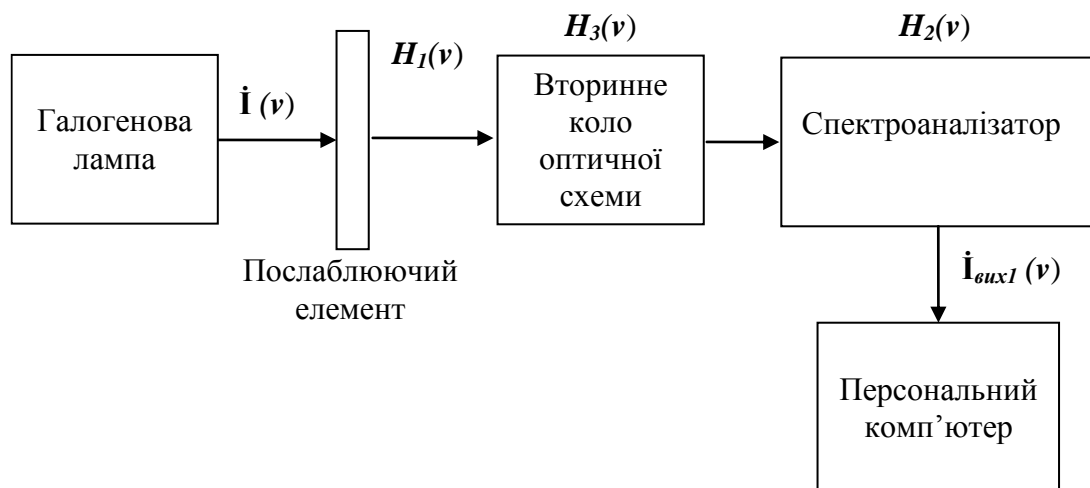


Рисунок 4.3 - - Структурна схема устави для градуювання засобу вимірювання температури за спектром з оптичною схемою

Спектр сигналу $\dot{I}_{вих2}(\nu)$ на виході спектроаналізатора можна визначити за формулою

$$\dot{I}_{вих2}(\nu) = \dot{I}(\nu) \cdot |H_1(\nu)|^2 \cdot |H_2(\nu)|^2 \cdot |H_3(\nu)|^2. \quad (4.2)$$

Враховуючи вирази (4.1), (4.2) та взявши відношення спектрів $\dot{I}_{вих2}(\nu)$ до $\dot{I}_{вих1}(\nu)$ отримаємо

$$\frac{\dot{I}_{вих2}(\nu)}{\dot{I}_{вих1}(\nu)} = \frac{\dot{I}(\nu) \cdot |H_1(\nu)|^2 \cdot |H_2(\nu)|^2 \cdot |H_3(\nu)|^2}{\dot{I}(\nu) \cdot |H_1(\nu)|^2 \cdot |H_2(\nu)|^2}. \quad (4.3)$$

Після скорочення вираз (4.3) набуде вигляду

$$\frac{\dot{I}_{вих2}(\nu)}{\dot{I}_{вих1}(\nu)} = |H_3(\nu)|^2. \quad (4.4)$$

Таким чином отримано дійсне значення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми засобу вимірювання температури. Для отримання коректних результатів необхідно, щоб за час вимірювання двох спектрів $\dot{I}_{вих2}(\nu)$ та $\dot{I}_{вих1}(\nu)$ спектр галогенової лампи $\dot{I}(\nu)$, комплексні частотні характеристики послаблюючого елемента $H_1(\nu)$ і спектроаналізатора $H_2(\nu)$ не змінювалися.

На рисунку 4.4 представлено залежність непевності визначення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми від зміни комплексних частотних характеристик $H_1(\nu)$, $H_2(\nu)$ та спектру галогенної лампи $\dot{I}(\nu)$ при градуюванні. Дослідження проводилися із врахування лише випадкових похибок, а також із врахуванням сумарної похибки (випадкової, лінійної та нелінійної одночасно). На рисунку 4.4 відносна похибка комплексних частотних характеристик $H_1(\nu)$, $H_2(\nu)$ та спектру галогенної лампи $\dot{I}(\nu)$ позначена як δH .

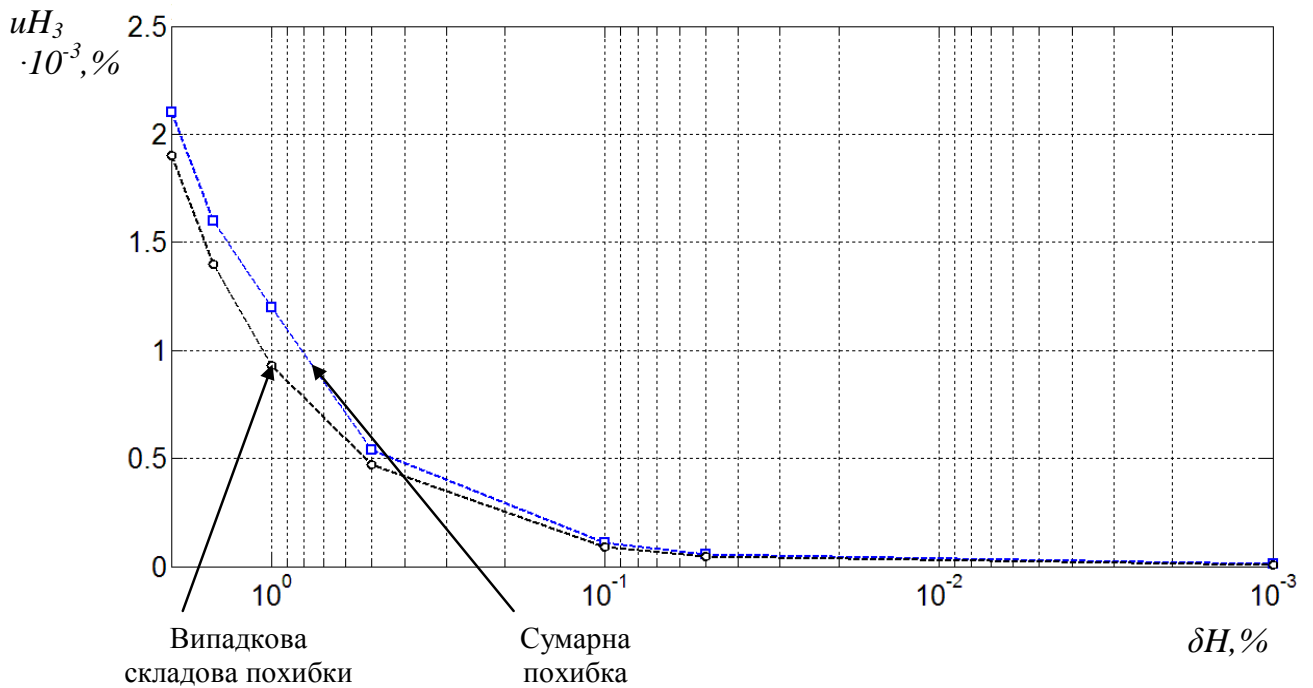


Рисунок 4.4 - Залежність непевності визначення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми від зміни комплексних частотних характеристик $H_1(\nu)$, $H_2(\nu)$ та спектру галогенної лампи $I(\nu)$ при градуюванні

Отримані результати (рисунок 4.4) дозволять оцінити непевність визначення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми залежно від відносної зміни комплексних частотних характеристик $H_1(\nu)$, $H_2(\nu)$ та спектру галогенної лампи $I(\nu)$ за час проведення градуювання. Окрім того можна встановити вимоги до стабільності галогенової лампи та комплексних частотних характеристик спектроаналізатора та послаблюючого елементу, які використовуються для градуювання засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

Основною перевагою градуювання функції перетворення засобу вимірювання температури на основі ефекту КРС за спектром є те, що

градуваний засіб можна використовувати для будь яких досліджуваних об'єктів.

Основним недоліком даного методу є те, що градується лише вторинне коло оптичної схеми засобу вимірювання температури. Похибка лазера та похибка спектроаналізатор цілком входять в похибку результату вимірювання температури.

4.3 Висновки до розділу

1. Запропоновано методи та структурні схеми устав для градування засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла, за температурою та за спектром.

2. Оптимізовано кількість точок градування засобу вимірювання температури для кожного з отриманих інтерполяційних виразів за критерієм мінімальної похибки апроксимації.

3. Термометр, проградуваний за температурою, може використовуватися лише для вимірювання температури того об'єкту, який застосовувався при градуванні функції перетворення. Якщо змінюється об'єкт вимірювання, то необхідним є повторне градування.

4. Термометр, який проградуваний за спектром, може використовуватися для вимірювання температури будь яких досліджуваних об'єктів. Проте градується лише вторинне коло оптичної схеми засобу вимірювання температури. Похибка лазера і спектроаналізатора додаються до похибки результату вимірювання.

5. Отримано залежність непевності визначення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми від зміни комплексних частотних характеристик спектроаналізатора, послаблюючого елемента та спектру галогенної лампи за час градування, що дозволяє встановити вимоги до їх стабільності.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз основних переваг та недоліків контактних і безконтактних методів вимірювання температури. Проаналізовано можливість їх застосування для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

2. Враховуючи результати проведеного аналізу, для вимірювання температури об'єктів малих розмірів оптимальним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла.

3. Для реалізації засобу вимірювання температури об'єктів малих розмірів доцільним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти антистоксової компоненти спектру, що забезпечує зменшення часу вимірювання та методичної похибки.

4. Отримано вираз відносної похибки засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за еквівалентною частотою антистоксової компоненти спектру.

5. Синтезовано моделі антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла різної форми.

6. Створено програмні моделі оптичних елементів та оптичних схем засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

7. Оптимальним для визначення значення ЕЧАКС КРС є метод центру мас. Його використання забезпечує мінімальну непевність визначення ЕЧАКС КРС у порівнянні з іншими методами.

8. Досліджено залежність значення ЕЧАКС КРС від інтенсивності лазерного випромінювання та встановлено, що зміна інтенсивності лазерного променя не впливає на похибку визначення значення ЕЧАКС КРС.

9. Досліджено залежність непевності визначення ЕЧАКС КРС від роздільної здатності спектроаналізатора за частотою. Існує певне значення роздільної здатності спектроаналізатора, при зменшенні якого непевність

визначення ЕЧАКС КРС практично не зменшується. Це дозволяє вибрати спектроаналізатор з оптимальними характеристиками для засобу вимірювання температури, який побудований на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

10. Експериментально отримано спектри КРС для: води, окису алюмінію, циклогексану, гуми та нафталіну.

11. Визначено залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури для кожного з досліджуваних об'єктів.

12. Отримано інтерполяційні вирази які описують залежність ЕЧАКС КРС від температури для п'яти досліджуваних об'єктів.

13. Досліджено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС.

14. Отримані залежності та інтерполяційні вирази дозволяють поставити вимоги до непевності вимірювання ЕЧАКС КРС залежно від необхідної непевності вимірювання температури або оцінити непевність вимірювання температури за непевністю вимірювання ЕЧАКС КРС.

15. Запропоновано методи та структурні схеми устав для градуювання засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла, за температурою та за спектром.

16. Оптимізовано кількість точок градуювання засобу вимірювання температури для кожного з отриманих інтерполяційних виразів за критерієм мінімальної похибки апроксимації.

17. Термометр, проградуваний за температурою, може використовуватися лише для вимірювання температури того об'єкту, який застосовувався при градуюванні функції перетворення. Якщо змінюється об'єкт вимірювання, то необхідним є повторне градуювання.

18. Термометр, який проградуваний за спектром, може використовуватися для вимірювання температури будь яких досліджуваних об'єктів. Проте градуюється лише вторинне коло оптичної схеми засобу

вимірювання температури. Похибка лазера і спектроаналізатора додаються до похибки результату вимірювання.

19. Отримано залежність непевності визначення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми від зміни комплексних частотних характеристик спектроаналізатора, послаблюючого елемента та спектру галогенної лампи за час градування, що дозволяє встановити вимоги до їх стабільності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. Вимірювання температури: теорія та практика. Бескид Біт, Львів, 2006.
2. А.Н. Гордов, О.М. Жагулло, А. Иванова. Основы температурных измерений. М. : Энергоатомиздат, 1992. - 304 с.
3. Лах В.І., Гук О.П., Лах О.І., Гаєвська О.Є. Засоби контактної термометрії. Порядок вибору та встановлення / ГР 3-021-2003. - К.: Вид-во Держспоживстандарту, 2004 – 21 с.
4. Куинн Т. Температура. Пер.с англ. М.: Мир.1985.
5. Schuster G., Nechtfisher B., Fellmuth B. // Rep. Prog. Phys. 1994. V. 57. P. 187.
6. Савватеев А. В. Шумовая термометрия. — Л.: Энергоатомиздат, 1987
7. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Т. Окоси. — Л.: Энергоатом-Энергоатомиздат, 1990.
9. Магунов А.П. // ПТЭ. 2000. № 2. С. 3.
10. Peacock N. J., Robinson D. C, Forrest M. J. et al. // Nature. 1969. V. 224, № 5218. P. 488.
11. Пятницкий Л.Н. Лазерная диагностика плазмы. — М.: Атомиздат, 1976.
12. Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C. A. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71, № 8. P. 2959.
13. Ахманов С. А., Емельянов В. И., Коротеев Н.И., Семиногов В. И. // УФН. 1985. Т. 147, вып. 4. С. 675.
14. Кулаков М.В., Макаров Б. И. Измерение температуры поверхности твердых тел. — М.: Энергия, 1979. 96 с.
15. Anderson R.L. // Proc. SPIE. 1990. V. 1392. P. 437.

16. Hussla /., Enke K., Grunwald H. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1987. V. 20. P. 889.
17. Egerton E.J., Nef A., Millikin W. et al. // Sol. St. Technol. 1982. V. 25, № 2. P. 84.
18. Hussla /., Enke K., Grunwald H. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1987. V. 20. P. 889.
19. Daviet J.-F., Peccoud L., Mondon F. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73, № 3. P. 1471.
20. Anderson R.L. // Proc. SPIE. 1990. V. 1392. P. 437.
21. Wilhelm B., Janssen M., Romano V. et al. // VDI Berichte, Temperatur'98. 1998. V. 1379. S.133.
22. Ranson R.M., Thomas CB., Craven M.R. // Meas. Sci. Technol. 1998. V. 9. P. 1947.
23. Holm R. T., McKnight S. W., Palik E.D., Lukosz W. // Appl. Opt. 1982. V. 21, № 14. P. 2512.
24. Барабан А. П., Булавинов В. В., Коноров П. П. Электроника слоїв SiO₂ на кремнии. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.
25. Holm R. T., McKnight S. W., Palik E.D., Lukosz W. // Appl. Opt. 1982. V. 21, № 14. P. 2512.
26. Барабан А. П., Булавинов В. В., Коноров П. П. Электроника слоїв SiO₂ на кремнии. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.
27. Daugherty J.E., Graves D. V. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1993. V. 11, № 4. P. 1126.
28. Swinkels C, Kroesen G. // Proc. XIV Int. Symp. on Plasma Chemistry. Aug. 2-6. 1999. — Prague, Czech Rep. V. 2. P. 519.
29. Kersten R., Deutsch K., Otte M. et al. // Thin Solid Films. 2000. V. 377. P. 530.
30. Соколовская А. И., Кудрявцева А. Д., Бреховских Г.Л. // Тр. ФИАН. Т. 212. - М.: Наука, 1991. С. 16.
31. Jellison C E., Jr., Lowdnes D. H., Wood R. F. // Phys. Rev. B. 1983. V. 28, № 6. P. 3272.

32. Kip B.J., Meier R.J. // *Appl. Spectr.* 1990. V. 44, № 4. P. 707.
33. Lo H. W., Compaan A. // *Phys. Rev. Lett.* 1980. V. 44, № 24. P. 1604.
34. Compaan A., Lee M. C, Lo H. W. et al. // *J. Appl. Phys.* 1983. V. 54, № 10. P. 5950.
35. Dai S., Young J.P., Begun CM., Mamantov G. // *Appl. Spectrosc.* 1992. V. 46, № 2. P. 375.
36. LaPlant F., Laurence C, Ben-Amotz D. // *Appl. Spectrosc.* 1996. V. 50, № 8. P. 1034.
37. Cui J.B., Amtmann K., Ristein J., Ley L. // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83, № 12. P. 7929.
38. Kip B.J., Meier R.J. // *Appl. Spectr.* 1990. V. 44, № 4. P. 707.
39. Zou J., Wang S., Yang Z. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves.* 2000. V. 21, № 5. P. 793.
40. Теплове розширення/ [Електронний ресурс]. Режим доступу:
http://uk.wikipedia.org/wiki/Теплове_розширення.
41. Скоропад П.І. Термоелектричні властивості та явища електропереносу в бінарних металевих аморфних сплавах // Вісник ДУ «Львівська політехніка», «Автоматика, вимірювання та керування». – 1999. –№366. с.15-21.
42. Сосновский А. Г., Столярова Н. И., Измерение температур, М., 1970.
43. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. М.: Мир. 1979. –292 с.
44. Микитин І., Стадник Б. Дорожовець М. Математична модель шумового термометра на основі кореляційного підсилювача. // Вимірювальна техніка та метрологія. —2000 , №57. - С. 63-66.
45. Микитин І., Стадник Б. Кузій А. Кореляція залежності коефіцієнта перетворення шумового термометра від значення опору первинного перетворювача // Вимірювальна техніка та метрологія. —1999 , №54. - С. 31-34.

46. Стадник Б., Озгович А. Ліхновський І. Кузій А.. Вплив параметрів каналу передачі термошумового сигналу на метрологічні характеристики шумового термометра // Вимірювальна техніка та метрологія. —2000 , №56. - С. 51-55.
47. Basarab-Horwath I., Dorozhovets M.M. Measurement of the Temperature Distribution in Fluids Using Ultrasonic Tomography. IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, Vol.3, New York, 1994. - pp. 1891-1894.
48. Green S.F. Temperature In flames and gases // Measurement+Control.1987. Vol.20. P.19-22.
49. Дорожовець М.М. Дослідження властивостей нелінійних функцій, які описують обернену задачу електричної томографії. - Вимірювальна техніка та метрологія. - 2001. №58, -с.12-16.
50. Дорожовець М., Ковальчик А. Підвищення швидкості збіжності ітераційної процедури томографічного відтворення просторового розподілу провідності. - Вимірювальна техніка та метрологія. - 2000. №57, с.134-139.
51. Дорожовець М.М. Фізичні принципи побудови вимірювальних томографічних систем для промислового застосування. - Вимірювальна техніка та метрологія. - 1996. №52, -с.113-121.
52. Пилип'юк В. Є. Високоточні ЯКР термометри. Дис...канд. техн. наук. Львів. 1995.
53. Температурные измерения. Справочник./ О.А. Геращенко, А.Н. Гордов и др. Киев: Наукова думка, 1989.
54. Метод комбінаційного розсіювання світла у термометруванні поверхні/ [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.rusnauka.com/13_NPN_2010/Tecnic/65371.doc.htm
55. De Wolf I., Chen J., Rasras M. et al. // Proc. SPIE. 1999. V. 3897. P. 239.
56. Herman /. // Proc. SPIE. 1991. V. 1594. P. 298.

57. Вимірювання температури з використанням явища комбінаційного розсіювання світла/ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://technicalnews.net.ua/library/2008/121.pdf>
58. Вимірювання температури з використанням явища комбінаційного розсіювання світла/ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://technicalnews.net.ua/library/2008/121.pdf>
59. Рейтек [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.raytek.com>
60. ОАО НПП Омск Эталон/ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.omsketalon.ru>
61. ООО Микроакустика/ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.mikroakustika>
62. Пирометры/ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.diagnost.ru>.
63. Стадник Богдан, Скоропад Пилип , Семенистый Арсен. Особливості визначення чинника випромінювальної здатності матеріалів за низьких температур. - Вимірювальна техніка та метрологія. - 2008. № 68, с.165-168.
64. Ирина Брао. Аналіз проблематики та перспективних напрямків розвитку безконтактної термометрії. - Вимірювальна техніка та метрологія. - 2014. № 75, с.40-44.
65. Alexander Dmitriyev. «Laser pyrometry offers practical temperature measurement». Heat treating progress, 2005
66. Michalski, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., & McGhee, J. «Temperature Measurement Second Edition». West Sussex, 2001
67. Рибо Г. «Оптическая пирометрия». М. – Л.: ГТТИ, 1934
68. А.Г. Сосновский, Н.И. Столярова. «Измерение температур». Учебное пособие, Москва, 1970.
69. А.Н. Гордов. «Основы пирометрии». Металлургия, 1971
70. «Излучательные свойства твердых материалов». Справочник / Под ред. Шейндлина А.Е. –М.: Энергия, 1974

71. Брамсон М.А. «Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел», Наука, 1964
72. Фрунзе А. «Пирометры спектрального отношения. Преимущества, недостатки, пути их устранения», Фотоника, 2009
73. Магунов А.Н. «Спектральная пирометрия.» "Приборы и техника эксперимента, 2009
74. Коливна спектроскопія / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://chem.lnu.edu.ua/kah/Patsay/fmd/lecture-5.pdf>
75. Комбінаційне розсіювання світла / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://lektsii.com/1-34316.html>
76. Прояв у спектрах фотолюмінісценції та КРС впливу препарату у берберину на ДНК / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/7608>
77. Раман-спектри і структура аморфних плівок Bi_2S_3 та As_2S_3 / [Електронний ресурс].Режим доступу: http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pcss/vol10/1003-10.pdf
78. Raman Spectra of Metamorphic Rocks Minerals / [Електронний ресурс].Режим доступу http://jm-derochette.be/Raman_Microscope/raman_spectra_Metamorphic.htm
79. Peter J. Hesketh. «Bio Nano Fluidic MEMS». Springer Science & Business Media, NY, 2007
80. John X J Zhang, Kazunori Hoshino. «Molecular Sensors and Nanodevices». Springer Science & Business Media, USA, 2013
81. Robin E. Bentley. «Handbook of temperature measurement». Springer Science & Business Media, USA, 1998
82. Richard W. Solarz, Jeffrey A. Paisner. «Laser Spectroscopy and its Applications». Marcel danker, NY, 1987
83. Wang Xinwei. Experimental Micro Nanoscale Thermal Transport. // John Wiley & Song, Canada, 2012

84. L. Michalski. Temperature Measurement. Second edition. // John Wiley & Song, Canada, 2012
85. Геращенко О.А. Температурные измерения / Справочник, Киев: Наукова думка, 1989 г.
86. Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник. — Москва «Металлургия», 1980
87. Скобло В. С. К оценке дальности действия тепловизионных систем. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2001. Т.44, № 1, с. 47.
88. Кривенчук Ю. Контроль температуры в установках реактивного ионно-плазменного напыления с использованием термометра випромінення / Гоц Н., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2011. — № 72. — С. 45–50..
89. Захарченко В. А., Шмойлов А. В. Приемник инфракрасного излучения // Приборы и техника эксперимента, 1979, № 3, с.220.
90. Исмаилов М. М., Петренко А. А., Астафьев А. А., Петренко А. Г. Инфракрасный радиометр для определения тепловых профилей и индикации разности температур. // Приборы и техника эксперимента, 1994, № 4, с.196.
91. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. — М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов, 1970. — С. 257.
92. Прохоров А. М., Алексеев Д. М. Физическая энциклопедия-М..Сов. энцикл.1988 г.
93. Пентин Ю. А. Основы молекулярной спектроскопии — М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 398 с.
94. Бенуэлл К. Основы молекулярной спектроскопии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. 384 с.
95. Landsberg G., Mandelstam L. Eine neue Erscheinung bei der Lichtzertreuung // Naturwissenschaften. 1928. 557 p.

96. Ландсберг Г. С., Мандельштам Л. И. Новое явление при рассеянии света // Журнал Русского физ.-хим. об-ва. 1928 – 335с.
97. Landsherg G.S., Mandelstam L.I. Uber die Lichtzerstreuung in Kristallen // Zeitschrift fur Physik. 1928 – 769 p.
98. Фабелинский И. Л. К 50-летию открытия комбинационного рассеяния света // Успехи физических наук.- 1978.- Вып.1.
99. Фабелинский И. Л. Комбинационному рассеянию света — 70 лет // Успехи физических наук. № 12- 1998.
100. M.Cardona Light Scattering in Solids. //Berlin – Heideiberg – New York, Springer - Veriag, 1975.
101. Woodbury, E. J.; Ng, W. K. «Ruby laser operation in the near IR». Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1962.
102. Раманівське розсіяння / [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Раманівське_розсіювання.html
103. Комбинационное рассеяние света / [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Комбинационное_рассеяние_света.html
104. Hill, K. O.; Kawasaki, B. S.; Johnson, D. C. Low- threshold cw Raman laser // Appl. Phys. Lett. 29 (1976) , 181–183.
105. Kean, P. N.; Sinclair, B. D.; Smith, K.; Sibbett, W.; Rowe, C. J.; Reid, D. C. J. Experimental evaluation of a fibre Raman oscillator having fibre grating reflectors.// J. Mod. Opt. 35 (1988), 397–406.
106. Grubb, S. G.; Erdogan, T.; Mizrahi, V.; Strasser, T.; Cheung, W. Y.; Reed, W. A.; Lemaire, P. J.; Miller, A. E.; Kosinski, S. G.; Nykolak, G.; Becker, P. C.; Peckham, D. W. 1.3 μm Cascaded Raman Amplifier in Germanosilicate Fibers. // Optical Amplifiers and their Applications Topical Meeting (1994).
107. Boyraz, Özdal; Jalali, Bahram. Demonstration of a silicon Raman laser // Optics Express (2004), 5269–5273 p.

108. Rong, Haisheng; Jones, Richard; Liu, Ansheng; Cohen, Oded; Hak, Dani; Fang, Alexander; Paniccia, Mario. A continuous-wave Raman silicon laser // Nature (2005), 725–728 p.
109. Rong, Haisheng; Jones, Richard; Liu, Ansheng; Cohen, Oded; Hak, Dani; Fang, Alexander; Paniccia, Mario. A continuous-wave Raman silicon laser. // Nature 433 (2005), 725–728 p.
110. Jalali, Bahram. Making silicon lase. // Scientific American 296 (2007). 58–65 p.
111. Оптична схема для вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.mineralienatlas.de/VIEWmaxFULL.php?param=1239195322>
112. Оптична схема для вимірювання температури МКР / [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.uni-marburg.de/fb13/forschung/experimentelle-halbleiterphysik/agheimbrodt/img/photo/forschung/trpl/trpl_setup/image.jpg
113. Оптична схема для вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла / [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.spektrum.de/lexika/images/optik/fff1346_w.jpg
114. Оптична схема для вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла / [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.spektrum.de/lexika/images/optik/fff1346_w.jpg
115. Оптична схема для вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла / [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.spektrum.de/lexika/images/optik/fff1347_w.jpg
116. Оптична схема для вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла / [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.spektrum.de/lexika/images/optik/fff1347_w.jpg
117. C. Breck Hitz, Understanding LASER Technology. / PennWell Publishing Co., Tulsa, Oklahoma, 1985.
118. For example, J. Hecht. The Laser Guidebook. // McGraw-Hill, New York, 1986.

119. W. G. Fateley, F. R. Dollish, N. T. McDevitt, and F. F. Bentley. Infrared and Raman Selection Rules for Molecular and Lattice Vibrations: The Correlation Method. // Wiley Int. 1972.
120. R. Payling and L.C. Lefebvre, History of Spectroscopy,/[Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.thespectroscopynet.com/Educational/History.htm>
121. Чулановский В.М. Введение в молекулярный спектральный анализ. / М-Л ГИТТЛ, 1951 г.
122. Ландсберг Г. С., Манделъштам Л. И. Новое явление при рассеянии света // Журнал Русского физ.-хим. об-ва. 1928. 335 с.
123. Д.Н.Клышко. Рассеяние света. // Наука и жизнь №1. 1988 г.
124. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. / М. (1979).
125. В. Ф. Гантмахер, И. Б. Левинсон. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. // М.: Наука (1984).
126. Питер Ю. М. Кардона Основы физики полупроводников. / М.: Фізмат (2002).
127. Derek A. Long The Raman Effect. / John Wiley & Sons Ltd. (2002).
128. Kearney S.P. Spatially resolved temperature mapping of electrothermal actuators by surface Raman scattering / Kearney S.P., Phinney L.M., Baker M.S., – J. Microelectromech. Systems, 2006. – V.15, – No.2. – 314-321 p.
129. Serrano J.R. Micro-Raman thermometry of thermal flexure actuators / Serrano J.R., Phinney L.M., Kearney S.P., – J. Micromech. Microeng. 2006. – V.16. – 1128-1134 p.
130. Кольрауш К. Спектры комбинационного рассеяния / М ЦЛ, 1952 г.
131. М. Кардона. Рассеяние света в твердых телах. / М. (1979).
132. Suzuki K. Microstructure and mechanical properties of liquid-phase-sintered SiC with AlN and Y2O3 additions / Suzuki K., Sasaki M. // Ceram. Int. – 2005. – 31, N 5. – 749-755 p.

133. Goodson K.E. Phonon-boundary scattering in thin silicon layers / Goodson K.E., Asheghi M. – *Microscale Thermophys. Eng.* – 1997. – V. 1. – 225 p.
134. T. Mazza, Raman spectroscopy characterization of TiO₂ rutile nanocrystals. / T. Mazza // *Phys. Rev.B.* – 2007 – 75 – 045416 – 5 p.
135. В. А. Гайслер. Комбинационное рассеяние света на локальных колебаниях твердых растворов Ge_xSi_{1-x}. // О. А. Кузнецов, И. Г. Неизвестный, Л. К. Орлов, М. П. Синюков, А. Б. Талочки, ФТТ, (1989).
136. Noncontact temperature measurements of diamond by Raman scattering spectroscopy / [Cui J.B., Amtmann K., Ristein J., Ley L.] – *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol.83, – No.12. – 7929-7933 p.
137. Siegman A.E.: *Lasers*. University Science Books, 1986.
138. Hicks J.M. Can Pulsed Laser Excitation of Surfaces be Described by a Thermal Model / [Hicks J.M., Urbach L.E., Plummer E. W., Dai H.-L.] – *Proc. SPIE*, 1990. – V. 1208. – 127 p.
139. William T. Silfvast: *Laser Fundamentals*. Cambridge University Press, 2004.
140. Елисеев П. Г. Полупроводниковый лазер // под. ред. А. М. Прохорова Физическая энциклопедия. — М.: «Советская энциклопедия», 1988. — Т. 4.
141. Svelto O.: *Principles of Laser*. Springer, 2004
142. Webb C.E.: *Handbook of Laser Technology and Applications*, Institute of Physics Publishing, 2004
143. Brugger H. Mapping of local temperatures on mirrors of GaAs/AlGaAs laser diodes / Brugger H. Epperlein P.W., – *Appl. Phys. Lett.* – 1990. – Vol.56, – 1049-1051
144. Звелто О.: *Принципы лазеров*. Москва, Мир, 1990
145. Bedienungsanleitung. Frequenzstabilisierte He-Ne-Laser SL02/1 / [паспорт] – Ilmenau, 1999 – 18s.
146. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. — М.: Радио и связь, 1981. — 440 с.

147. Кондиленко И. И., Коротков П. А., Хижняк А. И. Физика лазеров. — Киев: Вища школа, 1984. — 232 с.
148. Бруннер В. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 544 с.
149. Луцик Я.Т. Енциклопедія термометрії/ Луцик Я.Т., Буняк Л.К., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. — Львів 2003. — 280-285 с.
150. Лепин Г.Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности./ Лепин Г.Ф — Москва: Металлургия, 1976. — 343 с.
151. Temperature distributions and molten zones induced by heating with line-shaped electron beams / [Timans P.J., McMahon R.A., Ahmed H., Hopper G.F.] — J. Appl. Phys, 1989. — V. 66, № 6. — 2285 p.
152. Hiittner B. Femtosecond Laser Pulse Interactions with Metals / Hiittner B // The Theory of Laser Materials Processing. Dordrecht. — Springer Science, 2009. — 315-337 p.
153. Serrano J.R. Micro-Raman thermometry of thermal flexure actuators / Serrano J.R., Phinney L.M., Kearney S.P., — J. Micromech. Microeng. 2006. — V.16. — 1128-1134 p.
154. London M. Thevenot F. Thermal conductivity of SiC-AlN ceramic materials / London M. // J. Europ. Ceram. Soc. — 1991. — 8, N 5. — 271-277 p.
155. Юрій Кривенчук. Дослідження впливу неідеальності геометричної форми зразка на результат вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла / Сегеда О., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2012. — № 73. — С. 28-31.
156. Кривенчук Ю. Метод комбінаційного розсіювання світла у термометрії поверхні мікрооб'єктів / Сегеда О., Яцишин С., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2012. — № 73. — С. 28-31.
157. Горелик Г.С. Колебания и волны. / Горелик Г.С. — М.: ГИФМЛ, 1959. — 572 с.

158. Сегеда О.В. Вимірювання температури мікрооб'єктів за допомогою спектру комбінаційного розсіювання світла: дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04 / Стадник Богдан Іванович ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів, 2012. – 166 с. : іл. – Бібліогр.: с. 63–71.
159. Оптические материалы инфракрасной техники / [Воронкова Е. М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П.]. – М.: Наука, 1965 – 346 с
160. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ: В2 / Лебедев И. В// Т. 1. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
161. Guide of the of the Expression of Uncertainty in Measurement. – ISO, 1993, 1995.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього значення ЕЧАКС КРС для Н₂О

№ п/п Т, °С	Значення ЕЧАКС КРС ν , см ⁻¹										$m\nu$, см ⁻¹	$D\nu$, см ⁻²	$\sigma\nu$, см ⁻¹	$u\nu$, см ⁻¹
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
18	3313,31	3313,33	3313,34	3313,34	3313,34	3313,39	3313,38	3313,37	3313,37	3313,37	3313,35	0,000489268	0,022	0,070
19	3313,26	3313,27	3313,28	3313,28	3313,28	3313,25	3313,27	3313,29	3313,28	3313,27	3313,27	0,000109171	0,010	0,033
20	3313,13	3313,15	3313,13	3313,17	3313,19	3313,14	3313,16	3313,20	3313,13	3313,18	3313,16	0,000613342	0,025	0,078
21	3313,01	3313,03	3313,03	3313,04	3313,06	3313,00	3313,00	3312,99	3313,02	3313,02	3313,02	0,000343109	0,019	0,059
22	3312,83	3312,86	3312,81	3312,86	3312,83	3312,84	3312,81	3312,82	3312,84	3312,84	3312,84	0,000231538	0,015	0,048
23	3312,65	3312,63	3312,69	3312,67	3312,66	3312,61	3312,63	3312,62	3312,67	3312,62	3312,64	0,000635085	0,025	0,080
24	3312,40	3312,39	3312,40	3312,41	3312,45	3312,44	3312,44	3312,43	3312,43	3312,45	3312,42	0,0004766	0,022	0,069
25	3312,17	3312,18	3312,18	3312,12	3312,17	3312,13	3312,17	3312,15	3312,14	3312,19	3312,16	0,000551712	0,023	0,074
26	3311,90	3311,85	3311,88	3311,90	3311,83	3311,90	3311,87	3311,85	3311,87	3311,86	3311,87	0,000482848	0,022	0,070
27	3311,53	3311,53	3311,57	3311,57	3311,55	3311,51	3311,58	3311,55	3311,54	3311,52	3311,55	0,000445984	0,021	0,067
28	3311,19	3311,19	3311,22	3311,24	3311,22	3311,18	3311,24	3311,17	3311,18	3311,18	3311,2	0,000574898	0,024	0,076
29	3310,79	3310,80	3310,82	3310,81	3310,85	3310,85	3310,79	3310,82	3310,78	3310,78	3310,81	0,000532791	0,023	0,073
30	3310,42	3310,40	3310,41	3310,40	3310,43	3310,44	3310,37	3310,37	3310,44	3310,42	3310,41	0,000629701	0,025	0,080
31	3309,97	3309,93	3309,94	3310,00	3309,98	3309,99	3309,98	3309,95	3309,98	3309,94	3309,97	0,000491373	0,022	0,070
32	3309,46	3309,50	3309,48	3309,51	3309,50	3309,52	3309,52	3309,48	3309,53	3309,53	3309,5	0,000494628	0,022	0,070
33	3308,97	3309,04	3309,03	3309,00	3309,04	3309,03	3309,00	3308,98	3309,03	3309,02	3309,01	0,000498183	0,022	0,071
34	3308,49	3308,43	3308,49	3308,48	3308,51	3308,48	3308,43	3308,49	3308,50	3308,45	3308,48	0,000696646	0,026	0,084
35	3307,92	3307,90	3307,92	3307,89	3307,87	3307,89	3307,90	3307,88	3307,91	3307,92	3307,9	0,000263415	0,016	0,051

Продовження таблиці А.1

36	3307,34	3307,29	3307,36	3307,31	3307,31	3307,36	3307,35	3307,30	3307,29	3307,29	3307,32	0,000776815	0,028	0,088
37	3306,73	3306,67	3306,74	3306,73	3306,72	3306,71	3306,74	3306,73	3306,73	3306,71	3306,72	0,000422858	0,021	0,065
38	3306,09	3306,03	3306,09	3306,02	3306,02	3306,06	3306,02	3306,06	3306,03	3306,06	3306,05	0,000747278	0,027	0,087
39	3305,35	3305,41	3305,39	3305,41	3305,39	3305,38	3305,40	3305,34	3305,39	3305,41	3305,39	0,000507203	0,023	0,071
40	3304,66	3304,65	3304,67	3304,67	3304,65	3304,68	3304,65	3304,70	3304,64	3304,66	3304,66	0,000275102	0,017	0,053
41	3303,96	3303,92	3303,91	3303,89	3303,90	3303,91	3303,92	3303,93	3303,92	3303,97	3303,92	0,000548685	0,023	0,074
42	3303,19	3303,14	3303,18	3303,19	3303,15	3303,17	3303,17	3303,15	3303,19	3303,14	3303,16	0,000377987	0,019	0,062
43	3302,40	3302,34	3302,34	3302,38	3302,34	3302,34	3302,39	3302,35	3302,34	3302,37	3302,36	0,000478238	0,022	0,069
44	3301,56	3301,51	3301,54	3301,55	3301,53	3301,57	3301,53	3301,57	3301,54	3301,54	3301,55	0,000293285	0,017	0,054
45	3300,67	3300,66	3300,68	3300,71	3300,64	3300,64	3300,66	3300,64	3300,68	3300,65	3300,66	0,000457751	0,021	0,068
46	3299,80	3299,81	3299,76	3299,79	3299,83	3299,76	3299,81	3299,79	3299,80	3299,81	3299,8	0,000405388	0,020	0,064
47	3298,88	3298,90	3298,88	3298,85	3298,83	3298,87	3298,90	3298,90	3298,87	3298,87	3298,88	0,000470863	0,022	0,069
48	3297,93	3297,96	3297,91	3297,94	3297,89	3297,95	3297,95	3297,91	3297,90	3297,96	3297,93	0,000556748	0,024	0,075
49	3296,95	3296,97	3296,97	3296,93	3296,93	3296,92	3296,96	3296,98	3296,93	3296,94	3296,95	0,0004016	0,020	0,064
50	3295,96	3295,94	3295,93	3295,93	3295,94	3295,93	3295,91	3295,95	3295,93	3295,96	3295,94	0,000215698	0,015	0,047
51	3294,87	3294,91	3294,91	3294,92	3294,90	3294,88	3294,91	3294,89	3294,93	3294,94	3294,91	0,000424424	0,021	0,065
52	3293,83	3293,80	3293,81	3293,87	3293,81	3293,87	3293,83	3293,80	3293,82	3293,82	3293,83	0,00065131	0,026	0,081
53	3292,71	3292,71	3292,71	3292,77	3292,74	3292,74	3292,76	3292,70	3292,76	3292,75	3292,74	0,000623504	0,025	0,079
54	3291,63	3291,61	3291,60	3291,59	3291,59	3291,61	3291,64	3291,61	3291,62	3291,60	3291,61	0,000236335	0,015	0,049
55	3290,46	3290,46	3290,49	3290,45	3290,43	3290,42	3290,45	3290,48	3290,47	3290,45	3290,46	0,000379688	0,019	0,062
56	3289,27	3289,28	3289,28	3289,30	3289,26	3289,28	3289,27	3289,24	3289,27	3289,27	3289,27	0,000247454	0,016	0,050
57	3288,06	3288,04	3288,07	3288,05	3288,02	3288,04	3288,09	3288,05	3288,04	3288,08	3288,05	0,000443014	0,021	0,067
58	3286,80	3286,78	3286,83	3286,80	3286,81	3286,79	3286,83	3286,84	3286,78	3286,82	3286,81	0,000413622	0,020	0,064
59	3285,56	3285,55	3285,55	3285,57	3285,53	3285,57	3285,55	3285,56	3285,55	3285,52	3285,55	0,000240711	0,016	0,049
60	3284,21	3284,24	3284,24	3284,20	3284,20	3284,20	3284,19	3284,27	3284,23	3284,23	3284,22	0,000537504	0,023	0,073

Продовження таблиці А.1

61	3282,87	3282,92	3282,91	3282,87	3282,86	3282,90	3282,91	3282,90	3282,92	3282,89	3282,89	0,000461174	0,021	0,068
62	3281,52	3281,56	3281,57	3281,51	3281,52	3281,51	3281,55	3281,55	3281,51	3281,54	3281,53	0,000404993	0,020	0,064
63	3280,15	3280,10	3280,13	3280,11	3280,17	3280,16	3280,12	3280,15	3280,12	3280,10	3280,13	0,000565448	0,024	0,075
64	3278,68	3278,71	3278,71	3278,72	3278,67	3278,71	3278,73	3278,75	3278,68	3278,73	3278,71	0,000560447	0,024	0,075
65	3277,26	3277,26	3277,24	3277,29	3277,25	3277,25	3277,26	3277,22	3277,23	3277,28	3277,25	0,000398327	0,020	0,063
66	3275,78	3275,78	3275,81	3275,75	3275,73	3275,74	3275,74	3275,77	3275,80	3275,78	3275,77	0,000662989	0,026	0,082
67	3274,27	3274,28	3274,22	3274,22	3274,27	3274,27	3274,28	3274,24	3274,29	3274,24	3274,26	0,000599585	0,024	0,078
68	3272,67	3272,69	3272,75	3272,75	3272,72	3272,74	3272,72	3272,75	3272,74	3272,68	3272,72	0,000803419	0,028	0,090
69	3271,16	3271,11	3271,13	3271,12	3271,10	3271,15	3271,17	3271,14	3271,18	3271,12	3271,14	0,000561961	0,024	0,075
70	3269,52	3269,51	3269,51	3269,51	3269,50	3269,57	3269,56	3269,57	3269,57	3269,50	3269,53	0,000823692	0,029	0,091

Таблиця А.2 Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього значення ЕЧАКС КРС для Al_2O_3

№ п/п Т, °С	Значення ЕЧАКС КРС ν , cm^{-1}										$m\nu$, cm^{-1}	$D\nu$, cm^{-2}	$\sigma\nu$, cm^{-1}	$\nu\nu$, cm^{-1}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
18	4600,85	4600,88	4600,87	4600,88	4600,85	4600,86	4600,91	4600,86	4600,88	4600,87	4600,87	0,000275213	0,017	0,053
19	4597,55	4597,55	4597,56	4597,56	4597,56	4597,54	4597,55	4597,57	4597,56	4597,55	4597,55	$6,14086 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,025
20	4593,44	4593,46	4593,44	4593,47	4593,49	4593,45	4593,46	4593,49	4593,44	4593,48	4593,46	0,000345005	0,019	0,059
21	4588,60	4588,62	4588,62	4588,63	4588,64	4588,60	4588,60	4588,59	4588,61	4588,61	4588,61	0,000192999	0,014	0,044
22	4582,98	4583,00	4582,97	4583,00	4582,98	4582,99	4582,97	4582,97	4582,99	4582,99	4582,98	0,00013024	0,011	0,036

Продовження таблиці А.2

23	4576,61	4576,60	4576,64	4576,63	4576,62	4576,58	4576,59	4576,59	4576,62	4576,59	4576,61	0,000357236	0,019	0,060
24	4569,44	4569,44	4569,45	4569,46	4569,49	4569,48	4569,47	4569,47	4569,47	4569,49	4569,47	0,000268087	0,016	0,052
25	4561,56	4561,57	4561,57	4561,52	4561,56	4561,53	4561,56	4561,54	4561,53	4561,57	4561,55	0,000310338	0,018	0,056
26	4552,90	4552,86	4552,88	4552,89	4552,84	4552,89	4552,87	4552,86	4552,87	4552,86	4552,87	0,000271602	0,016	0,052
27	4543,41	4543,42	4543,44	4543,44	4543,43	4543,40	4543,45	4543,43	4543,42	4543,41	4543,42	0,000250866	0,016	0,050
28	4533,21	4533,21	4533,23	4533,25	4533,24	4533,20	4533,25	4533,20	4533,21	4533,21	4533,22	0,00032338	0,018	0,057
29	4522,22	4522,23	4522,25	4522,24	4522,26	4522,27	4522,22	4522,25	4522,22	4522,22	4522,24	0,000299695	0,017	0,055
30	4510,52	4510,50	4510,51	4510,50	4510,52	4510,53	4510,48	4510,48	4510,53	4510,51	4510,51	0,000354207	0,019	0,060
31	4498,01	4497,97	4497,98	4498,03	4498,01	4498,01	4498,01	4497,99	4498,01	4497,98	4498	0,000276397	0,017	0,053
32	4484,71	4484,73	4484,72	4484,74	4484,74	4484,75	4484,75	4484,72	4484,76	4484,76	4484,74	0,000278228	0,017	0,053
33	4470,68	4470,73	4470,72	4470,70	4470,73	4470,72	4470,70	4470,68	4470,72	4470,71	4470,71	0,000280228	0,017	0,053
34	4455,92	4455,87	4455,92	4455,91	4455,93	4455,91	4455,87	4455,92	4455,92	4455,89	4455,91	0,000391863	0,020	0,063
35	4440,35	4440,33	4440,34	4440,32	4440,31	4440,32	4440,33	4440,32	4440,34	4440,34	4440,33	0,000148171	0,012	0,039
36	4424,02	4423,98	4424,04	4424,00	4424,00	4424,04	4424,03	4424,00	4423,98	4423,99	4424,01	0,000436959	0,021	0,066
37	4406,93	4406,89	4406,94	4406,94	4406,93	4406,92	4406,94	4406,93	4406,94	4406,92	4406,93	0,000237857	0,015	0,049
38	4394,08	4394,04	4394,08	4394,03	4394,03	4394,06	4394,03	4394,06	4394, 4	4394,36	4394,65	0,000420344	0,021	0,065
39	4370,41	4370,46	4370,45	4370,46	4370,44	4370,44	4370,45	4370,41	4370,44	4370,46	4370,44	0,000285302	0,017	0,054
40	4351,04	4351,03	4351,04	4351,05	4351,03	4351,05	4351,03	4351,07	4351,03	4351,04	4351,04	0,000154745	0,012	0,039
41	4330,92	4330,88	4330,88	4330,86	4330,87	4330,88	4330,88	4330,89	4330,88	4330,92	4330,89	0,000308635	0,018	0,056
42	4309,99	4309,95	4309,98	4309,99	4309,96	4309,98	4309,98	4309,96	4309,99	4309,95	4309,97	0,000212617	0,015	0,046
43	4288,31	4288,27	4288,27	4288,30	4288,27	4288,27	4288,31	4288,28	4288,27	4288,29	4288,28	0,000269009	0,016	0,052
44	4265,86	4265,82	4265,85	4265,85	4265,84	4265,87	4265,84	4265,86	4265,84	4265,85	4265,85	0,000164973	0,013	0,041
45	4242,62	4242,61	4242,62	4242,65	4242,60	4242,60	4242,61	4242,60	4242,63	4242,61	4242,61	0,000257485	0,016	0,051
46	4218,65	4218,66	4218,63	4218,64	4218,68	4218,63	4218,66	4218,65	4218,65	4218,66	4218,65	0,000228031	0,015	0,048
47	4193,91	4193,92	4193,91	4193,89	4193,87	4193,90	4193,93	4193,92	4193,90	4193,90	4193,91	0,000264861	0,016	0,052

Продовження таблиці А.2

48	4168,40	4168,42	4168,39	4168,40	4168,37	4168,41	4168,42	4168,38	4168,38	4168,42	4168,4	0,000313171	0,018	0,056
49	4142,12	4142,13	4142,14	4142,11	4142,10	4142,10	4142,13	4142,14	4142,10	4142,11	4142,12	0,0002259	0,015	0,048
50	4115,09	4115,08	4115,07	4115,07	4115,08	4115,07	4115,06	4115,09	4115,08	4115,09	4115,08	0,00012133	0,011	0,035
51	4087,25	4087,28	4087,29	4087,29	4087,27	4087,26	4087,28	4087,27	4087,30	4087,30	4087,28	0,000238738	0,015	0,049
52	4058,70	4058,68	4058,69	4058,74	4058,69	4058,73	4058,70	4058,68	4058,69	4058,69	4058,7	0,000366362	0,019	0,061
53	4029,35	4029,35	4029,35	4029,40	4029,37	4029,37	4029,39	4029,35	4029,39	4029,38	4029,37	0,000350721	0,019	0,059
54	3999,29	3999,27	3999,27	3999,26	3999,25	3999,27	3999,30	3999,27	3999,28	3999,26	3999,27	0,000132939	0,012	0,037
55	3968,41	3968,41	3968,44	3968,41	3968,39	3968,39	3968,40	3968,43	3968,42	3968,41	3968,41	0,000213575	0,015	0,046
56	3936,78	3936,79	3936,79	3936,81	3936,78	3936,79	3936,78	3936,76	3936,78	3936,78	3936,78	0,000139193	0,012	0,037
57	3904,39	3904,37	3904,40	3904,38	3904,36	3904,38	3904,41	3904,38	3904,37	3904,41	3904,39	0,000249196	0,016	0,050
58	3871,22	3871,21	3871,24	3871,22	3871,23	3871,22	3871,24	3871,26	3871,21	3871,24	3871,23	0,000232662	0,015	0,048
59	3837,33	3837,32	3837,32	3837,33	3837,30	3837,33	3837,31	3837,33	3837,32	3837,29	3837,32	0,0001354	0,012	0,037
60	3802,60	3802,63	3802,63	3802,60	3802,60	3802,59	3802,59	3802,65	3802,62	3802,62	3802,61	0,000302346	0,017	0,055
61	3767,14	3767,19	3767,18	3767,14	3767,14	3767,17	3767,17	3767,16	3767,18	3767,16	3767,16	0,00025941	0,016	0,051
62	3730,94	3730,97	3730,97	3730,93	3730,94	3730,93	3730,96	3730,96	3730,93	3730,95	3730,95	0,000227809	0,015	0,048
63	3693,97	3693,93	3693,96	3693,94	3693,99	3693,98	3693,95	3693,97	3693,95	3693,94	3693,96	0,000318064	0,018	0,057
64	3656,19	3656,21	3656,22	3656,22	3656,19	3656,21	3656,23	3656,24	3656,19	3656,23	3656,21	0,000315251	0,018	0,056
65	3617,70	3617,70	3617,69	3617,72	3617,69	3617,70	3617,70	3617,67	3617,68	3617,72	3617,7	0,000224059	0,015	0,047
66	3578,43	3578,43	3578,45	3578,41	3578,39	3578,40	3578,39	3578,42	3578,44	3578,42	3578,42	0,000372931	0,019	0,061
67	3538,38	3538,39	3538,35	3538,35	3538,39	3538,38	3538,39	3538,36	3538,40	3538,36	3538,38	0,000337267	0,018	0,058
68	3497,54	3497,55	3497,59	3497,59	3497,57	3497,59	3497,57	3497,59	3497,59	3497,54	3497,57	0,000451923	0,021	0,067
69	3456,01	3455,98	3455,99	3455,98	3455,97	3456,00	3456,02	3455,99	3456,02	3455,98	3455,99	0,000316103	0,018	0,056
70	3413,64	3413,64	3413,64	3413,64	3413,63	3413,68	3413,67	3413,68	3413,68	3413,63	3413,65	0,000463327	0,022	0,068

Таблиця А.3 Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього значення ЕЧАКС КРС для C₆H₁₂

№ п/п T, °C	Значення ЕЧАКС КРС ν , см ⁻¹										$m\nu$, см ⁻¹	D ν , см ⁻²	$\sigma\nu$, см ⁻¹	$u\nu$, см ⁻¹
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
18	2915,13	2915,15	2915,15	2915,16	2915,14	2915,14	2915,17	2915,14	2915,16	2915,15	2915,15	0,000122317	0,011	0,035
19	2914,66	2914,66	2914,67	2914,67	2914,67	2914,65	2914,66	2914,67	2914,67	2914,67	2914,67	2,72927·10 ⁻⁵	0,005	0,017
20	2914,16	2914,17	2914,17	2914,18	2914,19	2914,17	2914,18	2914,20	2914,17	2914,19	2914,18	0,000153336	0,012	0,039
21	2913,69	2913,70	2913,70	2913,70	2913,71	2913,68	2913,68	2913,68	2913,69	2913,69	2913,69	8,57772·10 ⁻⁵	0,009	0,029
22	2913,19	2913,21	2913,19	2913,21	2913,20	2913,20	2913,19	2913,19	2913,20	2913,20	2913,20	5,78845·10 ⁻⁵	0,008	0,024
23	2912,72	2912,71	2912,74	2912,73	2912,72	2912,70	2912,71	2912,70	2912,73	2912,70	2912,72	0,000158771	0,013	0,040
24	2912,22	2912,22	2912,22	2912,23	2912,25	2912,24	2912,24	2912,24	2912,24	2912,25	2912,23	0,00011915	0,011	0,035
25	2911,75	2911,76	2911,76	2911,73	2911,75	2911,73	2911,75	2911,74	2911,73	2911,76	2911,75	0,000137928	0,012	0,037
26	2911,28	2911,25	2911,26	2911,27	2911,24	2911,27	2911,26	2911,25	2911,26	2911,25	2911,26	0,000120712	0,011	0,035
27	2910,76	2910,76	2910,78	2910,78	2910,77	2910,75	2910,79	2910,77	2910,77	2910,76	2910,77	0,000111496	0,011	0,033
28	2910,28	2910,28	2910,29	2910,30	2910,30	2910,27	2910,30	2910,27	2910,28	2910,28	2910,29	0,000143724	0,012	0,038
29	2909,78	2909,79	2909,80	2909,80	2909,81	2909,81	2909,78	2909,80	2909,78	2909,78	2909,79	0,000133198	0,012	0,037
30	2909,32	2909,31	2909,31	2909,30	2909,32	2909,33	2909,29	2909,29	2909,33	2909,31	2909,31	0,000157425	0,013	0,040
31	2908,83	2908,81	2908,81	2908,84	2908,83	2908,83	2908,83	2908,81	2908,83	2908,81	2908,82	0,000122843	0,011	0,035
32	2908,32	2908,34	2908,33	2908,34	2908,34	2908,35	2908,35	2908,33	2908,35	2908,35	2908,34	0,000123657	0,011	0,035
33	2907,84	2907,87	2907,86	2907,85	2907,87	2907,86	2907,85	2907,84	2907,86	2907,86	2907,86	0,000124546	0,011	0,035
34	2907,38	2907,34	2907,38	2907,37	2907,38	2907,37	2907,34	2907,37	2907,38	2907,35	2907,37	0,000174161	0,013	0,042
35	2906,88	2906,87	2906,88	2906,86	2906,86	2906,87	2906,87	2906,86	2906,88	2906,88	2906,87	6,58538·10 ⁻⁵	0,008	0,026
36	2906,40	2906,37	2906,41	2906,38	2906,38	2906,41	2906,40	2906,38	2906,37	2906,38	2906,39	0,000194204	0,014	0,044
37	2905,91	2905,88	2905,92	2905,92	2905,91	2905,91	2905,92	2905,91	2905,92	2905,90	2905,91	0,000105714	0,010	0,033

Продовження таблиці А.3

38	2905,43	2905,40	2905,43	2905,40	2905,40	2905,42	2905,40	2905,42	2905,40	2905,42	2905,41	0,00018682	0,014	0,043
39	2904,92	2904,95	2904,94	2904,95	2904,94	2904,93	2904,94	2904,91	2904,94	2904,94	2904,93	0,000126801	0,011	0,036
40	2904,44	2904,44	2904,44	2904,45	2904,43	2904,45	2904,43	2904,46	2904,43	2904,44	2904,44	$6,87756 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026
41	2903,97	2903,95	2903,95	2903,94	2903,94	2903,95	2903,95	2903,96	2903,95	2903,97	2903,95	0,000137171	0,012	0,037
42	2903,48	2903,45	2903,48	2903,48	2903,46	2903,47	2903,47	2903,46	2903,48	2903,46	2903,47	$9,44966 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
43	2903,00	2902,97	2902,97	2902,99	2902,97	2902,97	2902,99	2902,98	2902,97	2902,98	2902,98	0,00011956	0,011	0,035
44	2902,51	2902,48	2902,50	2902,50	2902,49	2902,51	2902,49	2902,51	2902,50	2902,50	2902,50	$7,33212 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,027
45	2902,00	2902,00	2902,01	2902,02	2901,99	2901,99	2902,00	2901,99	2902,01	2901,99	2902,00	0,000114438	0,011	0,034
46	2901,52	2901,53	2901,51	2901,52	2901,54	2901,51	2901,53	2901,52	2901,52	2901,53	2901,52	0,000101347	0,010	0,032
47	2901,04	2901,05	2901,03	2901,02	2901,01	2901,03	2901,05	2901,05	2901,03	2901,03	2901,03	0,000117716	0,011	0,034
48	2900,55	2900,56	2900,54	2900,55	2900,53	2900,56	2900,56	2900,54	2900,53	2900,56	2900,55	0,000139187	0,012	0,037
49	2900,16	2900,17	2900,17	2900,13	2900,20	2900,22	2900,12	2900,19	2900,16	2900,17	2900,16	0,000100400	0,010	0,032
50	2899,58	2899,57	2899,57	2899,57	2899,57	2899,57	2899,56	2899,58	2899,57	2899,58	2899,57	$5,39246 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,023
51	2899,07	2899,09	2899,09	2899,09	2899,08	2899,07	2899,09	2899,08	2899,10	2899,10	2899,09	0,000106106	0,010	0,033
52	2898,59	2898,58	2898,58	2898,62	2898,59	2898,61	2898,59	2898,58	2898,59	2898,59	2898,59	0,000162827	0,013	0,040
53	2898,10	2898,10	2898,10	2898,13	2898,11	2898,11	2898,12	2898,09	2898,12	2898,12	2898,11	0,000155876	0,012	0,040
54	2897,63	2897,62	2897,62	2897,61	2897,61	2897,62	2897,64	2897,62	2897,62	2897,62	2897,62	$5,90839 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,024
55	2897,14	2897,14	2897,15	2897,13	2897,12	2897,12	2897,13	2897,15	2897,14	2897,13	2897,14	$9,49221 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
56	2896,65	2896,65	2896,66	2896,67	2896,65	2896,66	2896,65	2896,63	2896,65	2896,65	2896,65	$6,18636 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,025
57	2896,17	2896,15	2896,17	2896,16	2896,14	2896,16	2896,18	2896,16	2896,15	2896,18	2896,16	0,000110754	0,011	0,033
58	2895,67	2895,66	2895,68	2895,67	2895,67	2895,67	2895,68	2895,69	2895,66	2895,68	2895,67	0,000103405	0,010	0,032
59	2895,20	2895,20	2895,20	2895,20	2895,19	2895,21	2895,19	2895,20	2895,20	2895,18	2895,20	$6,01776 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,025
60	2894,69	2894,71	2894,71	2894,69	2894,69	2894,69	2894,68	2894,72	2894,70	2894,70	2894,70	0,000134376	0,012	0,037
61	2894,20	2894,23	2894,22	2894,20	2894,20	2894,22	2894,22	2894,22	2894,23	2894,21	2894,22	0,000115294	0,011	0,034
62	2893,72	2893,74	2893,75	2893,72	2893,72	2893,72	2893,74	2893,74	2893,72	2893,73	2893,73	0,000101248	0,010	0,032

Продовження таблиці А.3

63	2893,25	2893,22	2893,24	2893,23	2893,26	2893,25	2893,24	2893,25	2893,23	2893,23	2893,24	0,000141362	0,012	0,038
64	2892,74	2892,76	2892,76	2892,76	2892,74	2892,76	2892,77	2892,77	2892,74	2892,76	2892,75	0,000140112	0,012	0,038
65	2892,27	2892,27	2892,26	2892,29	2892,26	2892,27	2892,27	2892,25	2892,26	2892,28	2892,27	$9,95817 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,032
66	2891,79	2891,79	2891,80	2891,77	2891,76	2891,77	2891,76	2891,78	2891,80	2891,78	2891,78	0,000165747	0,013	0,041
67	2891,30	2891,30	2891,27	2891,28	2891,30	2891,30	2891,31	2891,29	2891,31	2891,28	2891,29	0,000149896	0,012	0,039
68	2890,79	2890,80	2890,82	2890,83	2890,81	2890,82	2890,81	2890,82	2890,82	2890,79	2890,81	0,000200855	0,014	0,045
69	2890,33	2890,31	2890,32	2890,31	2890,30	2890,33	2890,34	2890,32	2890,34	2890,31	2890,32	0,00014049	0,012	0,038
70	2889,82	2889,82	2889,82	2889,82	2889,82	2889,85	2889,84	2889,85	2889,85	2889,81	2889,83	0,000205923	0,014	0,045

Таблиця А.4 Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього значення ЕЧАКС КРС для гуми

№ п/п T, °C	Значення ЕЧАКС КРС ν , cm^{-1}										$m\nu$, cm^{-1}	$D\nu$, cm^{-2}	$\sigma\nu$, cm^{-1}	$u\nu$, cm^{-1}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
18	2942,68	2942,70	2942,70	2942,70	2942,69	2942,69	2942,72	2942,69	2942,69	2942,71	2942,70	0,000133912	0,012	0,037
19	2942,57	2942,57	2942,58	2942,58	2942,58	2942,57	2942,57	2942,59	2942,58	2942,56	2942,57	$4,87045 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,022
20	2942,27	2942,28	2942,27	2942,29	2942,30	2942,28	2942,29	2942,30	2942,27	2942,28	2942,28	0,000136063	0,012	0,037
21	2941,82	2941,83	2941,83	2941,84	2941,85	2941,82	2941,82	2941,81	2941,82	2941,85	2941,83	0,000129863	0,011	0,036
22	2941,19	2941,21	2941,19	2941,21	2941,19	2941,20	2941,19	2941,19	2941,21	2941,19	2941,20	$8,93416 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,030
23	2940,41	2940,40	2940,43	2940,42	2940,42	2940,39	2940,40	2940,39	2940,43	2940,41	2940,41	0,000152075	0,012	0,039
24	2939,44	2939,44	2939,44	2939,45	2939,47	2939,46	2939,46	2939,46	2939,44	2939,46	2939,45	0,00010831	0,010	0,033
25	2938,33	2938,34	2938,34	2938,30	2938,33	2938,31	2938,33	2938,32	2938,30	2938,33	2938,32	0,000143284	0,012	0,038
26	2937,05	2937,02	2937,03	2937,04	2937,01	2937,04	2937,03	2937,02	2937,03	2937,03	2937,03	0,000118468	0,011	0,034

Продовження таблиці А.4

27	2935,56	2935,56	2935,58	2935,58	2935,57	2935,55	2935,59	2935,57	2935,58	2935,56	2935,57	0,000114779	0,011	0,034
----	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	-------------	-------	-------

28	2933,94	2933,94	2933,95	2933,96	2933,95	2933,93	2933,96	2933,92	2933,92	2933,92	2933,93	0,000191502	0,014	0,044
29	2932,13	2932,13	2932,14	2932,14	2932,16	2932,16	2932,13	2932,14	2932,15	2932,15	2932,14	0,000111607	0,011	0,033
30	2930,19	2930,18	2930,18	2930,17	2930,19	2930,20	2930,16	2930,16	2930,18	2930,18	2930,18	0,000122348	0,011	0,035
31	2928,05	2928,03	2928,04	2928,07	2928,05	2928,06	2928,05	2928,04	2928,03	2928,03	2928,05	0,000142093	0,012	0,038
32	2925,73	2925,75	2925,74	2925,76	2925,75	2925,76	2925,76	2925,74	2925,73	2925,74	2925,74	$9,79432 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
33	2923,27	2923,30	2923,30	2923,29	2923,30	2923,30	2923,29	2923,27	2923,27	2923,29	2923,29	0,000155184	0,012	0,039
34	2920,67	2920,63	2920,67	2920,66	2920,67	2920,66	2920,63	2920,66	2920,65	2920,64	2920,65	0,000170949	0,013	0,041
35	2917,86	2917,85	2917,86	2917,84	2917,84	2917,84	2917,85	2917,84	2917,85	2917,83	2917,85	$7,12567 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,027
36	2914,90	2914,87	2914,90	2914,88	2914,88	2914,90	2914,90	2914,88	2914,89	2914,90	2914,88	0,000148336	0,012	0,039
37	2911,76	2911,73	2911,77	2911,77	2911,76	2911,76	2911,77	2911,76	2911,77	2911,75	2911,76	0,000106617	0,010	0,033
38	2908,47	2908,44	2908,47	2908,43	2908,43	2908,46	2908,43	2908,45	2908,45	2908,46	2908,44	0,000176797	0,013	0,042
39	2904,97	2905,00	2904,99	2905,00	2904,99	2904,98	2904,99	2904,97	2904,98	2904,96	2904,98	0,00016942	0,013	0,041
40	2901,34	2901,34	2901,35	2901,35	2901,34	2901,35	2901,34	2901,36	2901,36	2901,35	2901,35	$8,05687 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,028
41	2897,56	2897,54	2897,53	2897,53	2897,53	2897,53	2897,54	2897,54	2897,56	2897,53	2897,55	0,000119616	0,011	0,035
42	2893,58	2893,56	2893,58	2893,59	2893,57	2893,57	2893,57	2893,57	2893,57	2893,56	2893,57	$8,62822 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,029
43	2889,45	2889,42	2889,42	2889,44	2889,42	2889,42	2889,45	2889,43	2889,45	2889,43	2889,44	0,000139387	0,012	0,037
44	2885,14	2885,12	2885,13	2885,14	2885,13	2885,15	2885,13	2885,15	2885,11	2885,14	2885,13	0,000121579	0,011	0,035
45	2880,65	2880,65	2880,66	2880,67	2880,64	2880,64	2880,65	2880,64	2880,64	2880,64	2880,65	0,000120974	0,011	0,035
46	2876,02	2876,03	2876,00	2876,02	2876,04	2876,00	2876,03	2876,02	2876,02	2876,02	2876,02	$9,53664 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
47	2871,22	2871,23	2871,21	2871,20	2871,19	2871,21	2871,23	2871,22	2871,22	2871,22	2871,21	0,000117193	0,011	0,034
48	2866,24	2866,25	2866,23	2866,24	2866,22	2866,25	2866,25	2866,23	2866,22	2866,25	2866,23	0,00016068	0,013	0,040
49	2861,10	2861,10	2861,11	2861,09	2861,08	2861,08	2861,10	2861,11	2861,10	2861,08	2861,09	0,000119116	0,011	0,035
50	2855,79	2855,78	2855,78	2855,78	2855,79	2855,78	2855,77	2855,79	2855,80	2855,78	2855,79	$5,79999 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,024
51	2850,29	2850,31	2850,32	2850,32	2850,31	2850,30	2850,31	2850,30	2850,30	2850,32	2850,32	$6,72836 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026

Продовження таблиці А.4

52	2844,66	2844,65	2844,65	2844,69	2844,66	2844,68	2844,66	2844,65	2844,68	2844,68	2844,67	0,000210205	0,014	0,046
53	2838,84	2838,84	2838,84	2838,87	2838,85	2838,86	2838,87	2838,84	2838,84	2838,84	2838,86	0,000135729	0,012	0,037
54	2832,89	2832,88	2832,87	2832,87	2832,86	2832,87	2832,89	2832,87	2832,88	2832,88	2832,88	$5,62261 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,024
55	2826,73	2826,73	2826,75	2826,73	2826,72	2826,72	2826,73	2826,75	2826,73	2826,72	2826,73	0,000113011	0,011	0,034
56	2820,42	2820,43	2820,43	2820,44	2820,42	2820,43	2820,42	2820,41	2820,41	2820,43	2820,42	$7,63027 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,028
57	2813,94	2813,93	2813,95	2813,94	2813,92	2813,94	2813,96	2813,94	2813,93	2813,96	2813,94	0,000141785	0,012	0,038
58	2807,29	2807,28	2807,30	2807,29	2807,29	2807,29	2807,30	2807,31	2807,28	2807,31	2807,30	0,000128011	0,011	0,036
59	2800,50	2800,49	2800,49	2800,50	2800,48	2800,50	2800,49	2800,50	2800,50	2800,49	2800,48	$3,54639 \cdot 10^{-5}$	0,006	0,019
60	2793,49	2793,51	2793,51	2793,49	2793,49	2793,49	2793,48	2793,52	2793,49	2793,50	2793,50	0,000132445	0,012	0,036
61	2786,34	2786,37	2786,36	2786,34	2786,34	2786,36	2786,36	2786,35	2786,35	2786,36	2786,35	0,000114937	0,011	0,034
62	2779,03	2779,05	2779,06	2779,03	2779,03	2779,03	2779,05	2779,05	2779,03	2779,02	2779,04	0,000132469	0,012	0,036
63	2771,56	2771,54	2771,55	2771,54	2771,57	2771,57	2771,55	2771,56	2771,56	2771,56	2771,55	0,000118583	0,011	0,035
64	2763,89	2763,91	2763,91	2763,91	2763,89	2763,91	2763,92	2763,92	2763,92	2763,90	2763,91	0,000115425	0,011	0,034
65	2756,09	2756,09	2756,08	2756,10	2756,08	2756,09	2756,09	2756,07	2756,10	2756,10	2756,09	$9,76869 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
66	2748,11	2748,11	2748,12	2748,09	2748,08	2748,09	2748,08	2748,10	2748,09	2748,12	2748,10	0,000182529	0,014	0,043
67	2739,95	2739,96	2739,93	2739,93	2739,96	2739,95	2739,96	2739,94	2739,94	2739,96	2739,95	0,000122621	0,011	0,035
68	2731,61	2731,62	2731,65	2731,65	2731,63	2731,64	2731,63	2731,65	2731,62	2731,65	2731,63	0,000196265	0,014	0,044
69	2723,16	2723,13	2723,14	2723,13	2723,13	2723,15	2723,16	2723,14	2723,16	2723,13	2723,14	0,000147243	0,012	0,038
70	2714,48	2714,48	2714,48	2714,48	2714,47	2714,51	2714,50	2714,51	2714,49	2714,49	2714,49	0,000146848	0,012	0,038

Таблиця А.5 Залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури та непевність визначення середнього значення ЕЧАКС КРС для C₁₀H₈

№ п/п T, °C	Значення ЕЧАКС КРС ν , cm^{-1}										$m\nu$, cm^{-1}	$D\nu$, cm^{-2}	$\sigma\nu$, cm^{-1}	$u\nu$, cm^{-1}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
18	3056,88	3056,65	3056,66	3056,72	3056,73	3056,73	3056,77	3056,79	3056,74	3056,88	3056,75	0,000122317	0,011	0,035
19	3102,81	3102,81	3102,81	3102,81	3102,81	3102,80	3102,81	3102,82	3102,81	3102,81	3102,81	$2,72927 \cdot 10^{-5}$	0,005	0,017
20	3108,91	3108,93	3108,92	3108,94	3108,95	3108,92	3108,93	3108,95	3108,92	3108,94	3108,93	0,000153336	0,012	0,039
21	3115,36	3115,37	3115,37	3115,37	3115,38	3115,35	3115,35	3115,35	3115,36	3115,36	3115,36	$8,57772 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,029
22	3122,10	3122,12	3122,09	3122,12	3122,10	3122,11	3122,09	3122,10	3122,11	3122,11	3122,10	$5,78845 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,024
23	3129,18	3129,17	3129,19	3129,19	3129,18	3129,16	3129,16	3129,16	3129,18	3129,16	3129,17	0,000158771	0,013	0,040
24	3136,54	3136,54	3136,54	3136,55	3136,57	3136,56	3136,56	3136,56	3136,56	3136,57	3136,56	0,00011915	0,011	0,035
25	3144,26	3144,26	3144,26	3144,23	3144,25	3144,23	3144,25	3144,24	3144,24	3144,26	3144,25	0,000137928	0,012	0,037
26	3152,27	3152,25	3152,26	3152,27	3152,24	3152,27	3152,26	3152,25	3152,26	3152,25	3152,26	0,000120712	0,011	0,035
27	3160,57	3160,57	3160,59	3160,59	3160,58	3160,56	3160,60	3160,58	3160,58	3160,57	3160,58	0,000111496	0,011	0,033
28	3169,22	3169,21	3169,23	3169,24	3169,23	3169,21	3169,24	3169,20	3169,21	3169,21	3169,22	0,000143724	0,012	0,038
29	3178,16	3178,16	3178,17	3178,17	3178,18	3178,19	3178,16	3178,17	3178,15	3178,15	3178,17	0,000133198	0,012	0,037
30	3187,45	3187,44	3187,44	3187,43	3187,45	3187,46	3187,42	3187,42	3187,46	3187,44	3187,44	0,000157425	0,013	0,040
31	3197,03	3197,01	3197,01	3197,04	3197,03	3197,03	3197,03	3197,01	3197,03	3197,01	3197,02	0,000122843	0,011	0,035
32	3206,90	3206,92	3206,91	3206,93	3206,92	3206,93	3206,93	3206,91	3206,94	3206,94	3206,92	0,000123657	0,011	0,035
33	3217,12	3217,15	3217,15	3217,14	3217,15	3217,15	3217,14	3217,12	3217,15	3217,14	3217,14	0,000124546	0,011	0,035
34	3227,68	3227,64	3227,68	3227,67	3227,68	3227,67	3227,65	3227,67	3227,68	3227,66	3227,67	0,000174161	0,013	0,042
35	3238,51	3238,50	3238,51	3238,50	3238,49	3238,50	3238,50	3238,49	3238,51	3238,51	3238,50	$6,58538 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026
36	3249,68	3249,65	3249,68	3249,66	3249,66	3249,68	3249,68	3249,66	3249,65	3249,65	3249,67	0,000194204	0,014	0,044
37	3261,15	3261,12	3261,16	3261,16	3261,15	3261,14	3261,16	3261,15	3261,15	3261,14	3261,15	0,000105714	0,010	0,033

Продовження таблиці А.5

38	3272,95	3272,92	3272,95	3272,91	3272,91	3272,93	3272,91	3272,93	3272,92	3272,93	3272,93	0,00018682	0,014	0,043
39	3285,02	3285,05	3285,04	3285,05	3285,04	3285,03	3285,04	3285,02	3285,04	3285,05	3285,04	0,000126801	0,011	0,036

40	3297,45	3297,44	3297,45	3297,46	3297,44	3297,46	3297,44	3297,47	3297,44	3297,45	3297,45	$6,87756 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,026
41	3310,20	3310,18	3310,18	3310,17	3310,17	3310,18	3310,18	3310,19	3310,18	3310,20	3310,18	0,000137171	0,012	0,037
42	3323,25	3323,22	3323,24	3323,25	3323,23	3323,24	3323,24	3323,23	3323,25	3323,22	3323,24	$9,44966 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
43	3336,61	3336,58	3336,59	3336,61	3336,59	3336,59	3336,61	3336,59	3336,58	3336,60	3336,60	0,00011956	0,011	0,035
44	3350,29	3350,26	3350,28	3350,28	3350,28	3350,30	3350,28	3350,29	3350,28	3350,28	3350,28	$7,33212 \cdot 10^{-5}$	0,009	0,027
45	3364,27	3364,26	3364,27	3364,29	3364,25	3364,25	3364,26	3364,25	3364,27	3364,26	3364,26	0,000114438	0,011	0,034
46	3378,58	3378,59	3378,57	3378,58	3378,60	3378,56	3378,59	3378,58	3378,58	3378,59	3378,58	0,000101347	0,010	0,032
47	3393,21	3393,22	3393,20	3393,19	3393,18	3393,20	3393,22	3393,22	3393,20	3393,20	3393,20	0,000117716	0,011	0,034
48	3408,14	3408,16	3408,14	3408,15	3408,12	3408,16	3408,16	3408,13	3408,13	3408,16	3408,14	0,000139187	0,012	0,037
49	3423,40	3423,40	3423,41	3423,39	3423,38	3423,38	3423,40	3423,41	3423,38	3423,39	3423,39	0,0001004	0,010	0,032
50	3438,97	3438,96	3438,96	3438,96	3438,97	3438,96	3438,95	3438,97	3438,96	3438,97	3438,96	$5,39246 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,023
51	3454,83	3454,85	3454,85	3454,86	3454,84	3454,84	3454,85	3454,84	3454,86	3454,86	3454,85	0,000106106	0,010	0,033
52	3471,04	3471,03	3471,03	3471,07	3471,04	3471,06	3471,04	3471,03	3471,04	3471,04	3471,04	0,000162827	0,013	0,040
53	3487,55	3487,55	3487,55	3487,58	3487,56	3487,56	3487,57	3487,54	3487,57	3487,57	3487,56	0,000155876	0,012	0,040
54	3504,40	3504,39	3504,38	3504,38	3504,38	3504,39	3504,40	3504,39	3504,39	3504,38	3504,39	$5,90839 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,024
55	3521,53	3521,53	3521,55	3521,53	3521,52	3521,52	3521,53	3521,55	3521,54	3521,53	3521,53	$9,49221 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,031
56	3538,99	3539,00	3539,00	3539,01	3538,99	3539,00	3538,99	3538,98	3538,99	3538,99	3538,99	$6,18636 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,025
57	3556,77	3556,76	3556,77	3556,76	3556,75	3556,76	3556,78	3556,76	3556,76	3556,78	3556,77	0,000110754	0,011	0,033
58	3574,85	3574,84	3574,86	3574,85	3574,85	3574,85	3574,86	3574,87	3574,84	3574,86	3574,85	0,000103405	0,010	0,032
59	3593,27	3593,27	3593,27	3593,28	3593,26	3593,28	3593,27	3593,27	3593,27	3593,25	3593,27	$6,01776 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,025
60	3611,97	3611,98	3611,99	3611,96	3611,97	3611,96	3611,96	3612,00	3611,98	3611,98	3611,97	0,000134376	0,012	0,037
61	3631,00	3631,03	3631,02	3631,00	3631,00	3631,02	3631,02	3631,01	3631,03	3631,01	3631,01	0,000115294	0,011	0,034
62	3650,36	3650,38	3650,38	3650,35	3650,36	3650,35	3650,37	3650,37	3650,35	3650,37	3650,36	0,000101248	0,010	0,032

Продовження таблиці А.4

63	3670,03	3670,01	3670,02	3670,01	3670,04	3670,04	3670,02	3670,03	3670,02	3670,01	3670,02	0,000141362	0,012	0,038
----	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	-------------	-------	-------

64	3689,99	3690,01	3690,01	3690,01	3689,99	3690,01	3690,02	3690,02	3689,99	3690,01	3690,01	0,000140112	0,012	0,038
65	3710,30	3710,30	3710,29	3710,32	3710,29	3710,30	3710,30	3710,28	3710,29	3710,31	3710,30	$9,95817 \cdot 10^{-5}$	0,010	0,032
66	3730,91	3730,91	3730,93	3730,90	3730,89	3730,89	3730,89	3730,91	3730,93	3730,91	3730,91	0,000165747	0,013	0,041
67	3751,84	3751,84	3751,81	3751,82	3751,84	3751,84	3751,85	3751,82	3751,85	3751,82	3751,83	0,000149896	0,012	0,039
68	3773,05	3773,06	3773,09	3773,09	3773,08	3773,09	3773,08	3773,09	3773,09	3773,05	3773,08	0,000200855	0,014	0,045
69	3794,64	3794,62	3794,62	3794,62	3794,61	3794,63	3794,64	3794,63	3794,65	3794,62	3794,63	0,00014049	0,012	0,038
70	3816,49	3816,49	3816,49	3816,48	3816,48	3816,51	3816,51	3816,52	3816,51	3816,48	3816,49	0,000205923	0,014	0,045

Додаток Б

Програмна модель залежності непевності визначення частоти КРС від роздільної здатності за частотою для тестового сигналу при випадковій складовій похибки передавальної характеристики елементів оптичної схеми, лінійній та нелінійній складовій похибки.

```

clear all;
close all;
clc;
Vmin=400;
Vmax=550;
N_duskret_V=100;
delta_V_max=0.01;
krok_v=delta_V_max/N_duskret_V;
delta_V=krok_v:krok_v:delta_V_max;
K_1_poxubka_NF_random = 0.2;
K_1_poxubka_Linse_random = 0.02;
K_2_poxubka_Linse_random = 0.02;
K_poxubka_Lambda_random = 0.005;
K_1_diviation_Linse=0;
K_2_diviation_Linse=0;
K_1_diviation_NF=0;
K_2_diviation_Lambda = 0;
K_polinom_linse1=2;
K_polinom_linse2=2;
K_polinom_NF=2;
K_polinom_Lambda=2;
N_polinom=2; % range desired
K_polinom_linse1=1;
K_polinom_linse2=1;
K_polinom_NF=1;
for j = 1:N_duskret_V;

```

```

p_polinom=randperm(N_polinom);
K_polinom_linse1=p_polinom(1);
p_polinom_1=randperm(N_polinom);
K_polinom_linse2=p_polinom_1(1);
p_polinom_NF=randperm(N_polinom);
K_polinom_NF=p_polinom_NF(1);
p_polinom_Lambda=randperm(N_polinom);
K_polinom_lambda=p_polinom_Lambda(1);
destro(j)=K_polinom_NF;
destro_3(j)=K_polinom_linse1;
destro_1(j)=K_polinom_linse2;
destro_2(j)=K_polinom_linse2;
x= Vmin:delta_V(j):Vmax;
y1 = trapmf(x,[410 430 430 450]);
y2 = trapmf(x,[400 450 650 800]);
y3 = trapmf(x,[400 450 650 800]);
y_4 = trapmf(x,[523 523 541 541]);
y4=(y_4*(-1)+abs(max(y_4)));
y6 = trapmf(x,[400 424 662 700]);
for k = 1:100;
    K_1_poxubka_Linse = double(rand(1)-0.5)*2*K_1_diviation_Linse;
    if K_polinom_linse1 == 1
        pRange_1 = polyfit([x(1), x(end)], [0,K_1_poxubka_Linse],
K_polinom_linse1); % Random line
    elseif K_polinom_linse1 == 2
        pRange_1 = polyfit([x(1), x(round(length(x)/2)), x(end)],
[0,K_1_poxubka_Linse, 0], K_polinom_linse1);
    end
    yRange_1 = polyval(pRange_1,x);
    yRandom = K_1_poxubka_Linse_random*(rand(size(yRange_1))-0.5)*2; %
Random

```

```

yLinse_1 = y2+yRange_1+yRandom; % summary Random

K_2_poxubka_Linse = double(rand(1)-0.5)*2*K_2_diviation_Linse;
    if K_polinom_linse2 == 1
        pRange_2 = polyfit([x(1), x(end)], [0,K_2_poxubka_Linse],
K_polinom_linse2);
    elseif K_polinom_linse2 == 2
        pRange_2 = polyfit([x(1), x(round(length(x)/2)), x(end)],
[0,K_2_poxubka_Linse, 0], K_polinom_linse2);
    end
yRange_2 = polyval(pRange_2,x);
yRandom = K_2_poxubka_Linse_random*(rand(size(yRange_2))-0.5)*2;
yLinse_2 = y3+yRange_2 +yRandom; % summary Random

K_1_poxubka_NF = double(rand(1)-0.5)*2*K_1_diviation_NF;
    if K_polinom_NF == 1
        pRange_3 = polyfit([x(1), x(end)], [0,K_1_poxubka_NF], K_polinom_NF);
    elseif K_polinom_NF == 2
        pRange_3 = polyfit([x(1), x(round(length(x)/2)), x(end)],
[0,K_1_poxubka_NF, 0], K_polinom_NF); % Random line
    end
yRange_3 = polyval(pRange_3,x);
yRandom = K_1_poxubka_NF_random*(rand(size(yRange_3))-0.5)*2; %
Random
yNF = (yRange_1+y4+yRandom); % summary Random

K_poxubka_Lambda = double(rand(1)-0.5)*2*K_2_diviation_Lambda;
    if K_polinom_Lambda == 1
        pRange_5 = polyfit([x(1), x(end)], [0,K_poxubka_Lambda],
K_polinom_Lambda); % Random line
    elseif K_polinom_Lambda == 2

```

```

    pRange_5 = polyfit([x(1), x(round(length(x)/2)), x(end)],
[0,K_poxubka_Lambda, 0], K_polinom_Lambda);
    end
    yRange_5 = polyval(pRange_5,x);
    yRandom = K_poxubka_Lambda_random*(rand(size(yRange_5))-0.5)*2; %
Random
    yLambda = y6 +yRange_5+yRandom; % summary Random

    y = (y1.* yLinse_1.* yLinse_2.* yNF.*yLambda);
    GC_x(k) = sum(x.*y)/sum(y);
    GC_y(k) = sum(x.*y)/sum(x);
    [M_y(k),indMax]=max(y);% maximum stocks
    SquareY = cumsum(y);
    indexSqR_1 = length(y(SquareY <= sum(y)/2));% index of half square ratio
    indexSqR_2 = indexSqR_1 +1;
    x_1 = x(indexSqR_1);
    x_2 = x(indexSqR_2);
    y_1 = SquareY(indexSqR_1);
    y_2 = SquareY(indexSqR_2);
    SqR_y(k) = sum(y)/2;
    SqR_x(k) = x_1 + (SqR_y(k)-y_1)/(y_2-y_1)*(x_2-x_1);
    M_x(k)=x(indMax);
    end
GCmean_x = mean(GC_x);
GCstd_x = std(GC_x)*3;

GCmean_y = mean(GC_y);
GCstd_y = std(GC_y)*3;

Mx_mean = mean(M_x)

```

```

Mx_std = std(M_x)*3;

My_mean = mean(M_y);
My_std = std(M_y)*3;

SqRx_mean = mean(SqR_x)
SqRx_std = std(SqR_x)*3;
% % % relative uncertainty
uGC(j)=GCstd_x/abs(GCmean_x)*100
uMax(j)=Mx_std/abs(Mx_mean)*100;
uSqR(j)=SqRx_std/abs(SqRx_mean)*100;
toc;
end
Aprox_CG = polyfit(delta_V,uGC,2);
Aprox_graf_CG = polyval(Aprox_CG, delta_V);
Aprox_uSqR = polyfit(delta_V,uSqR,2);
Aprox_graf_uSqR = polyval(Aprox_uSqR, delta_V);
Aprox_uMax = polyfit(delta_V,uMax,2);
Aprox_graf_uMax = polyval(Aprox_uMax, delta_V);
% figure('Color','w');
loglog(delta_V,uGC,'b.',delta_V,Aprox_graf_CG,'b',delta_V,uMax,'k.',delta_V,Apro
x_graf_uMax,'k',delta_V,uSqR,'g.',delta_V,Aprox_graf_uSqR,'g','LineWidth',2);
set(gca,'FontSize',20);
set(gca,'XGrid','on','YGrid','on','YMinorGrid','off');

```

Додаток В

Програмна модель залежності непевності визначення температури від непевності знаходження частоти Раманівського випромінювання.

```

clear all;
close all;
A= -120939.912771814;
B= -298.873913677432;
C= 2.52835081023379;
D= -0.000791030542887741;
E= 0.00000453720503844765;
k_studenta=3;
Vmin=400;
Vmax=700;
N_duskret_V=100;
delta_V_max=10;
krok_v=delta_V_max/N_duskret_V;%
delta_V=krok_v:krok_v:delta_V_max;
K_1_poxubka_NF_random =0.01;
K_1_diviation_NF=0.01;
K_polinom_NF=2;
for j = 1:N_duskret_V;
x= Vmin:delta_V(j):Vmax;
tic;
y1 = trapmf(x,[550 550 550 675]);
y_2 = trapmf(x,[523 523 541 541]);
y2=(y_2*(-1)+abs(max(y_2)));
    for k = 1:100;
        K_1_poxubka_NF = double(rand(1)-0.5)*2*K_1_diviation_NF;
        if K_polinom_NF == 1

```

```

    pRange_1 = polyfit([x(1), x(end)], [0,K_1_poxubka_NF], K_polinom_NF);
% Random line
    elseif K_polinom_NF == 2
        pRange_1 = polyfit([x(1), x(round(length(x)/2)), x(end)],
[0,K_1_poxubka_NF, 0], K_polinom_NF); % Random line
    end
    yRange_1 = polyval(pRange_1,x);
    yRandom = K_1_poxubka_NF_random*(rand(size(yRange_1))-0.5)*2; %
Random
    yNF = (yRange_1+y2+yRandom); % summary Random
    y=(y1.*yNF);
    GC_x(k) = sum(x.*y)/sum(y);
    GC_y(k) = sum(x.*y)/sum(x);
    T(k) =
(A+((B.*GC_x(k)))+(C.*GC_x(k).^2)+(D.*GC_x(k).^3)+(E.*GC_x(k).^4));%calc T

    end
GCmean_T = mean(T);
GCstd_T = std(T)*3;
T_out(j)=T(k);
GCmean_x = mean(GC_x);
GCstd_x = std(GC_x)*3;
GCmean_y = mean(GC_y);
GCstd_y = std(GC_y)*3;
% % % relative uncertainty
uGC_T(j)=GCstd_T/abs(GCmean_T)*100;
uGC(j)=GCstd_x/abs(GCmean_x)*100;
delta_T(j)=((B+(2*C).*GC_x(k)+(3*D).*GC_x(k).^2)+(4*E).*GC_x(k).^3));
delta_vidnosne_T(j)=((delta_T(j)\T(k)).*uGC(j))*100;
toc;
end

```



```
Aprox_CG_T = polyfit(delta_V,uGC_T,2);  
Aprox_graf_CG_T = polyval(Aprox_CG_T, delta_V);  
Aprox_CG = polyfit(delta_V,uGC,2);  
Aprox_graf_CG = polyval(Aprox_CG, delta_V);  
figure ('Color','w');  
plot(uGC,uGC_T,'b.','LineWidth',2);  
grid on  
hold on
```

Додаток Г

Програма опрацювання результатів вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла.

```
clear all();
n=5; %polynome oder
folderName = 'D:\Work\Dyser_work\Doslidgenja\Keramic\28\time_10s\';
%path to data files
numFiles = 100;
%model constant parameters
v0 = (1/532)*10^7;
h = 6.625*10^-34;
c = 299792458;
T = 18;
% array initialization
x = cell(1,numFiles);
y = cell(1,numFiles);
x_ = cell(1,numFiles);
y_ = cell(1,numFiles);
p = cell(1,numFiles);
ya = cell(1,numFiles);
X = cell(1,numFiles);
Y = cell(1,numFiles);
GC1_x_ = zeros(1,numFiles);
GC1_y_ = zeros(1,numFiles);
GC1_x = zeros(1,numFiles);
GC1_y = zeros(1,numFiles);
S1 = zeros(1,numFiles);
S2 = zeros(1,numFiles);
M1_x = zeros(1,numFiles);
M2_x = zeros(1,numFiles);
M1_y = zeros(1,numFiles);
```

```

M2_y = zeros(1,numFiles);
% notch filter parameters
xNF_=-10;
xNF1 = 10;
xNF2 = 8000;
yNF=0.0;
for i = 1:numFiles;
fileName = [folderName 'Loop40_WL040_T010_WT027_C00' num2str(i) '.xls'];
%set file name
[data] = xlsread(fileName);% read data from file
x(i) = {data(:,1)};
y_temp = data(:,2);
y(i) = {y_temp/max(y_temp)}; %normalization from [-1:1]
p(i) = {polyfit(x{i}, y{i}, n)}; %approximation
ya(i)={p{i}(1)*x{i}.^5+p{i}(2)*x{i}.^4+p{i}(3)*x{i}.^3+p{i}(4)*x{i}.^2+p{i}(5)*
x{i}.^1+p{i}(6)};
is = trapz (ya{i});% square computing
vi = sum(x{i}.*ya{i})/sum(ya{i});% model parameter
% filtering(x)
ind = (x{i}<xNF1);
y{i}(ind) = 0;
ind = (x{i}>xNF2);
y{i}(ind) = 0;
% % filtering y (level)
y{i} = y{i} - yNF;
ind = (y{i} < 0);
y{i}(ind) = 0;
k=exp(3*log((v0-vi)/(v0+vi)))+(h*c*v0)/T); % gain calculation
y_(i)={flipud(y{i}/k)};% mirroring and scaling
x_(i)={-flipud(x{i})}; %mirroring
Y(i)={[y_{i};y{i}]}; % merging arrays

```

```

X(i)=[x_{i}; x{i}]; %merging arrays
% center of gravity calculation
GC1_x_(i) = sum(x_{i}.*y_{i})/sum(y_{i});
GC1_y_(i) = sum(x_{i}.*y_{i})/sum(x_{i});
GC1_x(i) = sum(x{i}.*y{i})/sum(y{i});
GC1_y(i) = sum(x{i}.*y{i})/sum(x{i});
S1(i)=sum(y_{i}); %anti-stocks
S2(i)=sum(y{i});
[M1_y(i),ind1]=max(y_{i}); %maximum anti-stocks
[M2_y(i),ind2]=max(y{i});
M1_x(i)=x_{i}(ind1);
M2_x(i)=x{i}(ind2);
%data vizualization
figure(1)
hold on
plot(X{i},Y{i})
plot(GC1_x_(i),GC1_y_(i), 'g*',GC1_x(i),GC1_y(i), 'g*')
hold off
figure(2)
hold on
plot(X{i},Y{i})
plot(M1_x(i),M1_y(i), 'g*',M2_x(i),M2_y(i), 'g*')
hold off
end
%statistics calculation
GC1mean_x_ = mean(GC1_x_);
GC1std_x_ = std(GC1_x_);
GC1mean_y_ = mean(GC1_y_);
GC1std_y_ = std(GC1_y_);
GC1mean_x = mean(GC1_x);
GC1std_x = std(GC1_x);

```

```

GC1mean_y = mean(GC1_y);
GC1std_y = std(GC1_y);
S1_mean = mean(S1);
S1_std = std(S1);
S2_mean = mean(S2);
S2_std = std(S2);
M1x_mean = mean(M1_x);
M1x_std = std(M1_x);
M1y_mean = mean(M1_y);
M1y_std = std(M1_y);
M2x_mean = mean(M2_x);
M2x_std = std(M2_x);
M2y_mean = mean(M2_y);
M2y_std = std(M2_y);
uGC1_=GC1std_x_/abs(GC1mean_x_)*100;
uGC1=GC1std_x/abs(GC1mean_x)*100
uMax_=M1x_std/abs(M1x_mean)*100;
uMax=M2x_std/abs(M2x_mean)*100;
figure(1)
hold on
plot(GC1mean_x_,GC1mean_y_, 'r*',GC1mean_x,GC1mean_y, 'r*')
hold off
grid on
figure(2)
hold on
plot(M1x_mean,M1y_mean, 'r*',M2x_mean,M2_y(i), 'r*')
hold off
grid on

```

Додаток Д

Фотографія робочого місця під час експериментального отримання
спектрів КРС





АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Кривенчука Юрія Павловича

«Вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла»

представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – *прилади та методи вимірювання теплових величин*

Комісія у складі:

Заступника генерального директора – головного інженера Лаха О.І. та начальника відділу пірометрії Кубишин С.М. даним актом підтверджує, що основні результати наукових досліджень, отримані при виконанні дисертаційної роботи Кривенчука Ю.П., використовуються у нашій організації для безконтактного вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла в лабораторії пірометрії.

Особливо слід відзначити ефективність використання отриманих в роботі інтерполяційних рівнянь для різних досліджуваних об'єктів, які описують залежність еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла від температури. Отримані залежності та інтерполяційні вирази дозволяють поставити вимоги до непевності вимірювання еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла залежно від необхідної непевності вимірювання температури або оцінити непевність вимірювання температури за непевністю вимірювання еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

Заступник генерального директора

Лох О.І.

Начальник відділу пірометрії

Кубишин С.М.



ЗАТВЕРДЖУЮ

професор науково-педагогічної роботи
 Національного університету
 «Львівська політехніка»
 к.т.н., доц. Давидчак О. Р.
 2016 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес

Кривенчука Юрія Павловича

«Вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла»
 представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
 05.11.04 – *прилади та методи вимірювання теплових величин*

Комісія НУ «Львівська політехніка» у складі:


Голова комісії – голова науково-методичної ради інституту комп'ютерних технологій та метрології, д.т.н., проф. Байцар Р.І.

Члени комісії: професор кафедри "Інформаційно-вимірювальні технології", д.т.н., проф. Скоропад П.І., професор кафедри "Інформаційно-вимірювальні технології", д.т.н., проф. Микитин І.П. і професор кафедри "Інформаційно-вимірювальні технології", д.т.н., проф. Луцик Я.Т.


даним актом підтверджує, що проведені дисертантом наукові дослідження виконувалися ним на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка» у співпраці з кафедрою вимірювання процесів і сенсорної техніки Технічного університету міста Ільменау (Німеччина). Основні положення та результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» при вивченні дисциплін:

- «Методи та засоби нановимірювань та нанотехнологій» для студентів спеціальностей 8.05100101 та 7.05100101 «Метрологія та вимірювальна техніка».
- «Нанотехнології та вимірювальна техніка» для студентів спеціальностей 8.05100101 та 7.05100101 «Метрологія та вимірювальна техніка».
- «Основи термометрії», для студентів спеціальності 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка", спеціалізації "Метрологія та вимірювальна техніка".
- При підготовці бакалаврських та магістерських кваліфікаційних робіт.

Голова комісії,
 голова науково-методичної ради ІКТА
 д.т.н., проф.

 Байцар Р.І.


Члени комісії:
 проф. каф. ІВТ, д.т.н. проф.

 Скоропад П.І.

проф. каф. ІВТ, д.т.н. проф.

 Микитин І.П.

проф. каф. ІВТ, д.т.н. проф.

 Луцик Я.Т.