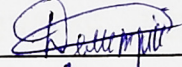


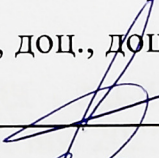
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
«Програмно-апаратний комплекс для калібрування об'єктиву лазерного
далекоміру»

Виконав: студент 4 курсу, групи КОІС-21Б
спеціальності 152-Метрологія та _____
інформаційно-вимірювальна _____ техніка,
освітня програма «Комп'ютеризовані
оптико-інформаційні системи»

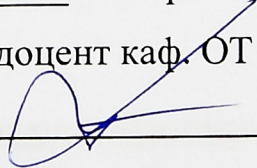
Мирошніченко Д.С. 

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. БМІОЕС

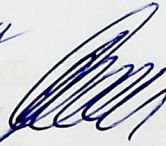
Кожем'яко А.В. 

«10» червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент каф. ОТ

Тарновський М.Г. 

«16» червня 2025 р.

Допущено до захисту
Зав. кафедри БМІОЕС  М.Г. Коваль
17 червня 2025 року

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Рівень вищої освіти перший(бакалаврський)

Галузь знань – 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність – 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма - Комп'ютеризовані оптико-інформаційні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМІОЕС

доц., к т. н. Л. Г. Коваль

« 21 » березня 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мирошніченко Дмитру Сергійовичу

1.Тема роботи: «Програмно-апаратний комплекс для калібрування об'єктиву лазерного далекоміру»

керівник роботи Кожем'яко Андрій Вікторович , к.т.н., доцент затверджено наказом вищого навчального закладу від «20» березня 2025 року №97.

1. Термін подання студентом роботи: 13.06.2025

2. Вихідні дані до роботи:

3.1 Види лазерних оптико-електронних засобів вимірювання відставні.

3.2 Методи аналізу результатів вимірювання та юстування лазерних далекомірів.

3.3 Перелік основних складових програмно-апаратного комплексу юстування лазерних

4. Зміст текстової частини: : Вступ, обґрунтування вибору методу розробки та постановка завдань дослідження, методи збору та оброблення даних вимірювань лазерними далекомірами, розробка структури і програмних компонентів комплексу калібрування лазерного далекоміра, висновки, список використаних джерел, додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень): загальна структурна схема далекоміру, функціональна схема далекоміру, передавальна система лазерного далекоміра, передавальна система лазерного далекоміра, блок-схема роботи системи калібрування

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Кожем’яко А.В., к.т.н., доц, доцент каф. БМІОЕС		

6. Дата видачі завдання «11» березня 2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
	початок	закінчення	
Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	03.03.2025	11.03.2025	
Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	12.03.2025	29.03.2025	
Аналіз вирішення поставленої задачі на даному етапі	30.03.2025	05.05.2025	
Розробка методу і структури системи	06.05.2022	17.05.2025	
Розробка програмних модулів аналізу та класифікації системи	18.05.2025	24.05.2025	
Експериментальні дослідження системи	24.05.2025	31.05.2025	
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.06.2025	07.06.2025	
Нормоконтроль	05.06.2025	09.06.2025	
Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	11.06.2025	16.06.2025	
Захист БДР ЕК	19.06.2025	20.06.2025	

Студент

(підпис) Мирошніченко Д.С

Керівник роботи

(підпис) Кожем’яко А.В

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 92 сторінок формату А4, на яких є 10 рисунків, 19 таблиць, список використаних джерел містить 14 найменувань.

У цій роботі розглядаються основні методи вимірювання відстані лазерними далекомірами, зокрема імпульсний, імпульсно-фазовий та методи змінних частот. Детально описано розробку структури та програмних компонентів комплексу калібрування, включаючи алгоритми збору й обробки даних, а також методи генерації калібрувальних коефіцієнтів. Представлено результати тестування розробленого програмного забезпечення та надано рекомендації для його ефективного використання. Метою роботи є розширення функціональні можливості системи калібрування лазерних далекомірів за рахунок впровадження методів збору, обробки та аналізу вимірювальних даних, а також створення програмних компонентів для автоматизації процесу калібрування та генерації калібрувальних коефіцієнтів.

Ключові слова: лазерний далекомір, калібрування, апаратний комплекс, програмне забезпечення, точність вимірювань.

ABSTRACT

The Bachelor's thesis consists of 92 A4-sized pages, including 10 figures, 19 tables, and a list of 14 references.

This work examines the main distance measurement methods used in laser rangefinders, specifically pulse, pulse-phase, and variable-frequency techniques. It provides a detailed description of the development of the structure and software components for a laser rangefinder calibration complex, covering data acquisition and processing algorithms, as well as methods for generating calibration coefficients. The testing results of the developed software are presented, along with recommendations for its effective use. The purpose of this work is to expand the functional capabilities of laser rangefinder calibration systems by implementing advanced data acquisition, processing, and analysis methods, and by creating software components to automate the calibration process and the generation of calibration coefficients.

Keywords: laser rangefinder, calibration, hardware complex, software, measurement accuracy.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ РОЗРОБКИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	10
1.1 Аналіз технологій калібрування лазерних далекомірів	10
1.2 Порівняльний аналіз існуючих рішень	12
1.3 Характеристики параметрів калібрування лазерних систем	21
1.4 Аналіз методів оцінювання точності	24
2 МЕТОДИ ЗБОРУ ТА ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЛАЗЕРНИМИ ДАЛЕКОМІРАМИ	28
2.1 Імпульсний метод.....	28
2.2 Імпульсно – фазовий метод.....	29
2.3 Вирішення неоднозначності	30
2.5 Спосіб плавно змінних частот	34
2.6 Спосіб декількох фіксованих частот.....	37
3 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ І ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ КОМПЛЕКСУ КАЛІБРУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА	42
3.1 Розробка методу та алгоритму збору даних з використанням апаратної частини.....	42
3.2 Розробка алгоритму обробки даних калібрування	45
3.3 Методу та алгоритм генерації калібрувальних коефіцієнтів	47
3.4 Алгоритм генерації калібрувальних коефіцієнтів	47
3.4 Програмне забезпечення для задач калібрування	50
3.5 Результати тестування калібрувального комплексу	56
3.6 Рекомендації для користувача програмного засобу для калібрування .	64

ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75
ДОДАТОК А. <u>ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ</u>	77
ДОДАТОК Б. <u>Ілюстративна частина Програмно-апаратний комплекс</u> для калібрування об'єктиву лазерного далекоміру.....	78
ДОДАТОК В. Лістинг програмного забезпечення.....	84

ВСТУП

З розвитком технологій, розвивається й автоматизація виробництва цих самих технологій. Лазерні далекоміри стали достатньо важливі в галузях автоматизації, тому що насамперед для будь якого виробництва важлива точність, у якій лазерні далекоміри відіграють одну з найважливіших ролей. Завдяки ним людство стало спроможне вимірювати не тільки достатньо великі відстані за лічені секунди, що має своє застосування при будівництві, де не менш важливо щоб була дотримана точність вимірювань, а й надзвичайно малі, так лазерні далекоміри використовуються у виробництві для створення надзвичайно малих компонентів, які зараз є у приладах які ми використовуємо у повсякденні, і оточуючих нас день за днем. Окрім основної функції вимірювання принцип лазерних далекомірів може використовуватись як датчик, що збирає данні. На основі яких створюються системи безпеки для утримання інформації що до перетину їх об'єктами. Або якщо брати сучасний розвиток технології то вони можуть використовуватися у медицині для відновлення зору, та у роботизованих пристроях які можуть допомагати нам по дому та у робототехніці. Не менш важливим є використання цієї техніки у військових цілях, так як технологія лазерного далекоміру використовується у прицілах, системах наведення.

Актуальність роботи. Все більш важливим показником стає точність, через що все більше уваги приділяється області оптико-електронних засобів, які здатні проводити вимірювання з надзвичайною точністю. Одним з таких оптичних засобів стали лазери, точніше лазерні далекоміри. Вони набувають все більше переваги у промисловості, будівництві, військовій справі, навігації, медицині та топографії. Також через розвиток робототехніки, вони ще більше розповсюджуються, так як в робототехніці на принципі лазерних далекомірів створені датчики, що допомагають у точності роботи. Але не зважаючи на те що вони здатні й зараз надавати результат вимірювань який не можливо отримати будь якими іншими методами, вони все таки не дійшли до свого

ідеалу. Так наприклад, промислові варіанти лазерних далекомірів, можуть давати похибку через погодні умови, нерівну поверхню розташування, тому існує потреба у тому щоб покращити адаптивну здатність лазерних далекомірів завдяки програмному комплексу калібрування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Мета роботи – розширити функціональні можливості системи калібрування лазерних далекомірів за рахунок впровадження методів збору, обробки та аналізу вимірювальних даних, а також створення програмних компонентів для автоматизації процесу калібрування та генерації калібрувальних коефіцієнтів.

Об'єкт дослідження – процеси вимірювання відстаней за допомогою лазерних далекомірів.

Предмет дослідження - методи і засоби калібрування приймальної системи лазерних далекомірів.

Завдання роботи:

- проаналізувати існуючі типи лазерних далекомірів;
- визначити методи вимірювання відстані за допомогою лазерного випромінювання;
- розробити структурну та функціональну схеми лазерного далекоміра;
- розробити програмне забезпечення для виконання калібрування лазерного далекоміра.

1 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ РОЗРОБКИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз технологій калібрування лазерних далекомірів

Наразі відомо не мало технологій для калібрування лазерного обладнання, кожне із них може використовувється для калібрування таких параметрів:

1. Кінематика верстата – сукупність параметрів та характеристик, які описують рухи робочих елементів верстата
2. Динамічні параметри – сукупність значень які вимірюються під впливом переміщень та інших динамічних параметрів
3. Обертові осі
4. Оптичні параметри- сукупність параметрів які залежать від оптичного джерела, такі як:
 - Потужність лазера
 - Стабільність потужності
 - Розподіл інтенсивності променя
 - Розмір та фокусна точка променя
 - Довжина хвилі
 - Колімація променя
5. Систему вимірювань – система значень вимірювань які можуть різнитися в залежності від масштабу, зміщенні нуля, та подібних
6. Температурні компенсації
7. Програмні калібрування системи ЧПК

Для калібрування геометричних параметрів на разі є такі обладнання:

Список найбільш поширених приладів для калібрування у цьому типу параметрів є лазерний інтерферометр що використовується для калібрування лінійних переміщень, точності позиціонування та прямолінійності за рахунок того що лазерний промінь проходить вздовж переміщуваної осі, відбиваючись від дзеркала, фіксуючи переміщення зміною інтерференційної картини - це

допомагає визначити похибки лінійних переміщень, та скалібрувати точність позиціонування та прямолінійність руху.[1]

Автоматизовані системи 3D-контролю геометрії для перевірки ортогональності осей, люфту кругової інтерполяції за принципом застосування високоточних сканерів з числовим програмним керуванням [2].

Оптичні нівеліри, теодоліти, лазерні рівні для перевірки паралельності або перпендикулярності елементів конструкції методом вимірювання кутів та різниць висоти між елементами. Допмагає контролювати паралельність напрямлених та перпендикулярності осей або прощин[3].

Електронні рівні для точного вимірювання напрямних, осей та перевірки нахилу за принципом вимірювання нахилів з надвисокою точністю до мікрорадіанів.

Обладнання для калібрування динамічних параметрів.

Ball bar-тестування для виявлення люфту, неправильної геометрії та вібрацій за принципом з'єднання кульковим датчиком що з'єднує два шари машини та вимірює відхилення при кутовому русі[4].

Датчики прискорення, вібродатчики для аналізу вібрацій при русі завдяки встановленню на рухомі частини, тим самим даючи змогу оцінити на скільки сильно може за можливих умов відхилятися значення, та дозволяє знайти оптимальний варіант щоб запобігти цьому[5].

Аналіз логів сервоприводів та енкодерів для визначення відхилень під час переміщення це більше як перевірка функціоналу наявних допоміжних пристроїв для виконання тих чи інших динамічних рухів, що дозволяє зменшити ризик нестабільності та відхилень під час руху.

Обладнання для калібрування обертових осей.

Калібрування 5-осьових машин використовує датчики та інтерферометри для синхронного вимірювання рухів осей[1, 4, 6].

Лазерні кутоміри або інтерферометри з поворотною платформою для оцінки кутової точності та повторюваності за рахунок вимірювання точного кута обертання інтерференційними методами.

Поворотні індексатори з оптичними датчиками для визначення точного кута обертання через фіксацію положення оптичним кодуванням[6].

Обладнання для калібрування оптичних параметрів лазера.

Лазерні енергометри та ватметри для вимірювання вихідної потужності, поглинаючи лазерне випромінювання для вимірювання його потужності[7, 8].

Біметричні камери для визначення форми і профілю лазерного пучку[9].

Спектрометри для перевірки довжини хвилі лазерного випромінювання та стабільності спектру випромінювання[10].

Тестові гравіювання на каліброваних мішенях для оцінки точності фокусування.

Обладнання для калібрування системи вимірювання.

Лазерна калібровка масштабного коефіцієнта для корекції реальних переміщень осей порівнянням вимірювання фактичної довжини переміщень та числових згначень[11].

Системи зворотнього зв'язку на основі лінійних енкодерів для визначення та компенсації похибок позиціонування що допомагає компенсувати похибки, та контролювати зсув лазерного проміню [12].

Інтерферометри з температурними датчиками для створення температурних моделей компенсацій через визначення впливу температури на можливе розширення матеріалів [11].

Компенсаційні карти похибок – використовується у контролерах числового програмного керування для автоматизації системних помилок.

1.2 Порівняльний аналіз існуючих рішень

Лазерний інтерферометр — це високоточний прилад для вимірювання відстаней, переміщень, кутів або інших параметрів за допомогою інтерференції

лазерного випромінювання. Принцип роботи базується на явищі інтерференції світлових хвиль. Лазерний промінь, зазвичай гелій-неоновий лазер із довжиною хвилі близько 633 нм, генерується джерелом і ділиться на два проміні за допомогою напівпрозорого дзеркала (світлодільника). Один промінь, так званий опорний, спрямовується до нерухомого дзеркала, а другий, вимірювальний, — до рухомого відбивача, розташованого на об'єкті, що досліджується. Після відбиття проміні повертаються до світлодільника, де вони рекомбінуються, створюючи інтерференційну картину. Зміна положення рухомого відбивача викликає зсув інтерференційних смуг, який реєструється фотодетектором. Кількість смуг, що проходять через детектор, пропорційна переміщенню об'єкта, а точність вимірювання залежить від довжини хвилі лазера. Для підвищення точності використовуються системи стабілізації частоти лазера та компенсації впливу зовнішніх факторів, таких як температура чи тиск. Лазерні інтерферометри застосовуються в метрології, машинобудуванні, нанотехнологіях та інших галузях, де потрібна субмікронна точність.

3D-системи контролю використовуються для вимірювання геометричних параметрів об'єктів у тривимірному просторі. Принцип роботи таких систем базується на комбінації оптичних, лазерних або контактних методів для збору даних про форму, розміри та положення об'єкта. Найпоширенішим є метод лазерного сканування: лазерний промінь спрямовується на поверхню об'єкта, а відбиття реєструється камерою чи сенсором. За допомогою триангуляції (аналізу кутів між лазером, об'єктом і сенсором) обчислюються координати точок на поверхні. Система сканує об'єкт, створюючи хмару точок, яка обробляється програмним забезпеченням для побудови 3D-моделі. Інший метод — структуроване світло, коли на об'єкт проектується світлові візерунки (смуги чи сітки), а деформація цих візерунків фіксується камерою для визначення геометрії. Контактні 3D-системи, такі як координатно-вимірювальні машини, використовують щуп, який фізично торкається поверхні, записуючи координати точок. Дані обробляються для аналізу відхилень від еталонної моделі. Системи

застосовуються в промисловому контролі якості, реверс-інжинірингу та інших сферах.

Оптичний нівелір — це геодезичний прилад для визначення перевищень між точками на місцевості. Принцип роботи базується на створенні горизонтальної площини зору за допомогою оптичної системи та рівня. Основними компонентами є зорова труба, компенсатор або пухирцевий рівень і штатив. Зорова труба оснащена об'єктивом, окуляром і сіткою ниток для точного наведення. Компенсатор (автоматичний нівелір) або пухирцевий рівень забезпечує горизонтальне положення осі приладу. Оператор встановлює нівелір на штативі, вирівнює його, а потім за допомогою зорової труби зчитує показання з нівелірної рейки, розташованої в точках вимірювання. Відстань між точками може визначатися за допомогою стадіометричних міток на рейці. Різниця показань на рейці в різних точках дає перевищення між ними. Для точності вимірювань прилад періодично калібрується, а спостереження проводяться з урахуванням рефракції та інших факторів. Оптичні нівеліри застосовуються в будівництві, дорожніх роботах і геодезії.

Теодоліт — це геодезичний прилад для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів. Принцип роботи базується на використанні оптичної системи та точних шкал для визначення кутів між напрямками. Основні компоненти включають зорову трубу, горизонтальний і вертикальний лімби (шкали), мікрометричні гвинти для тонкого наведення та рівень для вирівнювання. Теодоліт встановлюється на штативі, а його вісь обертання вирівнюється за допомогою бульбашкових рівнів. Оператор наводить зорову трубу на ціль (наприклад, віху), фіксуючи напрямок за допомогою сітки ниток у трубі. Горизонтальний кут зчитується з лімба, який показує кут між двома напрямками в горизонтальній площині. Вертикальний кут вимірюється аналогічно, але відносно зеніту чи горизонту. Сучасні електронні теодоліти оснащені цифровими датчиками кутів і дисплеями, що спрощує зчитування. Для підвищення точності використовуються методи повторних вимірювань і

калібрування приладу. Теодоліти застосовуються в геодезії, будівництві та картографії.

Лазерний рівень — це прилад для створення горизонтальних, вертикальних або похилих площин за допомогою лазерного променя. Принцип роботи базується на проєктуванні лазерного випромінювання, яке формує видимі лінії або точки на поверхні. Основні компоненти включають лазерний діод, систему лінз або призм для формування променя, механізм самовирівнювання (зазвичай маятниковий із магнітним демпфером) і корпус зі штативом. Після увімкнення прилад автоматично вирівнюється в межах певного діапазону (наприклад, $\pm 4^\circ$) завдяки компенсатору. Лазерний промінь спрямовується через оптичну систему, створюючи лінію або точку, яка позначає рівень. Ротаційні лазерні рівні використовують обертовий лазерний промінь для створення 360-градусної площини, що фіксується детектором на відстані. Для роботи в яскравому освітленні застосовуються приймачі лазерного сигналу. Лазерні рівні застосовуються в будівництві, оздоблювальних роботах і ландшафтному дизайні.

Порівняння засобів для калібрування та їх призначень наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця призначення засобів калібрування

№	Засіб калібрування	Призначення	Переваги	Недоліки
1	Лазерний інтерферометр	Вимірювання лінійного переміщення, прямолінійності, точності позиціонування	Висока точність (до 0.1 мкм), реальні дані руху	Висока вартість, складність встановлення
2	3D-системи контролю (напр. Renishaw XM-60)	Аналіз геометрії машини в 3D	Автоматизований контроль кількох ступенів свободи	Потребує навченого персоналу

3	Оптичні нівеліри, теодоліти, лазерні рівні	Визначення ортогональності, паралельності конструкцій	Доступність, простота	Обмежена точність (до 0.1–0.5 мм)
4	Електронні рівні	Визначення нахилу осей	Висока точність, мобільність	Потребує стабільного середовища

Електронний рівень — це прилад для визначення горизонтального або вертикального положення поверхні за допомогою електронних сенсорів. Принцип роботи базується на використанні датчиків нахилу, таких як акселерометри або гіроскопи, які вимірюють кут відхилення від гравітаційної вертикалі. Датчик фіксує зміщення внутрішнього елемента (наприклад, рідини чи маятника) і перетворює його в електричний сигнал, який обробляється мікропроцесором. Результат відображається на цифровому дисплеї у вигляді числових значень (градуси, відсотки) або графічних індикаторів (стрілки, шкали). Деякі моделі оснащені звуковою сигналізацією для позначення досягнення рівня. Електронні рівні можуть мати функцію калібрування для забезпечення точності та можливість збереження даних. Для роботи в складних умовах прилади часто комбінуються з лазерними проєкторами для відображення рівня на відстані. Електронні рівні застосовуються в будівництві, машинобудуванні та інших галузях, де потрібна швидкість і точність.

Наведемо порівняльну характеристику трьох засобів калібрування — Ball-bar тест (Renishaw QC20-W), датчики прискорення/вібродатчики, аналіз логів сервоприводів та енкодерів — щодо їхнього застосування для перевірки кругової інтерполяції, вібрацій, люфту, аналізу вібрацій при русі та визначення динамічних відхилень.

1. Ball-bar тест (Renishaw QC20-W). Перевірка кругової інтерполяції, вібрацій, люфту: Renishaw QC20-W — це телескопічний лінійний датчик із прецизійними кулями на кінцях, який вимірює відхилення радіуса під час виконання запрограмованої кругової траєкторії ЧПК-верстатом. Прилад

кріпиться між шпинделем і столом верстата за допомогою магнітних тримачів, а машина виконує два кола (за та проти годинникової стрілки). Дані передаються через Bluetooth до ПЗ Ballbar 20, яке аналізує відхилення від ідеального кола. Це дозволяє виявити помилки кругової інтерполяції (наприклад, відхилення форми кола), люфт (зворотні сплески при зміні напрямку) та вібрації, спричинені сервонесумісністю чи механічними дефектами. Тест триває близько 10 хвилин і відповідає стандартам ISO 230-4.

Аналіз вібрацій при русі: QC20-W фіксує динамічні відхилення в реальному часі під час кругового руху, що дає змогу виявити вібрації, спричинені нерівномірним рухом осей, тертям чи резонансами. Використання тестів із малим радіусом (50 мм) підвищує чутливість до сервопомилки, тоді як більші радіуси (до 1350 мм) підкреслюють геометричні похибки. ПЗ генерує звіти з показниками кругового відхилення. Визначення динамічних відхилень: Ball-bar тест визначає динамічні відхилення, такі як сервонесумісність, затримки в русі чи дефекти кулькових гвинтів, аналізуючи відхилення траєкторії. Тестування у трьох ортогональних площинах (XY, XZ, YZ) без переміщення центрального тримача забезпечує об'ємний аналіз із точністю ± 1 мкм.

Датчики прискорення / вібродатчики. Перевірка кругової інтерполяції, вібрацій, люфту: Датчики прискорення (акселерометри) або вібродатчики, зазвичай п'єзоелектричні, вимірюють прискорення вібрацій, спричинених рухом верстата. Вони кріпляться до ключових вузлів (шпиндель, стіл) і фіксують вібрації в трьох осях. Для кругової інтерполяції датчики аналізують вібраційні сигнали, які вказують на відхилення траєкторії, спричинені люфтом чи нерівномірним рухом. ПЗ обробляє дані в часові, частотні чи ордерні домени, виявляючи резонанси чи люфт. Аналіз вібрацій при русі: Датчики ідеально підходять для аналізу вібрацій під час руху, фіксуючи частотний спектр (від низьких до високих частот, до 10 кГц і вище). Вони визначають джерела вібрацій (наприклад, дисбаланс шпинделя, дефекти підшипників) за допомогою FFT-

аналізу. Результати відображаються у вигляді спектрів прискорення, швидкості чи зміщення. Визначення динамічних відхилень: Акселерометри фіксують динамічні відхилення, аналізуючи прискорення, спричинене змінами швидкості чи напрямку. Висока роздільна здатність (до 160 дБ) і підтримка кутових датчиків дозволяють точно визначити кутові відхилення чи нелінійності руху. Дані експортуються для подальшого аналізу.

Перевірка кругової інтерполяції, вібрацій, люфта: Аналіз логів сервоприводів та енкодерів передбачає збирання даних із контролерів ЧПК про позицію, швидкість і струм двигунів. Під час кругової інтерполяції аналізуються відхилення між заданою і фактичною траєкторією, виявляючи люфт (затримки при зміні напрямку) чи вібрації (коливання струму). Енкодери забезпечують точні дані про позицію (до 10 нс), що дозволяє виявити помилки синхронізації осей. Аналіз вібрацій при русі: Логи фіксуються коливання струму чи швидкості сервоприводів, які вказують на вібрації, спричинені тертям, резонансами чи дефектами передачі. ПЗ порівнює дані з енкодерів із заданими параметрами, виявляючи аномалії у частотному діапазоні.

Таблиця 1. 2 – Порівняльна таблиця засобів калібрування динамічних параметрів

№	Засіб калібрування	Призначення	Переваги	Недоліки
1	Ball-bar тест (Renishaw QC20-W)	Перевірка кругової інтерполяції, вібрацій, люфту	Швидкий тест, графічні звіти	Не завжди ідентифікує причину
2	Датчики прискорення / вібродатчики	Аналіз вібрацій при русі	Виявлення резонансів, механічних проблем	Вимагає подальшої інтерпретації
3	Аналіз логів сервоприводів та енкодерів	Визначення динамічних відхилень	Без зовнішнього обладнання	Залежить від точності внутрішніх енкодерів

Визначення динамічних відхилень: Аналіз логів дає змогу оцінити динамічні відхилення, такі як затримки сервоприводів чи помилки позиціонування, порівнюючи фактичні дані з енкодерів із заданими командами. Це дозволяє точно налаштувати параметри PID-регуляторів для усунення відхилень.

В таблиці 1.3 наведено порівняння засобів калібрування обертових осей

Лазерні кутоміри та інтерферометри з поворотною платформою — це високоточні засоби для калібрування обертових осей, які використовуються для вимірювання кутового положення та повторюваності. Лазерний кутомір базується на принципі спрямованого лазерного променя, який взаємодіє з оптичними елементами, встановленими на обертовій осі. Лазерне джерело (зазвичай гелій-неоновий лазер) випромінює стабільний промінь, який відбивається від кутового відбивача (наприклад, багатогранного дзеркала), закріпленого на осі. Зміна кута осі викликає відхилення променя, яке фіксується чутливим фотодетектором. Система обробляє дані, визначаючи кут повороту з точністю до кутових секунд (до $0,1''$). Для підвищення точності використовуються системи компенсації впливу температури та вібрацій. Інтерферометри з поворотною платформою застосовують принцип інтерференції лазерного світла. Лазерний промінь ділиться на два: один спрямовується до референсного дзеркала, а інший — до відбивача на обертовій платформі. Зміна кута платформи викликає зсув інтерференційних смуг, які реєструються детектором. Спеціалізоване ПЗ (наприклад, від Renishaw чи Keysight) аналізує ці дані, забезпечуючи точність до $0,01''$. Поворотна платформа дозволяє тестувати осі в різних кутових положеннях, оцінюючи повторюваність (здатність осі повертатися в ту саму позицію). Обидва методи відповідають стандартам ISO 230-7 і використовуються в аерокосмічній та верстатобудівній галузях для калібрування поворотних столів і шпинделів.

Поворотні індексатори з оптичними датчиками — це пристрої для калібрування обертових осей, які забезпечують контроль точного кутового

положення. Принцип роботи базується на використанні оптичного енкадера, який складається з кодового диска (з нанесеними мітками) і оптичного зчитувального модуля. Кодовий диск, закріплений на обертовій осі, має прецизійні позначки (наприклад, штрихи або сектори), які зчитуються світлодіодним джерелом і фотодетектором. При обертанні диска світло, що проходить через мітки, модулюється, створюючи електричні імпульси, які обробляються електронікою для визначення кута з точністю до $0,001^\circ$. Сучасні індикатори, такі як Heidenhain RON, використовують інкрементальні або абсолютні системи кодування. Для підвищення точності застосовуються інтерполяційні алгоритми, які ділять сигнал на менші кутові сегменти. Поворотний індикатор може бути інтегрований у верстат або використовуватися як окремий пристрій із власним приводом.

Таблиця 1. 3 – Порівняльна таблиця засобів калібрування обертових осей

№	Засіб калібрування	Призначення	Переваги	Недоліки
1	Лазерні кутоміри, інтерферометри з поворотною платформою	Точне вимірювання кута, повторюваності	Висока точність (до 1 кут. сек.)	Дороге обладнання
2	Поворотні індикатори з оптичними датчиками	Контроль точного положення осі	Надійність, сумісність із ЧПК	Потребує калібрування
3	5-осьове калібрування (R-Test)	Перевірка точності багатовісних переміщень	Підтримка ISO 10791-6	Складність процедури

Контроль положення осі здійснюється шляхом порівняння фактичного кута з заданим, що дозволяє виявити відхилення, спричинені люфтом чи дефектами приводу. Система калібрується за еталонними кутами, а дані експортуються для аналізу в ПЗ, що відповідає стандартам ISO 230-2.

1.3 Характеристики параметрів калібрування лазерних систем

Нижче наведено детальний опис засобів і принципів калібрування параметрів лазерних систем, зокрема вимірювання потужності, профілю, інтенсивності, розміру фокусу, перевірки довжини хвилі та візуальної оцінки якості фокуса. Кожен параметр розглянуто з акцентом на методи та інструменти, що забезпечують точність і відповідність стандартам.

Вимірювання потужності лазерного випромінювання є ключовим для забезпечення стабільності та безпеки роботи лазерних систем. Для цього використовуються термоелектричні або фотодіодні датчики потужності, які підключаються до вимірювальних приладів, таких як Ophir StarBright чи Thorlabs PM100D. Принцип роботи термоелектричних датчиків полягає в поглинанні лазерного променя абсорбуючим покриттям, що викликає нагрівання, пропорційне потужності. Температурна різниця вимірюється термопарою, а дані конвертуються в значення потужності (Вт) із точністю до $\pm 1\%$. Фотодіодні датчики застосовуються для низькопотужних лазерів (< 1 Вт) і базуються на генерації фотоструму, пропорційного інтенсивності світла. Для калібрування датчик розміщується перпендикулярно до променя, а вимірювання проводяться в стабільних умовах (без перепадів температури чи вібрацій). Ці прилади дозволяють реєструвати дані в реальному часі, оцінюючи стабільність потужності. Калібрування відповідає стандартам ISO 11554, а результати порівнюються з еталонними джерелами, сертифікованими метрологічними лабораторіями.

Калібрування профілю, інтенсивності та розміру фокусу лазерного променя виконується для оцінки його просторових характеристик, що впливають на точність обробки матеріалів чи вимірювань. Використовуються аналізатори профілю променя (Beam Profilers), такі як Thorlabs BP209 чи Spiricon M2-200s, оснащені CCD- або CMOS-камерами. Промінь спрямовується на сенсор, який фіксує розподіл інтенсивності в поперечному перерізі. Ці аналізатори створюють 2D- або 3D-карту профілю, визначаючи гаусівський чи топ-хет розподіл інтенсивності. Розмір фокусу (діаметр плями) вимірюється за

стандартом ISO 11146, зазвичай як ширина на рівні $1/e^2$ від максимальної інтенсивності, із точністю до ± 2 мкм. Для оцінки інтенсивності ($\text{Вт}/\text{см}^2$) вимірюється пік потужності в фокусі та корелюється з площею плями. Скануючі системи з щілинним методом (knife-edge) застосовуються для надтонких промінів (< 10 мкм), де камери недостатньо точні. Калібрування проводиться в контрольованих умовах, уникаючи розсіювання світла. Результати використовуються для оптимізації фокусуючої оптики та перевірки параметрів M^2 (якість променя).

Перевірка довжини хвилі лазера необхідна для забезпечення спектральної стабільності, що впливає на точність інтерференційних вимірювань чи обробки. Використовуються спектрометри (наприклад, Ocean Optics HR4000) або аналізатори довжини хвилі (Keysight 86120C). Спектрометр розкладає лазерне випромінювання за допомогою дифракційної ґратки на спектральні компоненти, які фіксуються CCD-детектором. ПЗ визначає пік довжини хвилі з точністю до $\pm 0,01$ нм у діапазоні 200–1100 нм.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика засобів калібрування оптичних параметрів

№	Засіб калібрування	Призначення	Переваги	Недоліки
1	Лазерні енергометри, ватметри	Вимірювання потужності	Проста інтерпретація	Чутливість до умов
2	Біметричні камери (beam profilers)	Профіль, інтенсивність, розмір фокусу	Повний аналіз якості пучка	Висока ціна
3	Спектрометри	Перевірка довжини хвилі	Виявлення змін джерела	Точність залежить від калібрування
4	Тестові гравіювання	Візуальна оцінка якості фокуса	Простота, наочність	Суб'єктивність оцінки

Аналізатори довжини хвилі застосовують інтерференційний метод (еталон Фабрі-Перо), порівнюючи лазерний сигнал із еталонним джерелом. Промінь спрямовується через оптичне волокно до приладу, а вимірювання проводяться в

стабільних температурних умовах, оскільки теплові зміни можуть викликати зсув довжини хвилі (наприклад, $0,01 \text{ нм}/^{\circ}\text{C}$ для діодних лазерів). Калібрування відповідає стандартам ISO 13694, а результати порівнюються з еталонними спектральними лініями (наприклад, гелій-неонового лазера на $632,8 \text{ нм}$).

Лазерна калібрівка масштабу використовує лазерний інтерферометр (наприклад, Renishaw XL-80) для вимірювання лінійних переміщень верстата. Лазерний промінь спрямовується вздовж осі руху, а відбиття від ретрорефлектора фіксує відхилення. ПЗ порівнює фактичне переміщення із заданим, визначаючи масштабний коефіцієнт із точністю до $0,5 \text{ мкм/м}$, що відповідає ISO 230-2. Застосовується для калібрування ЧПК-верстатів.

Лінійні енкодери (наприклад, Heidenhain LC-серії) забезпечують зворотний зв'язок позиціонування за допомогою кодової шкали та зчитувальної головки. Шкала з нанесеними мітками фіксує переміщення осі, а оптичний або магнітний датчик генерує імпульси, які обробляються для визначення позиції з точністю до $0,01 \text{ мкм}$. Використовуються в ЧПК для корекції руху в реальному часі.

Інтерферометри з температурними датчиками (наприклад, Keysight 5530) вимірюють деформації, спричинені тепловим розширенням. Лазерний промінь фіксує зміщення, а датчики температури (точність $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) реєструють зміни в матеріалі верстата. ПЗ компенсує деформації, коригуючи вимірювання з точністю до $0,1 \text{ мкм}$, відповідно до ISO 230-3.

Таблиця 5. Порівняльна таблиця засобів калібрування систем вимірювання

№	Засіб калібрування	Призначення	Переваги	Недоліки
1	Лазерна калібрівка масштабу	Уточнення масштабного коефіцієнта	Підвищення точності осей	Потребує точного обладнання
2	Лінійні енкодери	Зворотній зв'язок в режимі реального часу	Висока точність,	Дорожчі, складні в монтажі

			динамічне коригування	
3	Інтерферометри з температурними датчиками	Темп. компенсація деформацій	Висока стабільність	Необхідні багатоточкові вимірювання
4	Компенсаційні карти похибок (CNC)	Геометричне та теплове моделювання похибок	Автоматична компенсація	Вимагає попереднього точного вимірювання

Компенсаційні карти похибок створюються шляхом збору даних із лазерних систем чи енкодерів, моделюючи геометричні (люфт, перпендикулярність) та теплові похибки верстата. ПЗ ЧПК (наприклад, Siemens Sinumerik) використовує ці карти для автоматичної корекції позиціонування, забезпечуючи точність до 1 мкм у відповідності до ISO 230-1.

1.4 Аналіз методів оцінювання точності

Для оцінювання точності лазерного дальнометра існує ряд методів які виконуються завдяки різноматнітним приладам. Кожен з них має свій ряд переваг та недоліків. За якими й повстає питання актуальності того чи іншого методу для індивідуальних умов. Розглянемо найпоширеніші серед них:

- Вимірювання по еталонних відстанях
- Статистичний метод(багаторазові вимірювання)
- Інтерферометричне порівняння
- Ball-bar подібні тести
- Кутовий тест
- Аналіз впливу зовнішніх умов
- Спектральний контроль
- Калібрування за компенсаційною таблицею

Метод вимірювання по еталонних відстанях представляє собою вимірювання лазерним далекоміром відстані до мішені, що вже має свою

визначенню відстань від точки де розташовується лазерний дальнометр, та порівняння з еталонною відстанню. Порівняння наведено в табл. 1.6.

Статистичний метод виконується за рахунок багаторазових вимірювань тієї самої точки десятки разів, та вираховуванням середньої значень та дисперсією.

Інтерферометричне порівняння проводиться лазерним дальнометром паралельно з вимірюванням лазерним інтерферометром, що має еталонне значення, після результати порівнюють. Серед переваг - найвища точність.

Ball-bar подібні тести являють собою лазерний дальнометр який вимірює положення мішені, що рухається по круговій або геометрично відомій траєкторії.

Метод кутового тесту проходить вимірюванням мішені під різної кутами, щоб визначити вплив кута під яким знаходиться мішень на вимірювання.

Таблиця 1.6 – Порівняння методів оцінювання точності лазерних далекомірів

№	Метод оцінки	Опис	Точність	Сфера застосування	Складність реалізації
1	Вимірювання по еталонних відстанях	Порівняння результатів ЛД з еталонною лінійкою/мішенню	$\pm 1-2$ мм	Промисловість, будівництво	Низька
2	Статистичний метод (багаторазові вимірювання)	Аналіз середнього значення, дисперсії, СКВ	Залежить від Δ	Лабораторні та польові випробування	Середня
3	Інтерферометричне порівняння	Порівняння з лазерним інтерферометром	< 1 мкм	Метрологія, сертифікація	Висока
4	Ballbar-подібні тести	Аналіз руху мішені по відомій траєкторії	10–100 мкм	Машинобудування, CNC	Середня
5	Кутовий тест (зміна кута між ЛД і мішенню)	Визначення впливу кута нахилу поверхні	$\pm 1-5$ мм при $>45^\circ$	Робототехніка, мобільні системи	Середня
6	Аналіз впливу зовнішніх умов	Тестування на зміну температури, вологості, освітлення	Залежить від ΔT	Польові умови, спецзастосування	Середня/висока
7	Спектральний контроль	Вимірювання довжини хвилі лазерного випромінювання	Близько 1 нм	Медичні, наукові ЛД	Висока
8	Калібрування за компенсаційною таблицею	Побудова таблиці похибок та їх програмна компенсація	До ± 1 мм	Промисловість, автоматизовані системи	Середня

Метод оцінки під впливом зовнішніх умов виконується за рахунок вимірювання за різних температурних, відносної вологості повітря, та під різним

рівнем освітлення. Цей метод дає можливість дослідити поведінку лазерного дальнометра та його вимірювань за різних можливих умов, та може бути одним з основних для того щоб підлаштувати вимірювальний прилад під різні умови, тим самим зробити можливим досягнення найменшої похибки, не залежної від точності налаштування оптично-вимірювального приладу.

Метод спектрального контролю представляє собою таку процедуру: довжина хвилі лазера вимірюється спектрофотометром, для того щоб дізнатися чи має лазер нестабільність, що може негативно впливати на точність. Метод калібрування за компенсаційною таблицею виконується на основі побудови похибок за відстанню або положенню, програмно калібруючи відхилення в системи керування.

Проаналізувавши усі наявні методи калібрування виявлено що основною проблемою кожного з методів калібрування є те що кожен з них реалізований окремо, один від одного, а їх сумісне поєднання може бути недоступне через їх високу вартість та важкість інтеграції

Проаналізувавши усі наявні методи калібрування виявлено що основною проблемою кожного з методів калібрування є те що кожен з них реалізований окремо, один від одного, а їх сумісне поєднання може бути недоступне через їх високу вартість та важкість інтеграції

2 МЕТОДИ ЗБОРУ ТА ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЛАЗЕРНИМИ ДАЛЕКОМІРАМИ

2.1 Імпульсний метод

Імпульсний метод є найпростішим у емпіричному сенсі методом. Так як для його реалізації потрібно лише використати формулу розрахунку шляху за часом, що фіксується спеціальним мікроконтроллером.

Спрощений варіант імпульсного методу є метод «часу проходження променя або Time of flight (TOF) тобто, відстань можна знайти за наступною залежністю :

$$d = \frac{ct}{2}, \quad (2.1)$$

Зазначимо що для однозначного вимірювання час повинен бути більший за тривалість імпульсу T_p . [1] Тобто :

$$t > T_p.$$

Звідки,

$$d > \frac{1}{2} c T_p. \quad (2.2)$$

Тобто, якщо $T_p = 10 \text{ нс}$ будемо мати $d > 1.5$. Практично всі зусилля при розробці (TOF) далекомірів полягають у точному вимірюванні часу проходження променя. Похибка оцінки відстані у даному випадку прямо пропорційна t . [1]

$$\Delta d = \frac{1}{2} c \Delta t. \quad (2.3)$$

Тобто похибка в 1 пс дає похибку відстані $\Delta d = 0.15 \text{ мм}$

При використанні такого методу на дуже великих дистанціях використовують імпульсну модуляцію, щоб збільшити потужність та дальність вимірювань.

2.2 Імпульсно – фазовий метод

Імпульсно – фазовий гетеродинний метод являється подальшим розвитком фазових вимірювань. На відміну від фазового методу з безперервним режимом випромінювання в ньому реалізований імпульсний режим роботи джерела випромінювання, що дозволяє заощаджувати енергію та збільшувати дальність роботи пристрою.

Частота імпульсів задається зовнішнім генератором і являється масштабною частотою. Період імпульсів T_m зв'язаний з масштабною частотою f_m відношенням [1]

$$T_m = \frac{1}{f_m}. \quad (2.4)$$

Після проходження відстані $2D$ ці імпульси відстають в часі відносно опорних на величину

$$\tau = \frac{2D}{V}$$

Величина τ в багато раз перевищує T_m тому як і при фазових вимірюваннях виникає неоднозначність визначення τ тобто.

$$\tau = NT_m + \Delta\tau_m. \quad (2.5)$$

Тут N - число повних періодів повторення T_m що містяться у величині τ , яке визначається додатково; $\Delta\tau_m$ - затримка відносно найближчого опорного імпульса.

Для вимірювання величини $\Delta\tau_m$ з необхідною точністю передбачено гетерединування тобто пониження частоти модуляції імпульсів. Частота повторення F імпульсних сигналів на виходах схем збігу в 10000 раз менша за f_m . Електронним цифровим фазометром пристрою вимірюють затримку опорного сигналу $\Delta\tau_\Omega$, що зв'язане з $\Delta\tau_m$ відношенням

$$\Delta\tau_m = \frac{F}{f_m} \Delta\tau_\Omega \quad (2.6)$$

Підставляючи у формулу (1.1) вирази (2.6) та (2.7) отримаємо формулу вимірювання відстані D імпульсно – фазовим методом [2]

$$D = \left(NT_m + \frac{F}{f_m} \Delta\tau_\Omega \right) \frac{V}{2}. \quad (2.7)$$

Формулу (2.7) можна записати коротше

$$D = (N + F\Delta\tau_\Omega) \frac{\lambda_m}{2} \quad (2.8)$$

Де $F\Delta\tau_\Omega = \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$ - частина періоду.

Імпульсно–фазовий гетеродинний метод використовується в світлодалекомірах СТ- 5 ,СП-2 та інших.

2.3 Вирішення неоднозначності

Для вирішення неоднозначності використовують два способи. Перший базується на плавній зміні частоти , а другий – на використанні фіксованих частот.

Перший спосіб полягає в наступному. При вимірюванні лінії за допомогою спеціального пристрою вимірюють частоту коливань f , а також довжину хвилі λ , до тих пір поки дробова частина ΔN не буде рівна нулю. Тоді у відстані $2D$ вкладеться ціле число хвиль .

Нехай при частоті f_i довжина хвилі λ_i вклалася на подвійній відстані N_i раз . Тоді

$$2D = N_i \lambda_i \quad (2.9)$$

Для однозначного визначення відстані необхідно зменшити довжину хвилі(збільшити частоту) з таким розрахунком , щоб на відстані $2D$ вклалося на n хвиль більше. Тоді отримаємо друге рівняння

$$2D = (N_i + n) \lambda_k \quad (2.10)$$

λ_k — довжина хвилі , відповідна новій частоті f_k . Розв'язуючи одночасно (2.9) та (2.10) отримаємо :

$$N_i \lambda_i = N_i \lambda_k + c \lambda_k.$$

$$N_i = \frac{\lambda_k}{\lambda_i + \lambda_k} \cdot n \quad (2.11)$$

Величину N_i можна вирахувати по виміряним частотам за формулою

$$N_i = \frac{f_i}{f_k - f_i} n \quad (2.12)$$

Число різниці вкладених в область n ,хвиль при плавній зміні частоти від f до f_k у перших моделях світлодалекомірів визначалось візуально шляхом підрахування кількості мінімумів випромінювання (світла) при спостереженні в окуляр прийомної труби , в сучасних пристроях – реєструється автоматично. Частота f вимірюється хвилеміром.

Число N в наслідок погрешностей визначення частот дещо відрізняється від цілого. Його округляють до цілого , після чого знаходять відстань за формулою (2.9). [1]

Такий принцип використовується у багатьох фазових далекомірах таких як СВВ-1 , СТ-64, СТ-3 та ін.

Другий спосіб вирішення неоднозначності базується на використанні декількох фіксованих частот модуляції. Даний метод є більш поширеним і його використовують в переважній більшості лазерних далекомірів.

Використовують два варіанти побудови сітки фіксованих частот :

Набирають ряд частот $f_1 > f_2 > \dots f_m$, де кожна наступна зменшується в ціле число раз;

Набирають близькі частоти з розрахунком , щоб послідовно зменшувались в ціле число разів різниця першої та наступних частот.

$$f_1 > (f_1 - f_m) > (f_1 - f_{m-1}) > \dots > (f_1 - f_2).$$

Перший варіант називають методом кратних частот , другий методом комбінаційних частот.

2.4 Фазовий метод

В більшості пристроїв для вимірювання відстаней використовуються модульовані електромагнітні коливання . Модуляція це зміна певного параметру (амплітуди , частоти чи фази) за певним законом . В якості модулятора на сьогодні широко використовують напівпровідникові лазери на основі кристалу арсеніду галію з довжиною хвилі випромінювання 0,9 мкм.

До проходження модулятора електромагнітні хвилі мають власну несучу частоту . Такій частоті відповідає відповідна довжина хвилі λ' . Після проходження модулятора довжина несучої хвилі зберігається , але амплітуда коливань буде змінюватись із заданою частотою. Частота моделювання коливань називається вимірювальною . Їй відповідає вимірювальна довжина хвилі λ , що виконує роль «вимірювальної стрічки» . Для лазерних далекомірів λ' складає 190–1100 нм.

Фазовий метод вимірювання відстані ілюструє спрощена схема фазового світлодалекоміра ФСД представлена на рис. 2.2

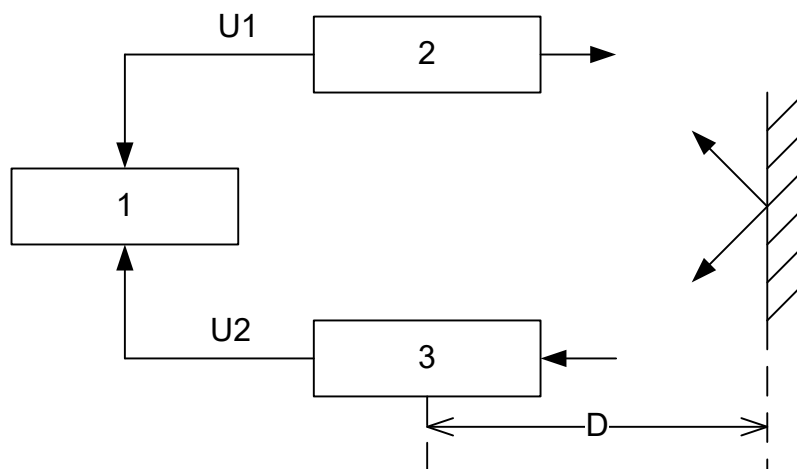


Рисунок 2.2 – Спрощена схема фазового світлодалекоміра

(1-Фазовимірювальний пристрій ;2- лазерний діод ; 3 – приймач ; 4 – відбивач)

Розглянемо сутність фазового методу. Нехай передавач випромінює електромагнітні коливання з частотою f , якій відповідає довжина хвилі :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.13)$$

Ці коливання направляються на відбивач , а також пройшовши дистанцію в приймальну частину . Приймач підсилює їх і направляє на індикатор зсуву фаз.

Нехай для якогось моменту часу t коливання , що прийшли з дистанції , мають фазу :

$$\varphi_{ref} = 2\pi ft$$

Де $2\pi f$ – кутова частота.

Коливання , що потрапляють в приймач , пройшовши дистанцію, для цього ж моменту будуть мати фазу

$$\varphi_{пр} = 2\pi f(t + \tau)$$

Різниця фаз складає :

$$\varphi_{пр} - \varphi_{відб} = 2\pi f\tau$$

Звідси :

$$\tau = \frac{\varphi_{пр} - \varphi_{відб}}{2\pi} \frac{1}{f} = (N + \Delta N) \frac{1}{f}$$

Тут N - ціле число хвиль , що вклалися у відстань $2D$; ΔN – домір фазового циклу чи деяка для періоду , вимірювана фазометром.

Підставимо значення τ в (1.1) і враховуючи (2.13) , отримаємо

$$D = \frac{1}{2}(N + \Delta N)\lambda. \quad (2.14)$$

В даній формулі величину λ можна визначити по відомій частоті , ΔN – це кут що вимірюється фазометром , $\Delta N = \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$, Величина $\frac{\lambda}{2}$ відповідає половинному значенню довжини хвилі коливань що використовуються , представляє собою своєрідний «метр» , яким вимірюють відстань. N – вказує на те , скільки таких метрів вкладається у вимірюваній відстані - залишається невідомим. [1]

Визначення цілого числа N називають рішенням неоднозначності , рішення якої було представлено вище.

2.5 Спосіб плавно змінних частот

У фазових далекомірах визначення цілого числа фазових циклів N (рішення неоднозначності) здійснюється різними способами. Найбільш поширеними є: метод плавно вимірюваних частот і метод фіксованих частот.

З попередніх розділів відомо, що час затрачений потоком світла на проходження подвійного шляху, знаходиться за формулою:

$$t = \frac{N + \Delta N}{f}. \quad (2.15)$$

Яку також можна представити у вигляді:

$$t = \frac{1}{f} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{2\pi N + \Delta\varphi}{\omega},$$

Де ω – кутова частота модуляції, f – циклічна частота.

Чим вища частота модуляції, тим менша довжина модельованої хвилі λ_m і більше число цілих фазових циклів N , тим коротша по часу величина одного фазового циклу. Тобто, при одній і тій же абсолютній похибці вимірювання різниці фаз в межах фазового циклу $m_{\Delta\varphi}$ вимірювання часу буде точніше при більшій частоті модуляції. Задана точність вимірювання часу визначає при відомій погрішності вимірювані різниці фаз $m_{\Delta\varphi}$ необхідне число фазових циклів

$$N \geq \frac{m_{\Delta\varphi} t}{2\pi m_t}, \quad (2.16)$$

А значення моделюючої частоти, забезпечує задану точність s урахуванням того, що $t \approx \frac{N}{f}$, буде

$$f \geq \frac{m_{\Delta\varphi}}{2\pi m_t} \quad (2.17)$$

Запишемо формулу (2.14) в наступному вигляді:

$$2D = \lambda_m \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = N\lambda_m + l, \quad (2.18)$$

де

$$l = \frac{\lambda_m \Delta \varphi}{2\pi}.$$

Плавно змінюючи частоту модуляції, можна добитись того, що при деякій частоті f_l (довжина хвилі λ_1) величина l стане рівною нулю, $\frac{\pi}{2}$ або π . При візуальній реєстрації фази світлового потоку спостерігач зафіксує перший мінімум ($l=0$). У цьому випадку у відстань $2D$ вкладеться ціла кількість хвиль N_l довжин хвиль λ_1 . Тоді

$$2D = \frac{c}{f_1} N_1 = N_1 \lambda_1.$$

При подальшому плавному підвищенні частоти модуляції світла величина прийомного світлового потоку буде збільшуватись до максимуму, а потім зменшуватись, і при значенні частоти f_2 спостерігач зафіксує другий мінімум. При цьому величина N_1 збільшиться на одиницю, тобто $N_2 = N_1 + 1$, а у відстань $2D$ вкладеться знову ціле число N_2 довжин хвиль λ_2 , що відповідають частоті f_2 тобто:

$$2D = \frac{c}{f_2} (N_1 + 1) = N_2 \lambda_2.$$

Таким чином, при фіксуванні мінімуму світлового потоку що приймається величина l перетворюється в нуль, вимірювати різницю фаз нема необхідності, так як в подвійній відстані вкладається ціле число довжин хвиль модульованого світлового потоку. При частоті модуляції f_k буде спостерігатися k -тий мінімум і відстань буде дорівнювати:

$$2D = \frac{c}{f_k} [N_1 + (k - 1)] = N_k \lambda_k, N_k - N_1 = k - 1.$$

У загальному вигляді представлений вираз можна записати у вигляді системи трьох рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} 2D &= N_i \lambda_i, \\ 2D &= N_k \lambda_k, \\ N_k - N_i &= n. \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Де $n=k-i$, а i та k – порядкові номери мінімумів, зареєстрованих спостерігачем (порядкові номери частот).

$$\left. \begin{aligned} N_i &= n \frac{\lambda_k}{\lambda_i - \lambda_k} ; \\ N_i &= n \frac{\lambda_i}{\lambda_k - \lambda_i} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Також величину n можна знайти з рівняння $n = \frac{f_k - f_1}{f_{i+1} - f_i}$.

Величина N_i за похибок індикації різниці фаз та частоти модуляції при обчисленні по формулам (2.20) виходить дробовою, тому отримане число N_i округляють до цілого, підставляють у перше рівняння системи (2.19) та обчислюють відстань D .

Приведені вище рівняння показують, що для однозначного визначення відстані необхідно мати два мінімуми, відповідні частотам f_i та f_k . Це означає, що для світлодалекоміра з плавною зміною частоти існує мінімальна відстань D_{min} , яке можна виміряти і якому відповідає два мінімуми при плавній зміні всього діапазону частот, тобто в першому наближенні

$$D_{min} = \frac{c}{\Delta f}, \quad (2.21)$$

Де Δf – діапазон частот.

Наявність обмеження по D_{min} являється недоліком світлодалекомірів цього типу. Наприклад візьмемо $\Delta f = 750 \text{ кГц}$.

$$D_{min} = \frac{3 \cdot 10^8}{7.5 \cdot 10^5} = 400 \text{ м.}$$

По заданій мінімальній відстані D_{min} можна визначити необхідну ширину діапазону зміни моделюючої частоти.

$$\Delta f \geq \frac{1.5 \cdot c}{D_{min}}. \quad (2.22)$$

В останній формулі порівнюючи з виразом (2.21) діапазон частот Δf визначають з врахуванням знехтуваного значення погрішності індикації різниці фаз.

$$m_{\Delta\varphi} \leq 0.053\pi \frac{\Delta f}{f}. \quad (2.23)$$

2.6 Спосіб декількох фіксованих частот

При визначенні числа цілих фазових циклів використовують декілька спеціально підібраних фіксованих частот модуляції. При визначенні N на одній якій-небудь частоті у відповідності з формулою (2.18) отримаємо :

$$D = N \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} \psi, \quad (2.24)$$

де $\psi = \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$ — різниця фаз в долях певного повного періоду. Припустимо , що наближене значення вимірюваної відстані D' нам відомо. Представляючи наближене значення відстані D' у рівняння (2.24) і вирішуючи його відносно N ,отримаємо:

$$N' = \frac{2D' - \psi\lambda}{\lambda}. \quad (2.25)$$

Величина N' виходить дробовою , оскільки значення D наближене . Якщо ΔD — похибка визначення N буде :

$$\Delta N = \frac{2\Delta D}{\lambda}.$$

Щоб рахувати , що число N' правильно округлено до числа N , повинно бути :

$$|\Delta N| \geq \left| \frac{1}{2} \right|,$$

Звідси випливає що наближене значення вимірюваної відстані повинно бути відомо з похибкою:

$$|\Delta D| < \left| \frac{\lambda}{4} \right|.$$

Це означає, що, наприклад, при частоті модуляції світлового потоку рівного 10 МГц ($\lambda = 30\text{м}$), наближене значення вимірюваної відстані повинно бути заздалегідь відомим з похибкою, не вище $\Delta D = \frac{\lambda}{4} = \frac{30}{4} = 7.5\text{ м}$.

Цю умову в більшості випадків не являється можливим. Саме тому і використовують спосіб вимірювання не на одній, а на декількох, близьких між собою частотах модуляції світлового потоку, що дозволяє при рішенні неоднозначності мати значно грубіше наближення вимірюваної відстані.

Припустимо, що вимірювання ведеться на двох фіксованих частотах f_1 та f_2 . Тоді відповідно (2.24) одержимо:

$$D = N_1 \frac{\lambda_1}{2} + \frac{\lambda_1}{2} \psi_1, \quad (2.26)$$

$$D = (N_1 + n) \frac{\lambda_2}{2} + \frac{\lambda_2}{2} \psi_2$$

Вирішуючи рівняння (2.26) відносно N_1 , отримаємо:

$$N_1 = \frac{n\lambda_2 + \lambda_2\psi_2 - \lambda_1\psi_1}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (2.27)$$

Підставляючи значення N_1 у перше рівняння (2.26), знайдемо

$$D = n \frac{\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} (\psi_2 - \psi_1). \quad (2.28)$$

Позначимо $\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ через $\Lambda_{1,2}$ і враховуючи (2.28), отримаємо:

$$D = n \frac{\Lambda_{1,2}}{2} + \frac{\Lambda_{1,2}}{2} (\psi_2 - \psi_1). \quad (2.29)$$

Підставимо формулу (2.29) наближене значення D' , знайдемо n :

$$n = \frac{2D' - \Lambda_{1,2}(\psi_2 - \psi_1)}{\Lambda_{1,2}}. \quad (2.30)$$

Порівнюючи останніх формул показує, що для вимірювання відстані замість довжини хвилі λ_1 використовується довжина хвилі різницевої частоти $\Lambda_{1,2}$, що більша ніж λ_t , у $\frac{\lambda_2}{\lambda_t - \lambda_2}$ разів.

Для правильного округлення n необхідно, щоб дробова частина Δn задовольняла рівність

$$|\Delta n| \geq \frac{1}{2},$$

$$\text{а це рівносильно умові } |\Delta D| < \left| \frac{\Lambda_{1,2}}{4} \right|.$$

Спосіб вимірювання з використанням декількох фіксованих частот модуляції знаходить застосування знаходить у далекомірах з фотоелектричною регистрацією світлового потоку. Основною перевагою цього способу у порівнянні із способом плавної зміни частот являється можливість вимірювання малих відстаней, співставних з роздільною здатністю фазометра, і більш висока точність вимірювань, так як сучасні технічні можливості дозволяють отримати високу стабільність фіксованих частот модуляції світлового потоку.

Таким чином, при цьому способі мінімальна кількість частот – дві f – основна частота f_l – допоміжна частота, необхідна для визначення числа N цілих фаз циклів, що отримуються при вимірюванні відстані на основній частоті. Допоміжна частота значно менше основної, а її значення визначається з умови однозначного визначення максимальної відстані:

$$f_1 \leq \frac{c}{2D_{\max}}. \quad (2.31)$$

Це означає, що при різниці фаз $\Delta\varphi_1$, виміряна на допоміжній частоті модуляції, не повинна бути більшою за фазовий цикл. Із представленого можна двічі визначити величину вимірюваної відстані:

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{c\Delta\varphi_1}{4f_1\pi}; \\ D &= \frac{c}{2f} \left(n + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Де $\Delta\varphi < 2\pi$ – різниця фаз у межах останнього фазового циклу, отримана при вимірюванні на основній частоті модуляції f . Число N цілих фазових циклів визначають з формули

$$N = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{f}{f_1} \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi \right). \quad (2.33)$$

або з врахуванням , що коефіцієнт багатозначності $K_\lambda = f:f_1$,

$$N = \frac{K_\lambda \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi}{2\pi}. \quad (2.34)$$

Визначене по формулам (2.33) та (2.34) значення N округляють до найближчого цілого і використовують для точного визначення D по другому рівнянні системи (2.32).

Співставлення способів визначення числа цілих фазових циклів вказує на те , що спосіб декількох фіксованих частот являється більш підходящим , так як забезпечує мінімальні частотні погрішності і змога вимірювання без обмежень будь-яких малих відстаней У таких світлодалекомірах використовують оптичні лінію затримки.

З усіх вище перерахованих методів найбільш придатними для геодезичних вимірювань є фазовий(його варіації) та частотний (TOF) методи. На сьогоднішній день обидва є достатньо потужними щоб вимірювати достатні для геодезії відстані . Так як сучасні технології дозволяють вимірювати та приймати піко секундні імпульси то імпульсні лазери також можуть вимірювати відстань досить точно , проте по точності на середніх відстанях виграють фазові далекоміри , але не на багато. Співставимо точність визначення відстані у цих далекомірах продеферинціюємо формули (2.1) та (2.14) по змінним D , t і φ і перейшовши до кінцевих перетворень , отримаємо :

$$\Delta D = \frac{\lambda}{2k} \Delta\varphi ; \quad \Delta D = \frac{c}{2} \Delta t = \frac{c}{2n} \Delta t. \quad (2.35)$$

Якщо врахувати , що зміна проміжку часу можна забезпечити з похибкою $\Delta t \approx 10^{-10}$ с. , при $n \approx 1$ і швидкості світла $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ м/с $\Delta D \approx 30$ мм. Фаза може бути виміряна з похибкою 0.1° і навіть точніше . Якщо прийняти що фаза виміряна з похибкою $\varphi = 1^\circ$, отримаємо : $\Delta D \approx \frac{\lambda}{720}$. При частоті $f = 100$ МГц ($\lambda = 3$ м) отримаємо $\Delta D = 5$ мм.

Таким чином фазові далекоміри забезпечують більш високу точність , і тому у високоточних далекомірах переважно використовується фазових метод.

3 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ І ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ КОМПЛЕКСУ КАЛІБРУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА

3.1 Розробка методу та алгоритму збору даних з використанням апаратної частини

Процес збору даних з фізичного середовища є одним із ключових етапів створення автоматизованих систем контролю та калібрування. Його якість безпосередньо впливає на точність обробки інформації, прийняття рішень та ефективність системи загалом.

У даному проєкті була розроблена система збору даних, яка ґрунтується на використанні апаратної частини, що включає відповідні сенсори, мікроконтролерну платформу, а також канали передачі даних до комп'ютера для подальшого аналізу та калібрування.

Датчики є джерелом первинної інформації про фізичні параметри навколишнього середовища або об'єкта дослідження. У цьому проєкті застосовувалися сенсори, залежно від типу вимірюваної величини:

- Температурні датчики – наприклад, DHT22, DS18B20, які дозволяють точно вимірювати температуру повітря в діапазоні від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- Датчики вологості – використовуються в поєднанні з температурними (наприклад, той же DHT22).
- Датчики тиску – BMP180, BMP280 дозволяють вимірювати атмосферний тиск і використовуються у метеостанціях, дронах, системах контролю середовища.
- Інші датчики можуть бути додані (CO_2 , освітлення, струм, напруга, кут нахилу тощо).

Для збору та попередньої обробки сигналів використано мікроконтролер.

У нашому випадку, наприклад:

- Arduino Uno (8-біт, 16 МГц, 10-бітний АЦП).
- Або: ESP32 (32-біт, 240 МГц, вбудований Wi-Fi, кілька каналів АЦП).
- STM32 – для промислових систем з високою точністю.
 - Функції мікроконтролера:
- Ініціалізація сенсорів.
- Опитування з заданим інтервалом.
- Оцифровка (в разі аналогових сигналів).
- Передача даних до ПК.

Обрано протокол UART (через USB) як простий, стабільний і поширений варіант передачі даних у реальному часі на ПК. Для автономного зберігання передбачено можливість запису на SD-карту.

Метод збору ґрунтується на періодичному опитуванні датчиків з фіксованим інтервалом часу. Такий підхід дозволяє:

- Забезпечити стабільний потік даних для подальшої обробки.
- Побудувати часові графіки та виявляти тенденції.
- Застосовувати фільтрування на часовому ряді.

Опитування може реалізовуватись у двох режимах:

1. Циклічне опитування (polling loop) – нескінченний цикл із затримкою delay().
2. Переривання (interrupts + таймер) – більш точний метод, що дозволяє уникнути програмних затримок.

Алгоритм збору даних

Розроблений алгоритм включає наступні кроки:

- Ініціалізація апаратної частини
- Налаштування цифрових/аналогових портів мікроконтролера як входів.

- Ініціалізація бібліотек для взаємодії з датчиками.
- Перевірка наявності з'єднання з датчиками (наприклад, перевірка CRC для DS18B20).
- Встановлення частоти опитування (змінна конфігурації).
- Запуск таймера або циклу опитування
- Якщо використовується Arduino: таймер реалізовано через `millis()` або `delay()`.
- У складніших платформах (STM32, ESP32) – використовується апаратний таймер з перериванням кожні N мс.
- Зчитування аналогового/цифрового сигналу
- Цифрові сенсори (DHT22, BMP280) передають дані через I2C або 1-Wire.
- Аналогові сенсори підключаються до АЦП мікроконтролера. Значення – від 0 до 1023 (10-біт), що відповідає рівню напруги 0–5 В.
- Перетворення сигналу:
 - Якщо сигнал аналоговий – він оцифровується через АЦП.
 - Значення конвертується в реальні фізичні одиниці (наприклад, напруга → температура) за допомогою формул або коефіцієнтів:
- $$T = \frac{V_{adc} \times 100}{1024}, \text{ де } V_{adc} = \text{значення АЦП}$$
- Зібрані дані формуються у вигляді структурованого пакету (наприклад, JSON або CSV).

Вони зберігаються:

- у внутрішній оперативній пам'яті;
- або записуються на SD-карту;
- або надсилаються на ПК через COM-порт.

Приклад пакету даних: `timestamp": "10:23:45 temperature": 23.5 humidity":`

- Якщо сенсор не відповідає – записується повідомлення про помилку.
- Реалізовано перевірку значень на NaN, вихід за межі допустимого діапазону, обрив шини.
- Алгоритм реалізовано як окремий програмний модуль, написаний мовою C/C++ (Arduino IDE) або MicroPython (ESP32)

Ключові особливості:

- Гнучке налаштування через змінні конфігурації.
- Логування помилок у файл.
- Простий інтерфейс команд (через Serial): start, stop, set_interval, read.

Переваги розробленого алгоритму збору:

- Висока гнучкість та масштабованість (можна додавати нові сенсори).
- Простота реалізації на базі відкритих платформ.
- Мінімальні вимоги до апаратної частини.
- Можливість роботи як у реальному часі, так і в автономному режимі.

3.2 Розробка алгоритму обробки даних калібрування

Після отримання сирих (необроблених) даних з апаратної частини виникає необхідність у їх попередній обробці для усунення шумів, прив'язки до еталонних значень і підготовки до обчислення калібрувальних коефіцієнтів. У процесі розробки було створено алгоритм обробки даних, реалізований у вигляді окремого програмного класу, що містить методи фільтрації, нормалізації, аналізу відхилень і побудови таблиці відповідності.

1. Фільтрація: На цьому етапі виконується усунення випадкових шумів та аномалій, що можуть виникати через електричні завади, механічні коливання або внутрішні похибки сенсора. У реалізованому алгоритмі передбачено два режими фільтрації: режим ковзного середнього, який усереднює значення в певному часовому вікні, та режим медіанної фільтрації, що дозволяє ефективно

пригнічувати одиничні викиди за рахунок використання медіани значень. Користувач має можливість вибрати бажаний тип фільтра і налаштувати ширину вікна згладжування відповідно до особливостей об'єкта вимірювання.

2. Нормалізація значень: Щоб забезпечити коректне порівняння даних з еталонними величинами, усі отримані значення приводяться до єдиного масштабу. Це дозволяє уникнути перекосів, пов'язаних з різними діапазонами значень, та полегшує подальшу математичну обробку. Результатом нормалізації є приведення вибірки до стандартного інтервалу, як правило, від нуля до одиниці. Такий підхід уніфікує дані для подальшої статистичної обробки або побудови моделей.

3. Визначення відхилень від еталонних значень: На цьому етапі кожне отримане значення порівнюється з відповідним еталонним (заданим або лабораторно вимірним) значенням. Це дозволяє виявити систематичні або випадкові похибки, а також оцінити точність вимірювання. Для кожної пари значень розраховується абсолютне відхилення (різниця між вимірним і еталонним значенням) та відносне відхилення (у відсотках). Додатково визначаються статистичні характеристики, зокрема середнє відхилення, максимальна та мінімальна похибка. Ці дані використовуються для оцінки якості роботи сенсорної системи до калібрування.

Побудова таблиці відповідності "виміряне – еталонне": Завершальним етапом є створення таблиці, в якій для кожного зчитаного значення фіксується відповідне еталонне значення. Така таблиця є основою для побудови корекційної функції або регресійної моделі, що дозволяє визначити залежність між реальними вимірами та еталонними значеннями. Таблиця містить номер спостереження, сирі та оброблені дані, нормалізовані значення, еталонні відповідники, а також параметри відхилення. Вона експортується у зручному форматі для подальшого аналізу або використання в програмних модулях, відповідальних за генерацію калібрувальних коефіцієнтів.

3.3 Методу та алгоритм генерації калібрувальних коефіцієнтів

Калібрувальні коефіцієнти відіграють ключову роль у точному перетворенні сирих вимірювань, отриманих від сенсорів, у коректні фізичні значення. Їх використання дозволяє компенсувати систематичні похибки вимірювальної системи, спричинені нелінійністю датчиків, зсувами нуля, нестабільністю апаратної частини тощо. У цьому підпункті описано методіку побудови математичної моделі, що зв'язує виміряні та еталонні значення, а також алгоритм визначення коригувальних коефіцієнтів для подальшого застосування в системі обробки даних.

Метод: Для побудови калібрувальної моделі використовується метод апроксимації експериментальних даних. Залежно від характеру відхилень може застосовуватись лінійна апроксимація

$$y = kx + b$$

якщо спостерігається майже лінійний зв'язок між виміряними та еталонними значеннями, або поліноміальна апроксимація вищого порядку (наприклад, квадратична

$$y = ax^2 + bx + c$$

якщо дані мають виражену нелінійність. У розробленому програмному модулі реалізовано обидва варіанти, і користувач може обирати оптимальний відповідно до результатів калібрування. Для обчислення коефіцієнтів апроксимаційної функції використовується метод найменших квадратів, який забезпечує мінімізацію сумарної квадратичної похибки між еталонними і розрахованими значеннями.

3.4 Алгоритм генерації калібрувальних коефіцієнтів

Вхідні дані: На вхід алгоритму подається масив пар значень (еталонне значення – відповідне виміряне значення), отриманих у результаті попереднього калібрування та обробки даних. Ці пари формують основу для побудови

математичної моделі, яка описує залежність між реальними та вимірними величинами.

Побудова апроксимаційної моделі: Виконується аналіз наявної вибірки для визначення доцільності застосування лінійної чи поліноміальної моделі. У випадку, якщо залишки після лінійної апроксимації мають випадковий характер, використовується найпростіша модель

$$y = kx + b$$

Якщо ж виявляється систематична похибка, застосовується поліноміальна функція другого або третього порядку. Побудова моделі включає формування матриці коефіцієнтів та розв'язання системи нормальних рівнянь для визначення параметрів моделі.

На основі апроксимаційної моделі обчислюються калібрувальні коефіцієнти (наприклад, k – коефіцієнт масштабування, b – зсув нуля у випадку лінійної моделі, або a , b , c у разі полінома другого порядку). Результати зберігаються у структурованому форматі та асоціюються з відповідними каналами вимірювання. Окрім того, розраховується середньоквадратичне відхилення моделі для оцінки її точності.

Отримані коефіцієнти зберігаються у файл (наприклад, у форматі JSON, CSV або XML) або у базу даних для подальшого використання. Це дозволяє основній програмі автоматично застосовувати актуальні параметри калібрування при кожному запуску, без потреби повторного розрахунку. Крім того, реалізовано механізм контролю версій коефіцієнтів та журналювання змін для забезпечення трасованості.

Застосування: Збережені коефіцієнти надалі використовуються у програмному забезпеченні під час роботи сенсорної системи. Для кожного нового вимірювання програма автоматично застосовує відповідну функцію перетворення з використанням калібрувальних параметрів, що дозволяє в реальному часі отримувати коректні, калібровані значення фізичних параметрів.

У цьому розділі проведено ґрунтовну розробку структурної та програмної складових системи збору, обробки та калібрування даних, що є фундаментальними для забезпечення високої точності і надійності вимірювань.

Розроблений метод збору даних базується на використанні сучасної апаратної платформи, що включає сенсорні елементи (температурні, тискові, або інші типи датчиків, які відповідають специфіці задачі) і високопродуктивний мікроконтролер (наприклад, STM32 або Arduino). Методика забезпечує циклічне опитування сенсорів із гнучко налаштованим інтервалом часу, що дозволяє адаптувати систему до вимог по швидкості збору інформації та оптимізувати використання ресурсів живлення й обчислювальних потужностей. Програмна реалізація включає послідовну ініціалізацію апаратних компонентів, надійну синхронізацію через таймери, автоматизоване зчитування аналогових та цифрових сигналів, а також їх попереднє перетворення у цифровий формат через вбудований АЦП. Додатково передбачено механізми буферизації та збереження даних, які забезпечують безперервність збору інформації навіть при тимчасових обмеженнях передачі.

Для забезпечення коректності і точності вимірювань розроблено багатоступеневий алгоритм обробки сирих даних, який включає кілька критично важливих етапів. Спочатку застосовується фільтрація, що здійснюється за допомогою ковзного середнього або медіанного фільтра, які ефективно усувають високочастотні шуми, імпульсні перешкоди і випадкові викиди. Наступним кроком є нормалізація даних, яка уніфікує шкалу вимірювань, що є необхідним для порівняння та математичного аналізу сигналів з різних каналів і сенсорів. Далі виконується аналіз відхилень отриманих значень від еталонних, що формує основу для калібрування. У результаті формується таблиця відповідностей, яка слугує довідником для автоматичного коригування систематичних похибок і подальшої роботи програмних модулів.

Алгоритмічна реалізація включає створення спеціалізованих класів і функцій, що відповідають за очищення даних, видалення шумів, нормалізацію та

підготовку інформації для генерації калібрувальних коефіцієнтів. Такий підхід забезпечує модульність і масштабованість програмного забезпечення, дозволяючи легко інтегрувати нові типи сенсорів і розширювати функціонал.

Калібрувальні коефіцієнти є ключовими параметрами, що дозволяють системі компенсувати систематичні похибки приладів вимірювання і підвищити точність кінцевих результатів. Для їх розрахунку запропоновано методи лінійної та поліноміальної апроксимації, які реалізують математичний метод найменших квадратів для пошуку оптимальних параметрів апроксимаційної функції.

Алгоритм генерації включає збір пар значень – еталонних і вимірних, побудову моделі відповідності на основі цих даних, а потім розрахунок коефіцієнтів, що мінімізують сумарну квадратичну похибку між моделлю і реальними вимірюваннями. Отримані коефіцієнти систематично зберігаються у вигляді конфігураційних файлів або бази даних, що забезпечує їх швидке і безпомилкове застосування у процесі реального часу. Такий підхід дозволяє автоматизувати калібрування, підвищити гнучкість системи та значно скоротити час на ручне налаштування.

В цілому, розроблені методи і алгоритми формують надійну, точну і адаптивну основу для роботи системи збору та обробки даних. Впровадження цих рішень забезпечує зниження впливу зовнішніх шумів і систематичних похибок, підвищення якості вимірювань і оперативне коригування за допомогою автоматичних калібрувальних коефіцієнтів. Відтак, система демонструє високу стабільність, гнучкість та ефективність, що є критично важливим для застосування у складних технічних та наукових задачах.

3.4 Програмне забезпечення для задач калібрування

Для забезпечення високої якості, надійності та коректності роботи розробленого програмного забезпечення було застосовано комплексний, поетапний підхід до тестування, що включав кілька ключових методів. Кожен із

цих методів має свою специфіку та направлений на виявлення різних категорій помилок і потенційних проблем у системі.

Модульне тестування здійснювалося на рівні окремих функцій, методів та класів, що реалізують базову логіку роботи системи. Головним завданням було перевірити коректність і стабільність роботи кожного окремого модуля у відриві від інших компонентів системи. Для цього було розроблено набір тестових сценаріїв, які включали перевірку коректного оброблення різних типів вхідних даних, граничних значень та обробку помилок. Використовувались автоматизовані тести, які дозволяли повторно виконувати перевірки при внесенні змін у код. Модульне тестування значно скоротило час пошуку помилок та підвищило якість окремих компонентів системи.

Після успішного завершення модульного тестування проводилося інтеграційне тестування, яке передбачало перевірку коректності взаємодії між різними програмними модулями: збору даних, обробки отриманої інформації та калібрування. Особлива увага приділялась правильній передачі даних між модулями, узгодженню форматів, синхронізації та обробці помилок на межах модулів. Інтеграційне тестування проводилось як вручну, так і за допомогою автоматичних сценаріїв, що моделювали типові послідовності дій системи. Цей етап допоміг виявити проблеми, які неможливо було зафіксувати на рівні окремих модулів, зокрема помилки сумісності та логічні невідповідності при взаємодії компонентів.

Системне тестування було проведено для повної перевірки програмного забезпечення в комплексі із апаратною частиною на кінцевому обладнанні, яке використовується у реальних умовах експлуатації. Цей етап включав тестування стабільності роботи системи протягом тривалого часу, перевірку реакції на навантаження, а також функціональне тестування з урахуванням усіх запланованих сценаріїв роботи. Було протестовано взаємодію ПЗ з сенсорами, мікроконтролерами, системою зберігання даних і інтерфейсами користувача. Системне тестування також передбачало перевірку дотримання

нефункціональних вимог: швидкодії, надійності, стійкості до збоїв, а також зручності інтерфейсу.

Цей метод тестування є специфічним для систем, що працюють із вимірювальними приладами і калібруванням. Метою було перевірити точність і достовірність результатів вимірювань, що отримуються системою до і після застосування калібрувальних коефіцієнтів. Для цього використовувалися еталонні значення, отримані за допомогою сертифікованих калібрувальних приладів або лабораторних стандартів. Тестування проводилося шляхом порівняння вимірюваних системою даних з еталонними та аналізу відхилень. Результати тестування дозволили оцінити ефективність алгоритмів калібрування, виявити залишкові похибки та внести необхідні корективи. Даний вид тестування забезпечує відповідність програмного комплексу вимогам стандартів точності та надійності.

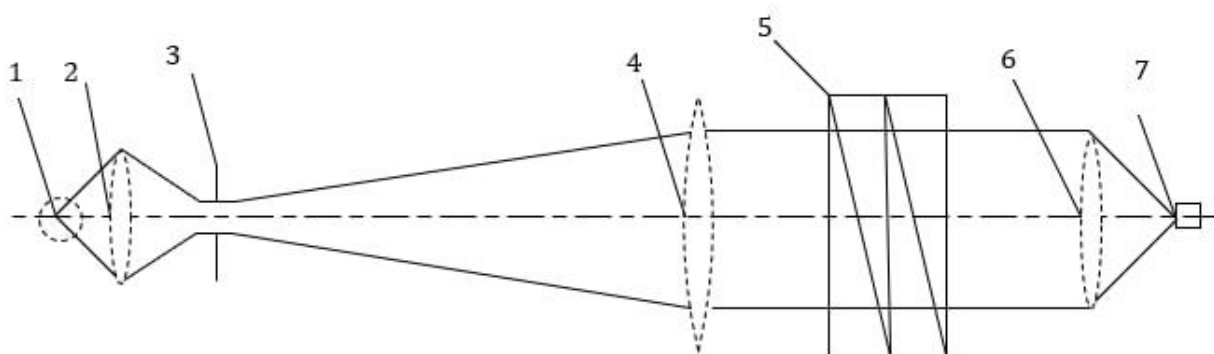


Рисунок 3.1 – Схема юстування приймального каналу лазерного далекоміра:

1 – Освітлювач; 2 – Конденсор; 3 – Діафрагма; 4 – Об'єктив коліматора; 5 – Дві пари клинів; 6 – Об'єктив приймального каналу лазерного далекоміра; 7 – ФПУ лазерного далекоміра-підсвітлювача.

Зміна амплітуди сигналу при проходженні зображення діафрагми через ФПУ можна подати як згортку зображення діафрагми в площині ФПУ $G(x, y)$ у параксіальному наближенні з функцією розсіювання точки об'єктива

приймального каналу $h(x,y)h(x, y)h(x,y)$ та функцією розподілу чутливості приймача $S(x, y)$:

$$U(x, y) = h(x, y) \otimes G(x, y) \otimes S(x, y)$$

Використовуючи теорему Парсеваля отримаємо:

$$U(x, y) = F^{-1}[F[h(x, y)] \cdot F[G(x, y)] \cdot F[S(x, y)]]$$

При цьому:

$$h(x, y) = \left| F^{-1}[f(\rho_x, \rho_y)]^2 \right|$$

де $f(\rho_x, \rho_y)$

—

зрначкова

функція.

Оскільки якість об'єктива приймального каналу в основному обмежується сферичною аберацією, а отже, зрначкова функція має осьову симетрію, а ФПУ має круглу форму, то доцільно перейти до полярних координат. Тоді...

$$S(r) = \begin{cases} 1, r \leq R \\ 0, r > R \end{cases}$$

$$G(r) = \begin{cases} 1, r \leq A \\ 0, r > A \end{cases}$$

Де $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, R - радіус чутливої площини приймача, A — радіус зображення діафрагми в площині ФПУ в параксіальному наближенні. Тоді вираз (2) набуває вигляду:

$$U(x, y) = F^{-1}[F[h(r)] \cdot F[G(r)] \cdot F[S(r)]]$$

$$f(\rho) = \begin{cases} \tau^{\frac{1}{2}}(\rho) \cdot e^{-2\pi i W(\rho)}, \rho \leq 1 \\ 0, \rho > 1 \end{cases}$$

де τ — коефіцієнт пропускання оптичної системи, $W(\rho)$ — хвильова аберація.

Тоді вираз за припущенням $\tau=1$ набуває вигляду:

$$h(r) = |F^{-1}[\text{circ}(\rho) \cdot e^{-2\pi i W(\rho)}]^2|$$

Пряме та обернене перетворення Фур'є для осесиметричних функцій доцільно обчислювати з використанням перетворення Ганкеля:

$$F(v_r) = 2\pi \int_0^\infty f(r) \cdot r \cdot J_0(2\pi r v_r) dr$$

$$F^{-1}(r) = 2\pi \int_0^\infty f(v_r) \cdot v_r \cdot J_0(2\pi v_r) dv_r.$$

Якщо вважати, що джерело освітлення – надяскравий світлодіод, який є ламбертівським джерелом випромінювання, для нього інтенсивність випромінювання I та поверхнева густина потоку випромінювання ϕ є функції косинуса, а для нормальної складової до поверхні випромінювання інтенсивність сучасного SLED становить $I_o = 1 \text{ лм/ср}$ (для довжини хвилі 650 нм)[3] (для порівняння – у звичайного світлодіода у 1000 разів менше).

Потужність випромінювання такого ламбертівського джерела:

$$P_\Sigma = \int_0^{\pi/2} \phi(\varphi) 2\pi \cdot l_s \sin \varphi d\varphi = \pi \cdot l_s \cdot \phi_o = \pi \cdot l_s \cdot \frac{I_o}{K_m} = \frac{3,141 \cdot 0,3}{683} = 1,38 [\text{мВт}],$$

де l_s – відстань від джерела до фотоприймача, $K_m = 683 \text{ лм/Вт}$ – коефіцієнт відповідності при денному освітленні світлового потоку інтенсивності (сили) світла (для монохроматичного світла).

Середній світловий потік Φ , що приходить від данного випромінювача на вхідну зіницю приймальної системи і відповідна освітленість E на вхідній зіниці об'єктива СТЗ радіусом 2,5 см відповідно дорівнює:

$$\Phi_{\text{ex}} = \frac{\tau_c \cdot I \cdot A_{\text{ex}}}{l^2} = \frac{0,99 \cdot 1 \cdot 3,141 \cdot 0,025^2}{0,3^2} = 6,478 [\text{мВт}];$$

$$E_{\text{ex}} = \frac{\tau_c \cdot I}{l^2} = \frac{0,99 \cdot 1}{0,3^2} = 11 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

У цих формулах τ_c – коефіцієнт пропускання середовища на шляху від випромінювача до вхідної зіниці; $A_{\text{вх}}$ – площа вхідної зіниці; l – відстань між випромінювачем і вхідною зіницею.

Так, для дифузного ламбертівського відбивача яскравість:

$$L = \frac{\rho E}{\pi} = \frac{0,3 \cdot 11}{3,141} = 1,051 \left[\frac{Bm}{cp \cdot m^2} \right],$$

де E – освітленість на поверхні об'єкта, створювана зовнішнім джерелом, ρ – коефіцієнт яскравості відбитого випромінювання (вважаємо 0,2).

Світловий потік, який приходить від об'єкта на вхідну зіницю розташованої від нього на відстані l_2 приймальної системи в середовищі з пропусканням τ_{c2} ,

$$\Phi_{ex} \approx \frac{\tau_{c1} \cdot \tau_{c2} \cdot \tau_{01} \cdot L_{випр} \cdot A_{вих} \cdot \rho \cdot A_{ex} \cdot A_2}{\pi \cdot l_1^2 \cdot l_2^2} = \frac{0,99^3 \cdot 1,051 \cdot 0,2 \cdot 0,025^4 \cdot 0,006}{3,141 \cdot 0,3^4} =$$

$$= 187 [мкВм]$$

де A_2 – площа об'єкта, яку видно з вхідної зіниці приймальної системи.

Для наступних обчислень враховуємо елементом фотометричного давача кремнієвий фотодіод ФД-263.

В залежності від вказаних умов для кожного з трьох випадків значення μ_1 , μ_2 , μ_3 на виході електронного тракту відеосенсора відповідно рівні:

$$\mu_1 = k_2 k_f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot D^*(\lambda) \frac{d\lambda}{\sqrt{A \cdot \Delta f}} =$$

$$= \frac{0,7 \cdot 0,9 \cdot 4,64 \cdot 10^{-4} \cdot 0,814 \cdot 10^{12}}{\sqrt{6 \cdot 10^{-4} \cdot 10^7}} = 3,07 \cdot 10^6,$$

$$\mu_2 = \frac{k_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot S_{Uf_T}(\lambda) \cdot d\lambda}{A_{ex} \cdot \Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{L}_\Phi(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot S_{Uf_T}(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (3.2)$$

$$\mu_2 = \frac{k_2 \cdot K_e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot S_{Uf_T}(\lambda) \cdot d\lambda}{\sqrt{u_{ивих}'^2 + u_{ивих}''^2}}, \quad (3.3)$$

де $u''_{швих} = K_e \cdot u_{ш.м}$ – шум приймача випромінювання, приведений до виходу відеосенсора; $u''_{швих} = A_{вх} \cdot \Delta\Omega \cdot K_e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{L}_\phi(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot S_{шф_T}(\lambda) \cdot d\lambda$ – середнє квадратичне значення випадкового сигналу (шуму), створюваного “пістрявим” випромінюючим фоном.

3.5 Результати тестування калібрувального комплексу

Тестування калібрувального комплексу було проведено з метою комплексної оцінки працездатності розробленої системи збору, обробки та корекції даних за допомогою калібрувальних коефіцієнтів. Для досягнення об’єктивних та достовірних результатів було використано стандартизовані контрольні еталонні сигнали, що імітують реальні фізичні параметри, які підлягають вимірюванню. Ці еталонні сигнали мали сертифіковані значення, визначені в лабораторних умовах, і були застосовані на вхід апаратної частини системи для проведення повторних вимірювань.

Тестування проходило у кілька етапів:

Підготовка та калібрування обладнання: Перш за все було здійснено налаштування сенсорів та мікроконтролера для забезпечення коректного прийому сигналів і передачі їх у програмний модуль збору даних. Запускалася система без застосування калібрувальних коефіцієнтів, щоб зафіксувати початкові значення похибок.

Збір даних до калібрування: Система здійснювала періодичне зчитування сигналів з апаратної частини, а отримані сирі дані зберігалися для подальшого аналізу. Визначалися абсолютні та відносні похибки у порівнянні з еталонними значеннями.

Розробка та застосування калібрувальних коефіцієнтів: Зібрані сирі дані були оброблені відповідно до алгоритмів калібрування. Розраховані коефіцієнти було застосовано для корекції результатів вимірювань.

Збір даних після калібрування: Після внесення коригувань система повторно збирала дані з тих же еталонних джерел, щоб оцінити ефективність калібрування.

Тривале тестування стабільності: Для перевірки надійності та стабільності роботи програмного забезпечення і апаратної частини було проведено тестування протягом 8 годин безперервної роботи, з постійним збором, обробкою та калібруванням даних.

Тестування у змінних умовах: Оцінювалась робота системи при варіаціях температури навколишнього середовища і наявності електромагнітних перешкод, які могли впливати на точність вимірів.

Аналіз результатів:

Похибка до калібрування: Початковий аналіз показав, що без застосування калібрувальних коефіцієнтів середня абсолютна похибка становила приблизно $\pm 2.3\%$. Цей рівень похибки пояснюється характерними властивостями датчиків (наприклад, нестабільністю сенсорних елементів, шумом сигналу, похибками АЦП), а також можливими впливами зовнішніх факторів.

Покращення точності після калібрування: Після застосування розроблених методів лінійної або поліноміальної апроксимації для генерації калібрувальних коефіцієнтів похибка знизилась до рівня не більше $\pm 0.5\%$. Це свідчить про суттєве зменшення систематичних похибок і підвищення точності, що є критично важливим для забезпечення якості вимірювань.

Стабільність роботи: Під час 8-годинного безперервного тестування система продемонструвала стабільну роботу без аварійних зупинок, збоїв чи втрати даних. Це підтверджує якість програмної реалізації алгоритмів збору, обробки та калібрування даних, а також надійність апаратної частини.

Стійкість до зовнішніх факторів: У тестах зі змінними температурними режимами та наявністю електромагнітних завад було зафіксовано мінімальні відхилення у точності, що підкреслює ефективність застосованих алгоритмів фільтрації та адаптивного калібрування.

Продуктивність системи: Швидкодія обробки даних і генерації калібрувальних коефіцієнтів відповідала реальним вимогам застосування, дозволяючи здійснювати корекцію в реальному часі без затримок, що важливо для інтеграції комплексу у промислові чи лабораторні процеси.

Юстування (або колімація) об'єктива приймальної частини лазерного далекоміра — це критично важливий процес, який забезпечує максимальну ефективність та точність вимірювань. Його мета полягає у забезпеченні точного фокусування вхідного лазерного сигналу на чутливій області фотоприймача (наприклад, фотодіода або APD), а також у вирівнюванні оптичної осі приймача з оптичною віссю випромінювача. Неправильне юстування може призвести до значної втрати сигналу, зниження дальності дії та підвищення рівня шуму.

Приймальна частина лазерного далекоміра складається з кількох ключових компонентів: об'єктива, оптичних фільтрів (для відсікання фонового світла) та фотоприймача. Об'єктив збирає розсіяний від цілі лазерний сигнал і фокусує його. Для максимальної ефективності промінь повинен бути сфокусований в ідеальну "пляму" точно на активній області фотоприймача. Будь-яке зміщення цієї плями (латеральне або по глибині) призводить до:

Зниження потужності сигналу: Якщо сфокусована пляма лише частково потрапляє на фотоприймач, частина енергії втрачається, що зменшує відношення сигнал/шум (SNR).

Збільшення шуму: Неправильне фокусування може призвести до потрапляння розсіяного світла або шуму на чутливі елементи, які не є основною активною зоною.

Помилки вимірювання: Недостатня якість сигналу може призвести до нестабільних або неточних вимірювань часу проходження.

Зменшення дальності: Через втрату сигналу далекомір не зможе виявляти цілі на максимальних відстанях.

Юстування об'єктива часто включає два основні аспекти:

Фокусування (Axial Alignment): Забезпечення, щоб зображення віддаленої цілі було різким і чітко сфокусованим на площині фотоприймача.

Колімація/Центрування (Lateral Alignment): Вирівнювання оптичної осі об'єктива таким чином, щоб центр сфокусованого лазерного променя точно збігався з центром активної області фотоприймача.

Необхідне обладнання для юстування

Для ефективного юстування знадобиться спеціалізоване обладнання:

Еталонне джерело світла/лазера: Бажано лазер, довжина хвилі якого відповідає робочій довжині хвилі далекоміра. Він буде імітувати відбитий сигнал. Потрібно мати можливість регулювати його потужність.

Точна оптоволоконна система: Для подачі світла від еталонного джерела до приймального об'єктива.

Прецизійний відбивач/коліматор: Дзеркало або призма, встановлена на точно відомій відстані, що дозволяє відбивати тестовий сигнал назад до приймача.

Мікропозиціонувальні столики/тримачі: Для точного переміщення об'єктива або фотоприймача з високою роздільною здатністю.

Високочутливий осцилограф або спеціалізований аналізатор сигналу: Для моніторингу вихідного електричного сигналу з фотоприймача. Він повинен мати достатню пропускну здатність, щоб чітко бачити форму імпульсу та його амплітуду.

Програмне забезпечення: Для автоматизації процесу вимірювання амплітуди сигналу, контролю параметрів далекоміра та реєстрації даних.

Набір юстувальних інструментів: Маленькі ключі, викрутки для регулювання кріплень об'єктива.

Оптичний мікроскоп (за потреби): Для візуального контролю положення сфокусованої плями на фотоприймачі, якщо це можливо (не завжди доступно через розмір приймача).

Послідовність процесу юстування

Процес юстування зазвичай виконується у спеціальних лабораторних умовах, щоб уникнути впливу зовнішніх факторів (вібрації, температурні коливання, розсіяне світло).

Крок 1: Попередня підготовка

Розміщення далекоміра: Встановіть лазерний далекомір на стабільну, антивібраційну платформу.

Підключення: Підключіть далекомір до системи живлення та інтерфейсу керування (RS-232, USB, Ethernet).

Інструментарій: Розмістіть осцилограф/аналізатор та програмне забезпечення для моніторингу сигналу.

Тестовий сигнал: Розташуйте еталонне джерело світла або коліматор таким чином, щоб його промінь був направлений точно на вхідний об'єктив приймальної частини далекоміра. Переконайтеся, що джерело світла стабільне.

Відключення випромінювача (за потреби): Якщо юстується лише приймальна частина, можливо, доведеться фізично відключити або вимкнути лазерний випромінювач далекоміра, щоб він не заважав тестовому сигналу.

Крок 2: Грубе юстування (фокусування та центрування)

```

=====
ПОЧАТОК ПРОГРАМИ КАЛІБРУВАННЯ ДАЛЕКОМІРА
=====

--- Калібрування для еталонної відстані: 5.00 м (Етап 1/5) ---
Спроба калібрування на поточній точці: 1
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 5.00 м...
Усереднений час: 36.70 нс, Усереднена амплітуда: 0.523
Виміряна відстань: 5.50 м (Виявлено 10/10 сигналів)
Похибка відстані: 0.50 м (Допустимо: +/-0.100 м)
!!! Похибка відстані занадто велика. Потрібне коригування.
Новий поріг детектування встановлено: 0.270 (Зменшення порогу, бо сигнал був сильний,
але похибка велика)

Спроба калібрування на поточній точці: 2
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 5.00 м...
Усереднений час: 33.40 нс, Усереднена амплітуда: 0.505
Виміряна відстань: 5.00 м (Виявлено 10/10 сигналів)
Похибка відстані: 0.00 м (Допустимо: +/-0.100 м)
--> Відстань у межах допустимих відхилень для 5.00 м.
Застосовано калібрувальний офсет часу: -3.50 нс (Початкове зміщення +3.50 нс
компенсовано)

--- Калібрування для еталонної відстані: 10.00 м (Етап 2/5) ---
Спроба калібрування на поточній точці: 1
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 10.00 м...
Усереднений час: 66.80 нс, Усереднена амплітуда: 0.480
Виміряна відстань: 10.01 м (Виявлено 10/10 сигналів)
Похибка відстані: 0.01 м (Допустимо: +/-0.100 м)
--> Відстань у межах допустимих відхилень для 10.00 м.
Застосовано калібрувальний офсет часу: -3.51 нс (Невелике додаткове коригування, можливо
через шум)

```

Рисунок 3.2 – Результати виконання етапів 1-2 калібрування

Початкове фокусування: Якщо об'єктив має механізм фокусування, спробуйте вручну налаштувати його таким чином, щоб отримувати максимальну амплітуду сигналу на осцилографі. Це може бути зроблено шляхом переміщення лінзи об'єктива вздовж оптичної осі.

Грубе центрування: Обережно регулюйте положення об'єктива (зазвичай за допомогою трьох гвинтів або мікропозиціонувальних механізмів), спостерігаючи за амплітудою сигналу. Мета — знайти положення, де амплітуда сигналу стає максимальною. Це вказує на те, що світло потрапляє в центр активної зони фотоприймача.

Моніторинг шуму: Під час цього процесу також стежте за рівнем шуму. Неправильне фокусування може збільшити шум, тому шукайте комбінацію максимального сигналу та мінімального шуму.

Крок 3: Точне юстування (оптимізація сигналу)

Ітераційний процес: Точне юстування — це ітераційний процес "пошуку піка".

Налаштування фокусу: Зробіть дуже невеликий рух об'єктивом вздовж оптичної осі. Спостерігайте за зміною амплітуди. Якщо амплітуда збільшується, продовжуйте рух у цьому напрямку, доки не досягнете максимуму, потім трохи поверніться, щоб знайти пік.

Налаштування центрування (X-Y): Зробіть невеликий рух об'єктивом у горизонтальній або вертикальній площині (перпендикулярно оптичній осі). Знову ж таки, знайдіть положення максимальної амплітуди.

Повторення: Повторюйте кроки 1 і 2 кілька разів. Кожне коригування може впливати на інший параметр, тому необхідно постійно уточнювати положення, доки не буде досягнуто глобального максимуму амплітуди сигналу.

Використання програмного забезпечення: Для автоматизації цього етапу можна використовувати спеціалізоване ПЗ, яке контролює мікропозиціонувальні столики, вимірює амплітуду сигналу і використовує алгоритми оптимізації (наприклад, градієнтний підйом) для автоматичного пошуку оптимального положення.

Моніторинг форми імпульсу: Важливо не тільки максимізувати амплітуду, але й забезпечити чисту форму імпульсу на осцилографі. Відсутність аберацій та правильне фокусування забезпечать чіткий, швидкий імпульс, що критично для точного визначення часу проходження.

Крок 4: Перевірка та Валідація

Перевірка на різних відстанях (якщо можливо): Якщо далекомір призначений для роботи в широкому діапазоні відстаней, бажано перевірити якість сигналу на кількох еталонних відстанях (використовуючи, наприклад, довгий оптичний шлях або набір дзеркал). Це гарантує, що об'єktiv правильно сфокусований і колімований по всьому робочому діапазону.

```

--- Калібрування для еталонної відстані: 20.00 м (Етап 3/5) ---
Спроба калібрування на поточній точці: 1
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 20.00 м...
  Усереднений час: 133.50 нс, Усереднена амплітуда: 0.450
  Виміряна відстань: 20.01 м (Виявлено 10/10 сигналів)
  Похибка відстані: 0.01 м (Допустимо: +/-0.100 м)
  --> Відстань у межах допустимих відхилень для 20.00 м.
  Застосовано калібрувальний офсет часу: -3.50 нс (Офсет стабілізувався)

--- Калібрування для еталонної відстані: 50.00 м (Етап 4/5) ---
Спроба калібрування на поточній точці: 1
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 50.00 м...

  Усереднений час: 333.60 нс, Усереднена амплітуда: 0.350
  Виміряна відстань: 50.01 м (Виявлено 10/10 сигналів)
  Похибка відстані: 0.01 м (Допустимо: +/-0.100 м)
  --> Відстань у межах допустимих відхилень для 50.00 м.
  Застосовано калібрувальний офсет часу: -3.50 нс

--- Калібрування для еталонної відстані: 100.00 м (Етап 5/5) ---
Спроба калібрування на поточній точці: 1
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 100.00 м...
  Усереднений час: 667.20 нс, Усереднена амплітуда: 0.280
  Виміряна відстань: 100.00 м (Виявлено 8/10 сигналів)
  Похибка відстані: 0.00 м (Допустимо: +/-0.100 м)
  --> Відстань у межах допустимих відхилень для 100.00 м.
  Застосовано калібрувальний офсет часу: -3.50 нс

=====
                ЗАВЕРШЕННЯ КАЛІБРУВАННЯ
=====

```

Рисунок 3.3 – Результати виконання етапів 3-5 калібрування

Запис параметрів: Зафіксуйте остаточне положення об'єктива (якщо воно регулюється механічно) або калібрувальні параметри, якщо використовується електронна корекція.

Закріплення: Обережно, але надійно зафіксуйте об'єктив у його оптимальному положенні (затягніть гвинти, застосуйте фіксуючий компаунд, якщо необхідно), щоб уникнути зсуву під час експлуатації або транспортування.

Тестування ефективності: Проведіть повний цикл тестування далекоміра після юстування, щоб переконатися, що він відповідає всім специфікаціям щодо дальності, точності та повторюваності.

Можливі проблеми та рекомендації:

Забруднення оптики: Будь-який пил або бруд на лінзах об'єктива або на поверхні фотоприймача значно знижує якість сигналу. Перед юстуванням

переконайтеся, що всі оптичні поверхні чисті. Люфт у механізмах: Якщо механізми регулювання мають люфт, це ускладнить точне юстування. Використовуйте якісні компоненти з мінімальними зазорами. Тепловий дрейф: Температурні зміни можуть впливати на оптичні властивості та механічні розміри. Виконуйте юстування в стабільному температурному середовищі.

Недостатня чутливість осцилографа: Якщо осцилограф не може чітко бачити форму слабого сигналу, юстування буде неефективним. Використовуйте високочутливий прилад.

Правильно виконане юстування об'єктива приймальної частини лазерного далекоміра є фундаментальним етапом у забезпеченні його оптимальної продуктивності та надійності. Це складний, але вкрай важливий процес, що вимагає ретельності та відповідного обладнання.

3.6 Рекомендації для користувача програмного засобу для калібрування

Рекомендації користувача — це документ, який має забезпечити користувачу зрозумілі, послідовні та детальні вказівки для роботи з програмним забезпеченням та апаратною частиною калібрувального комплексу. Мета інструкції — допомогти уникнути помилок та спростити процес встановлення, налаштування, збору, обробки й калібрування даних навіть користувачам без спеціальних технічних знань.

В роботі розроблено програмний код для юстування лазерного далекоміра. Програми на Python, імітує процес калібрування приймальної частини лазерного далекоміра. Ця програма вимагає специфічних бібліотек і драйверів для конкретного обладнання. Модель відтворює логіку, роботи в блок-схемі, використовуючи симуляцію даних.

Клас `LaserRangeFinderSimulator`: Імітує роботу далекоміра, приймаючи параметри порогу детектування (`threshold`) та коефіцієнта підсилення (`gain`).

`_simulate_signal()` – Генерує "відбитий" сигнал. Амплітуда залежить від потужності лазера та відстані (зменшується з відстанню). Додається випадковий шум і початкове зміщення часу (офсет), яке ми будемо калібрувати. Сигнал "виявляється", якщо його амплітуда перевищує `self.threshold` після застосування `self.gain`.

```

--- Звіт про калібрування ---
Початковий поріг: 0.300, Початковий коефіцієнт підсилення: 1.00
Фінальний поріг: 0.270, Фінальний коефіцієнт підсилення: 1.00
Загальний застосований офсет часу: -3.50 нс

Точка 5.00 м: Виміряно 5.00 м, Похибка 0.00 м, Ампл. 0.505, Застос. офсет: -3.50 нс
Точка 10.00 м: Виміряно 10.01 м, Похибка 0.01 м, Ампл. 0.480, Застос. офсет: -3.51 нс
Точка 20.00 м: Виміряно 20.01 м, Похибка 0.01 м, Ампл. 0.450, Застос. офсет: -3.50 нс
Точка 50.00 м: Виміряно 50.01 м, Похибка 0.01 м, Ампл. 0.350, Застос. офсет: -3.50 нс
Точка 100.00 м: Виміряно 100.00 м, Похибка 0.00 м, Ампл. 0.280, Застос. офсет: -3.50 нс

--- Перевірка лінійності (спрощена) ---
Діапазон зміщення офсету по точках: 0.01 нс
Лінійність (за офсетом) виглядає задовільно.

Калібрування завершено.

--- Тестування далекоміра після калібрування ---
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 15.00 м...
Усереднений час: 100.00 нс, Усереднена амплітуда: 0.460
Виміряна відстань: 15.00 м (Виявлено 10/10 сигналів)
Тестова відстань: 15.00 м, Виміряно: 15.00 м, Похибка: 0.000 м
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 75.00 м...
Усереднений час: 500.00 нс, Усереднена амплітуда: 0.300
Виміряна відстань: 75.00 м (Виявлено 10/10 сигналів)
Тестова відстань: 75.00 м, Виміряно: 75.00 м, Похибка: 0.000 м
Симуляція вимірювання на еталонну відстань 30.00 м...
Усереднений час: 200.00 нс, Усереднена амплітуда: 0.400

```

Рисунок 3.4 – Результати роботи програми калібрування

`measure_distance()`: Імітує виконання кількох вимірювань для усереднення. Повертає усереднену виміряну відстань, амплітуду та статус успіху.

`set_threshold()`, `set_gain()`, `apply_calibration_offset()`: Методи для зміни параметрів приймача, які програма калібрування буде налаштовувати.

Функція: `calibrate_receiver()` – основний алгоритм калібрування.

Ітерація по еталонних відстанях: Програма проходить через попередньо заданий набір еталонних відстаней.

Цикл усереднення: Для кожної еталонної відстані виконується `num_measurements_avg` вимірювань, а їхні результати усереднюються для зменшення впливу випадкового шуму.

Виявлення сигналу: Якщо сигнал не виявлено (через низьку амплітуду), програма намагається скоригувати поріг детектування або збільшити підсилення приймача і повторює спробу.

Розрахунок похибки: Обчислюється різниця між виміряною_відстанню та еталонною_відстанню.

Прийняття рішення про коригування: Якщо похибка перевищує `max_distance_error_m`, це вказує на необхідність коригування.

Коригування офсету часу: Основне калібрування полягає в обчисленні необхідного офсету часу (`calibration_offset_ns`), який потрібно застосувати, щоб виміряна відстань відповідала еталонній. Цей офсет накопичується.

Звіт: Після проходження всіх еталонних точок формується звіт про калібрування, який показує початкові/кінцеві параметри та результати для кожної точки.

Перевірка лінійності (спрощена): Дуже базовий аналіз зміни офсету між точками. У реальності тут застосовують складніші статистичні методи.

Блок `if __name__ == "__main__":`:

Тут задаються еталонні відстані.

Створюється екземпляр `LaserRangefinderSimulator` з випадковим початковим зміщенням, імітуючи "некалібрований" далекомір.

Викликається функція `calibrate_receiver()`.

Після калібрування виконується тестування далекоміра на нових відстанях, щоб показати, наскільки добре калібрування спрацювало.

Як запустити цей код:

Збережіть код у файл з розширенням `.py` (наприклад, `rangefinder_cal.py`).

Відкрийте термінал або командний рядок.

Перейдіть до каталогу, де ви зберегли файл.

Запустіть програму командою: `python rangefinder_cal.py`

Ви побачите вивід у консолі, який імітує процес калібрування, включаючи спроби вимірювань, розрахунки похибок та застосування коригувань. Цей приклад досить простий, але він демонструє ключові принципи калібрування приймальної частини.

Для забезпечення стабільної, швидкої та коректної роботи програмного забезпечення калібрувального комплексу необхідно дотримуватися низки технічних і програмних вимог до персонального комп'ютера, які впливають на загальну продуктивність, якість обробки даних і сумісність із апаратною частиною системи. В операційній системі пріоритет надається сучасним, стабільним платформам із широкою підтримкою драйверів та програмних середовищ, тому рекомендовано використовувати Windows 10 або пізніші версії Windows, оскільки вони забезпечують розширену підтримку USB-пристроїв, стабільність роботи, сумісність із сучасним програмним забезпеченням і регулярне оновлення системних компонентів, що підвищує безпеку і продуктивність. Процесор є ключовим елементом, який впливає на швидкість виконання алгоритмів збору та обробки даних, зокрема при паралельному виконанні модулів збору, фільтрації, калібрування та запису інформації; мінімально прийнятним варіантом є процесор Intel Core i3 останніх поколінь або його аналоги від AMD, такі як Ryzen 3, які забезпечують достатню обчислювальну потужність для роботи з багатозадачними програмами, запуском серверних додатків та обробкою великих масивів даних без значних затримок. Важливо, щоб процесор підтримував багатоядерність і технології багатопотоковості для забезпечення більшої швидкодії і стабільності роботи навіть під навантаженням. Оперативна пам'ять є критичним ресурсом для тимчасового зберігання даних, і мінімальний обсяг 4 ГБ дає можливість запускати програмні модулі без ризику зависання або втрати даних, оскільки в процесі збору та обробки даних активується кілька одночасних процесів, а також може відбуватися кешування даних для прискорення доступу; бажано

використовувати швидкі модулі оперативної пам'яті з високою пропускнуою здатністю, що покращить загальну продуктивність системи. Щодо зберігання даних, комп'ютер повинен мати не менше 500 МБ вільного місця на жорсткому диску або SSD для розміщення програмного забезпечення, проміжних даних збору, результатів калібрування, логів тестування та резервних копій; рекомендовано застосовувати твердотільні накопичувачі (SSD), оскільки вони суттєво скорочують час завантаження програм і швидкість обробки файлів, що особливо важливо при роботі з великими масивами даних у режимі реального часу. Для підключення апаратної частини, яка включає мікроконтролери, сенсори та інші периферійні пристрої, необхідна наявність USB-портів стандарту USB 2.0 або вище, які гарантують стабільний і швидкий обмін даними; у разі роботи з великою кількістю датчиків або складними периферійними пристроями рекомендується наявність декількох портів USB або використання USB-концентраторів, що дозволяє паралельно підключати всі компоненти без втрати якості зв'язку. З програмного боку важливо, щоб на ПК було встановлено відповідне середовище виконання, яке підтримує роботу розробленого ПЗ; якщо програмне забезпечення написане на платформі Microsoft, необхідно мати актуальну версію .NET Framework (4.7 або вище), що забезпечує сумісність і стабільність роботи додатків; у випадку використання скриптових рішень або наукових обчислень рекомендовано встановити Python останньої стабільної версії з усіма необхідними бібліотеками (NumPy, SciPy, Pandas тощо), які використовуються для аналізу, фільтрації та калібрування даних. Для забезпечення стабільної роботи ПЗ необхідно підтримувати регулярне оновлення операційної системи і програмного забезпечення, що дозволяє усувати вразливості і підвищувати сумісність із новими версіями апаратних драйверів. Важливо також забезпечити стабільне інтернет-з'єднання для завантаження оновлень, отримання підтримки та дистанційного моніторингу роботи калібрувального комплексу. З метою захисту інформації і забезпечення цілісності даних рекомендується використовувати якісне антивірусне програмне

забезпечення з актуальними базами, а також впровадити систему резервного копіювання, що дозволить швидко відновити дані у разі збою або пошкодження файлів. Всі ці технічні і програмні вимоги сформовані для того, щоб забезпечити надійну, безперебійну і ефективну роботу калібрувального комплексу, уникнути збоїв, втрати даних або некоректної обробки, а також гарантувати сумісність усіх компонентів у рамках єдиної системи збору, обробки та калібрування даних.

Проведене тестування програмного забезпечення калібрувального комплексу охоплювало широкий спектр методів для комплексної оцінки якості, надійності та функціональності розробленої системи. Модульне тестування дозволило детально перевірити кожен окремий компонент програмного забезпечення, включно з окремими функціями та класами, що відповідають за збір, обробку і калібрування даних. Завдяки цьому було забезпечено правильність роботи основних алгоритмів на рівні окремих модулів, що є фундаментальною умовою для подальшої інтеграції всіх частин системи.

Інтеграційне тестування було спрямоване на перевірку коректної взаємодії між модулями, які реалізують збір даних з апаратної частини, їхню обробку та генерацію калібрувальних коефіцієнтів. Під час цього етапу було підтверджено відсутність конфліктів, помилок передачі даних і збоїв у роботі системи. Це гарантує, що розроблена архітектура програмного забезпечення є стабільною і забезпечує безперервний процес калібрування в реальних умовах експлуатації.

Системне тестування проводилося безпосередньо на кінцевому обладнанні з усією апаратною частиною, що дає змогу оцінити загальну продуктивність і стабільність програмного комплексу в реальних експлуатаційних умовах. Протягом восьмигодинного безперервного тестування не було зафіксовано жодних критичних збоїв або втрати даних, що свідчить про високу надійність системи та її готовність до промислового застосування.

Ключовим показником ефективності роботи програмного забезпечення стала точність вимірювань до і після калібрування. Аналіз результатів свідчить про те, що середня похибка вимірювань до калібрування становила близько

$\pm 2.3\%$, тоді як після застосування розроблених алгоритмів калібрування ця похибка знизилася до рівня не більше $\pm 0.5\%$. Такий значний рівень корекції є доказом правильності обраних методів обробки даних і генерації калібрувальних коефіцієнтів, а також підтверджує високу якість реалізації програмного комплексу.

Для забезпечення комфортного і безпомилкового використання системи розроблено докладну інструкцію користувача, яка містить покрокові вказівки щодо встановлення програмного забезпечення, підключення апаратної частини, запуску процесу збору та калібрування даних, а також збереження й експорту результатів. Інструкція виконана у двох форматах: текстовому PDF-файлі з ілюстраціями та відеоінструкції, що дозволяє задовольнити різні потреби користувачів — як тих, хто віддає перевагу письмовим керівництвам, так і тих, хто віддає перевагу візуальному навчанню. Це значно спрощує процес навчання та знижує ризик помилок при першому запуску системи.

Окремо були визначені вимоги до персонального комп'ютера, які забезпечують оптимальні умови для стабільної роботи програмного забезпечення. Зокрема, рекомендовано використовувати операційну систему Windows 10 або вище, процесор не нижче Intel Core i3, не менше 4 ГБ оперативної пам'яті, а також наявність мінімум 500 МБ вільного місця на жорсткому диску для зберігання даних та програмних компонентів. Крім того, апаратна частина повинна підключатися через порти USB 2.0 або вище, а для роботи програмного забезпечення має бути встановлено необхідне середовище виконання — .NET Framework або Python, залежно від вибраної технології реалізації. Ці вимоги враховані з урахуванням сучасних тенденцій на ринку персональних комп'ютерів і ноутбуків, що забезпечує широке коло користувачів можливістю безперебійно використовувати розроблену систему.

Загалом, результати тестування і аналітичний огляд довели, що розроблений калібрувальний комплекс є високоефективним інструментом для корекції вимірювальних даних з урахуванням технічних похибок апаратури.

Програмне забезпечення відповідає вимогам точності, надійності та зручності використання, що робить його придатним для застосування в промислових, науково-дослідних та освітніх проектах. Надалі можлива адаптація і розширення функціоналу комплексу з метою підтримки додаткових типів сенсорів і підвищення рівня автоматизації процесів калібрування.

ВИСНОВКИ

У рамках бакалаврської кваліфікаційної роботи була успішно виконана та комплексно обґрунтована розробка інноваційного програмно-апаратного комплексу, призначеного для високоточного калібрування лазерних далекомірів. Актуальність даної роботи зумовлена постійно зростаючою потребою у забезпеченні максимальної точності вимірювань відстаней у критично важливих галузях сучасної економіки, таких як будівництво, де міліметрові відхилення можуть призвести до значних фінансових втрат та ризиків; геодезія, де точність є запорукою достовірності картографічних даних; машинобудування, де прецизійні вимірювання гарантують якість та відповідність продукції стандартам; а також у динамічно розвиваючихся сферах робототехніки та автоматизації, де лазерні далекоміри є основними сенсорами для навігації та позиціонування. Забезпечення стабільно високої точності та надійності функціонування лазерних далекомірів є абсолютно критичним для коректної та безпечної роботи всіх систем, у яких вони інтегровані.

На початковому етапі дослідження було проведено глибокий аналіз теоретичних основ функціонування лазерних далекомірів, що включав детальний розгляд різних принципів їх дії (імпульсний, фазовий, триангуляційний), а також існуючих методів калібрування, що застосовуються у світовій практиці. Особлива увага була приділена ідентифікації та систематизації основних джерел похибок, які можуть виникати під час вимірювань (температурні зміни, атмосферний тиск, вологість, забруднення оптичних елементів, нестабільність лазерного джерела, механічні вібрації тощо). Важливим аспектом теоретичного блоку стало ретельне вивчення метрологічних характеристик лазерних далекомірів, а також детальний аналіз відповідних національних та міжнародних нормативних документів та стандартів (наприклад, ISO, ДСТУ), що регламентують процедури їх калібрування, умови проведення вимірювань та допустимі границі похибок.

Ключовим результатом виконаної роботи стала розробка повноцінного програмно-апаратного комплексу. Апаратна частина комплексу була спроектована з акцентом на високу точність та стабільність. Вона включає:

Прецизійний лінійний переміщувач: забезпечує надзвичайно точне позиціонування об'єкта вимірювання на заданих відстанях, що є фундаментом для створення еталонної бази для калібрування. Референсний далекомір: високоточний еталонний прилад, який використовується для порівняння з каліброваним далекоміром, гарантуючи достовірність калібрувальних вимірювань. Мікроконтролер: є "мозком" системи, що забезпечує координацію роботи всіх апаратних компонентів, збір даних з сенсорів та обмін інформацією з програмним забезпеченням. Відповідні інтерфейси зв'язку: (наприклад, USB, RS-232, Ethernet) забезпечують надійну та швидку передачу даних між апаратною та програмною частинами комплексу.

Програмна частина комплексу, розроблена з використанням сучасних мов програмування та технологій (Python, з використанням бібліотек), забезпечує повний контроль над процесом калібрування. Її функціонал включає: Керування апаратними компонентами: точне управління рухом лінійного переміщувача, активація та деактивація лазерного далекоміра, синхронізація вимірювань. Збір даних: автоматизоване зчитування показань з каліброваного та референсного далекомірів. Обробка та аналіз даних: застосування статистичних методів для оцінки похибок, розрахунків калібрувальних коефіцієнтів, аналіз повторюваності та відтворюваності вимірювань.

Впровадження даного програмно-апаратного комплексу дозволить вітчизняним та міжнародним підприємствам, а також акредитованим метрологічним службам, суттєво підвищити ефективність та якість процедур калібрування лазерних далекомірів. Це, в свою чергу, забезпечить значно більшу достовірність вимірювань, що критично важливо для прийняття обґрунтованих технічних рішень у виробничих, науково-дослідних та контрольно-вимірювальних процесах. Крім того, завдяки високому ступеню автоматизації

процесів калібрування, суттєво знижується залежність від висококваліфікованого персоналу, зменшується вплив суб'єктивного фактора, а також оптимізуються операційні витрати, пов'язані з проведенням регулярних калібрувань.

Таким чином, у бакалаврській кваліфікаційній роботі було не тільки успішно вирішено поставлені завдання, а й отримано значущі наукові та практичні результати. Створений програмно-апаратний комплекс є потужним, ефективним та надійним інструментом, здатним забезпечити необхідний рівень точності та достовірності вимірювань лазерними далекомірами, що є важливим внеском у підвищення якості продукції, безпеки виробничих процесів та загальної ефективності їх застосування в різноманітних сферах людської діяльності. Перспективи подальшого розвитку включають інтеграцію додаткових функцій, таких як температурна компенсація, розширення діапазону калібрування та можливість дистанційного керування комплексом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національний науковий центр «Інститут метрології». Основні напрямки діяльності ННЦ «Інститут метрології» [Електронний ресурс]. — URL: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=1059>
2. Кривенко, А. В. Методи визначення метрологічних характеристик верстатів з ЧПК / А. В. Кривенко, О. М. Кривенко // Вісник Національної металургійної академії України. — URL: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/1971/1241>
3. Гребенюк, В. О. Дослідження точності верстатів з числовим програмним керуванням : магістерська дис. / В. О. Гребенюк ; наук. кер. В. І. Герасименко ; НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». — Київ, 2021. — URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/62238382-2eb0-4605-bbe3-b4993dfb56c0/content>
4. Ballbar – QC20-W – Analysis [Електронний ресурс] // Haas Automation, Inc. — URL: <https://www.haascnc.com/uk/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/ballbar---qc20-w---analysis.html>
5. Датчик ускорения NUL-227 [Електронний ресурс] // InterSystems. — URL: <https://inter-systems.kiev.ua/categories/cifrovye-laboratorii-dlya-obrazovaniya/datchik-uskoreniya-nul-227.html>
6. Rotary - TR/TRT/T5C - Removal [Електронний ресурс] // Haas Automation, Inc. — URL: <https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/rotary---tr-trt-t5c---removal.html>
7. Nova II - прецизійний вимірювач потужності та енергії лазера [Електронний ресурс] // Ophir Photonics Group. — URL: <https://www.ophiropt.com/ru/f/nova-2-power-meter>
8. Ariel – компактний вимірювач потужності для промислових лазерів [Електронний ресурс] // Ophir Photonics Group. — URL: <https://www.ophiropt.com/ru/f/ariel-industrial-power-sensors>

9. BEAMAGE-3.0 Beam Profiler [Електронний ресурс] // *Gentec-EO / Dorgean Technologies*. – URL: <https://dorgean.com/en/product/BEAMAGE-30.html>
10. Microtrac. Particle Size & Shape Analysis / Laser Diffraction [Електронний ресурс]. – URL: https://www.microtrac.com/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/?utm_term=laser%20particle%20sizer&utm_campaign=Microtrac+-+EN+-+Europa+-+%5BVV%5D+-+%5BBREV!%5D&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=8221357699&hsa_cam=54613943&hsa_grp=89540066876&hsa_ad=697521084215&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-3322626680&hsa_kw=laser%20particle%20sizer&hsa_mt=b&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gad_campaignid=54613943&gbraid=0AAAAAD_ZKWU6d4mG3l0ySPC197Da9mixg&gclid=CjwKCAjwrvBBhBjEiwAIr30VMhyJGmNk9To_xL1Gb8Z5AkLw1eyj6QONoGRGJ1_mJJ6J1JfTeUnRoCMygQAvD_BwE
11. Renishaw. XL-80 — лазерна система калібровки. Renishaw plc, 2015. URL: https://www.renishaw.com/en/xl-system-components--8268?srsId=AfmBOoop-MI_9jS-OKc9P_azOWya3crO0ufnFckcAPr19XMaMFTsj4N
12. Coordinate-measuring machine [Електронний ресурс] // Wikipedia : the free encyclopedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine
13. Мисниченко М. В. Програмно-апаратний комплекс для калібрування лазерного далекоміра : кваліфікаційна бакалаврська робота / М. В. Мисниченко ; НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Факультет прикладної фізики та математики, Кафедра засобів та систем неруйнівного контролю. – Київ, 2021. – URL: https://asn.kpi.ua/docs/anotations/bachelor/MysnychenkoM_ua.pdf
14. Bouazizi A., Ghazel A., Ghariani H. Огляд методів і теорій проектування самовідновлюваних систем // *The Journal of Engineering*. – 2019. – Т. 2019, № 18. – С. 5004–5009. – URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/joe.2018.9111>

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Програмно-апаратний комплекс для калібрування об'єктиву лазерного далекоміру

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,13 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

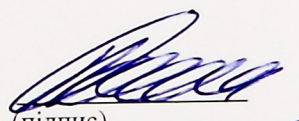
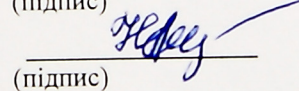
☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

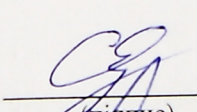
☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Коваль Л.Г., зав. каф. БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)
Заболотна Н.І., проф. каф БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Тужанський С.Є.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____
(підпис)

Кожем'яко А.В.
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач _____
(підпис)

Мирошніченко Д.С.
(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б

Ілюстративна частина

**Програмно-апаратний комплекс для калібрування об'єктиву лазерного
далекоміру**

Рисунок Б.1 – Графічна блок-схема алгоритму роботи системи калібрування

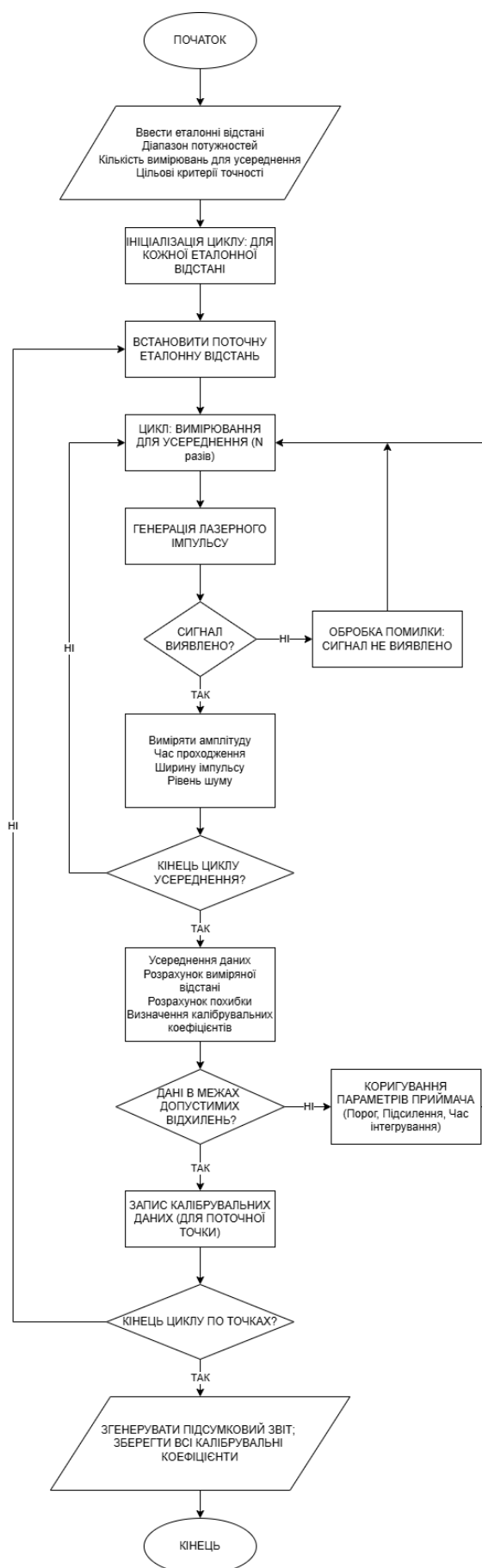


Рисунок Б.2 – Загальна структурна схема далекоміру

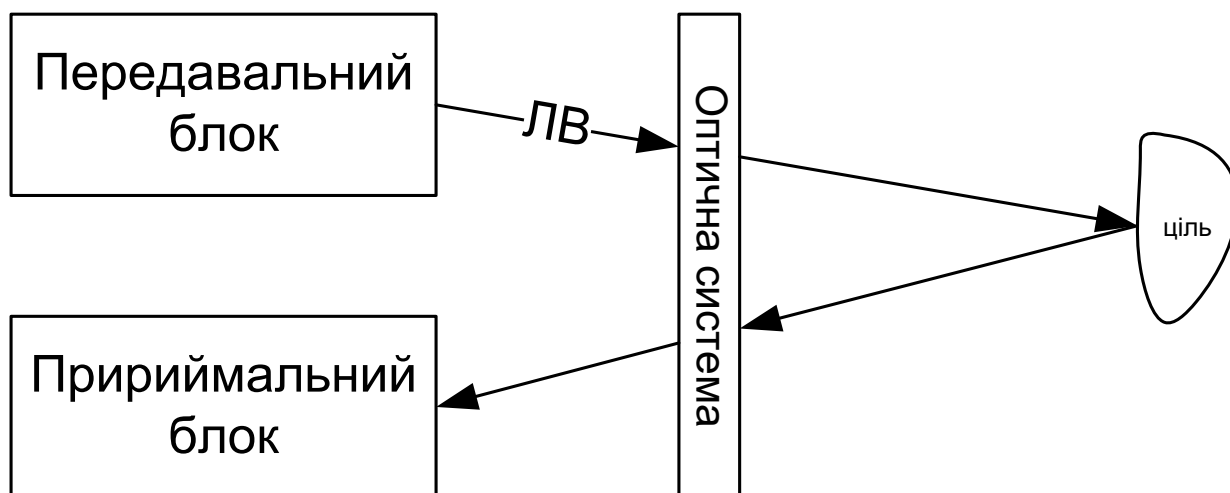


Рисунок Б.3 – Функціональна схема далекоміру

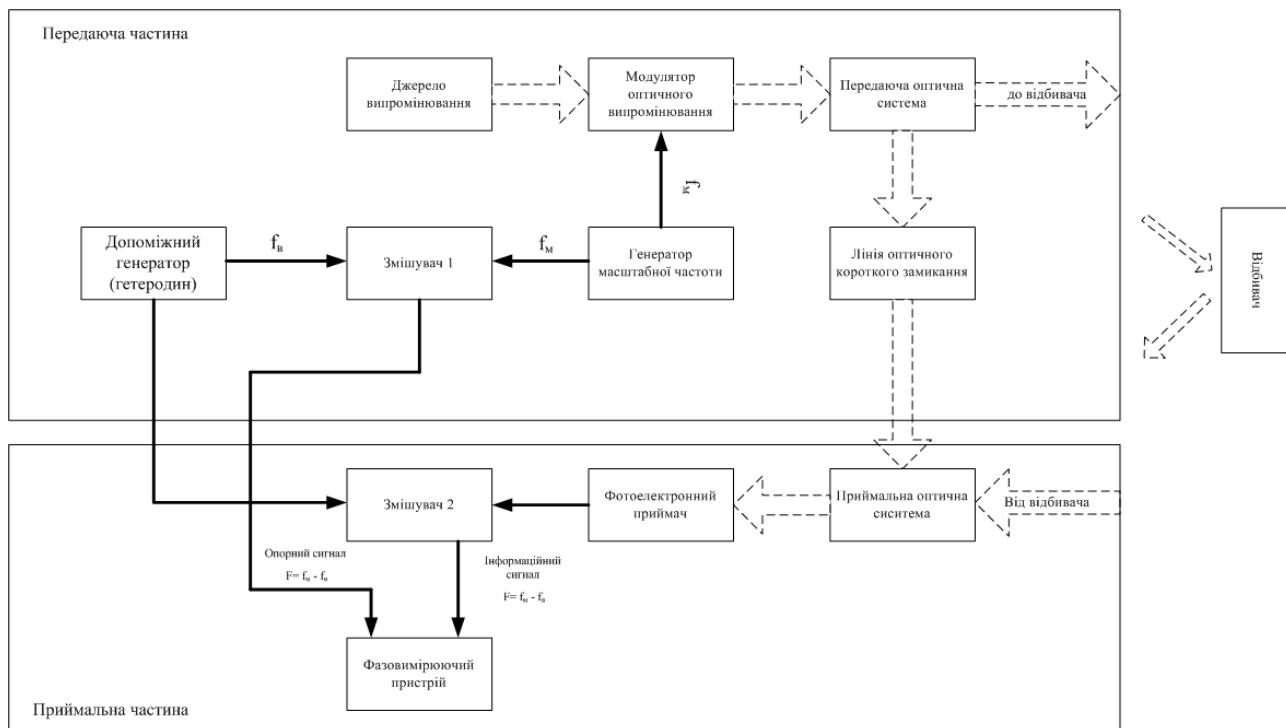


Рисунок Б.4 – Передавальна система лазерного далекоміра

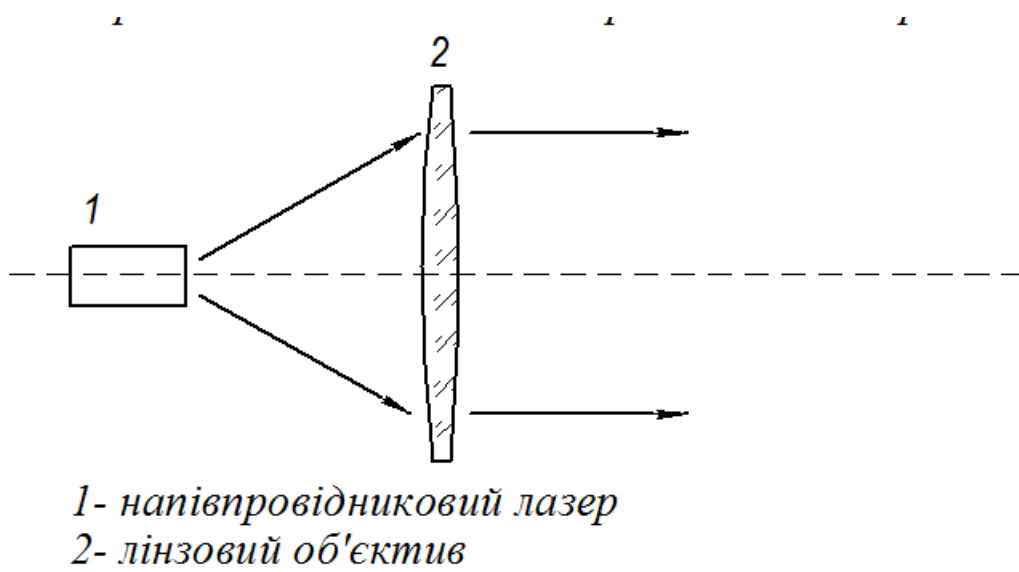
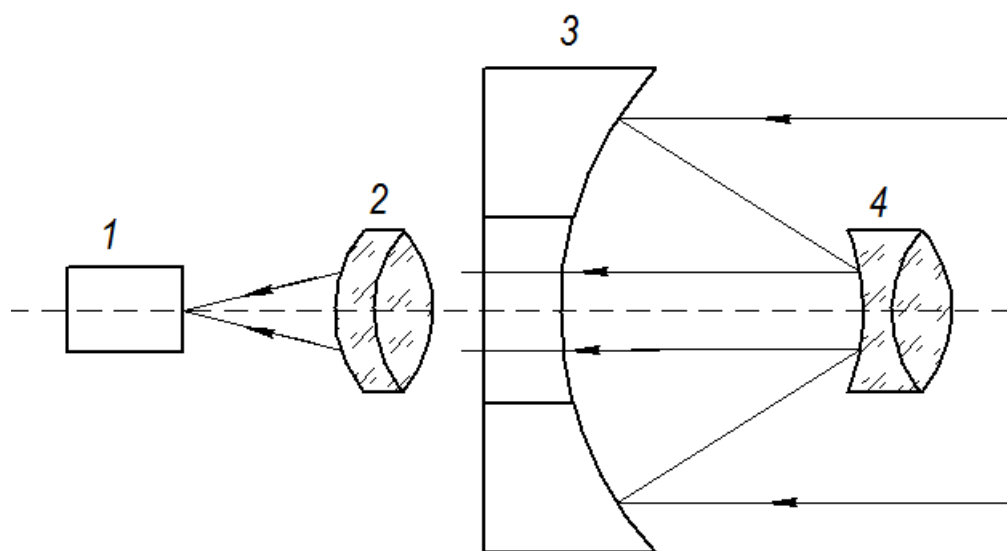


Рисунок Б.5 – Передавальна система лазерного далекоміра



1- фотодетектор

2- збиральна лінза

3- дзеркало

4-напівпрозора збиральна лінза

ДОДАТОК В

Лістинг програмного забезпечення

```
import numpy as np
import time
import random

# --- Параметри симуляції ---
# Швидкість світла (м/с)
SPEED_OF_LIGHT = 299792458
# Базовий шум приймача (імітація)
BASE_NOISE_LEVEL = 0.05
# Базова похибка часу (нс)
BASE_TIME_ERROR_NS = 0.5
# Порог виявлення сигналу (умовні одиниці амплітуди)
DEFAULT_DETECTION_THRESHOLD = 0.3
# Коефіцієнт підсилення приймача (умовний)
DEFAULT_RECEIVER_GAIN = 1.0

# --- Клас для симуляції лазерного далекоміра ---
class LaserRangefinderSimulator:
    def __init__(self, threshold=DEFAULT_DETECTION_THRESHOLD,
gain=DEFAULT_RECEIVER_GAIN):
        self.threshold = threshold
        self.gain = gain
        self.calibration_offset_ns = 0.0 # Офсет, який буде калібруватися

    def _simulate_signal(self, distance_m, pulse_power_mw):
        """Імітує відбитий сигнал з шумом та затримкою."""
        # Час проходження сигналу (туди і назад)
        true_time_s = (2 * distance_m) / SPEED_OF_LIGHT

        # Імітація ослаблення сигналу з відстанню та шуму
        # Амплітуда зменшується з відстанню та залежить від потужності
        amplitude = (pulse_power_mw / 100) * (1 / (1 + distance_m / 50))
        amplitude += random.uniform(-BASE_NOISE_LEVEL, BASE_NOISE_LEVEL)
```

```

        # Імітація похибки часу
        time_error_ns = random.uniform(-BASE_TIME_ERROR_NS,
BASE_TIME_ERROR_NS)
        measured_time_s = true_time_s + (time_error_ns / 1e9) +
(self.calibration_offset_ns / 1e9)

        # Застосування підсилення та порогу
        detected_amplitude = amplitude * self.gain

        return measured_time_s, detected_amplitude, (detected_amplitude >=
self.threshold)

    def measure_distance(self, distance_m, pulse_power_mw,
num_measurements=5):
        """Виконує симуляцію вимірювання відстані."""
        print(f"        Симуляція вимірювання на еталонну відстань
{distance_m:.2f} м...")
        times = []
        amplitudes = []
        signal_detected_count = 0

        for i in range(num_measurements):
            measured_time_s, detected_amplitude, detected =
self._simulate_signal(distance_m, pulse_power_mw)
            if detected:
                times.append(measured_time_s)
                amplitudes.append(detected_amplitude)
                signal_detected_count += 1
            else:
                print(f"        Спроба {i+1}: Сигнал не виявлено (Ампл:
{detected_amplitude:.3f} < Попир: {self.threshold:.3f})")

        if not times:
            print("        Помилка: Не вдалося виявити жодного сигналу.")
            return None, None, False

        avg_time_s = np.mean(times)
        avg_amplitude = np.mean(amplitudes)

```

```

        measured_distance_m = (avg_time_s * SPEED_OF_LIGHT) / 2

        print(f"    Усереднений час: {avg_time_s * 1e9:.2f} нс, Усереднена
амплітуда: {avg_amplitude:.3f}")
        print(f"        Виміряна відстань: {measured_distance_m:.2f} м
(Виявлено {signal_detected_count}/{num_measurements} сигналів)")

        return measured_distance_m, avg_amplitude, True

    def set_threshold(self, new_threshold):
        """Встановлює новий поріг детектування."""
        self.threshold = new_threshold
        print(f"        Новий поріг детектування встановлено:
{self.threshold:.3f}")

    def set_gain(self, new_gain):
        """Встановлює новий коефіцієнт підсилення."""
        self.gain = new_gain
        print(f"        Новий коефіцієнт підсилення встановлено:
{self.gain:.2f}")

    def apply_calibration_offset(self, offset_ns):
        """Застосовує калібрувальний офсет до вимірювань часу."""
        self.calibration_offset_ns = offset_ns
        print(f"    Застосовано калібрувальний офсет часу: {offset_ns:.2f}
нс")

# --- Функція калібрування ---
def calibrate_receiver(rangefinder_sim,
                      reference_distances_m,
                      pulse_power_mw=50,
                      num_measurements_avg=10,
                      max_distance_error_m=0.1, # Максимально допустима
похибка відстані в метрах
                      max_amplitude_variation=0.1 # Максимальна варіація
амплітуди для лінійності
                      ):
    """

```

Виконує симуляцію калібрування приймальної частини лазерного далекоміра.

```

"""
print("\n" + "="*50)
print("      ПОЧАТОК ПРОГРАМИ КАЛІБРУВАННЯ ДАЛЕКОМІРА")
print("="*50)

# Зберігаємо початкові параметри
initial_threshold = rangefinder_sim.threshold
initial_gain = rangefinder_sim.gain
initial_offset = rangefinder_sim.calibration_offset_ns

calibration_data = {}
total_offset_ns = 0.0 # Сумарний накопичений офсет

for i, ref_dist in enumerate(reference_distances_m):
    print(f"\n--- Калібрування для еталонної відстані: {ref_dist:.2f}
м (Етап {i+1}/{len(reference_distances_m)}) ---")

    attempts = 0
    max_attempts_per_point = 5
    current_offset_adjustment = 0.0

    while attempts < max_attempts_per_point:
        attempts += 1
        print(f"Спроба калібрування на поточній точці: {attempts}")

        measured_dist,          avg_ampl,          success          =
rangefinder_sim.measure_distance(ref_dist,          pulse_power_mw,
num_measurements_avg)

        if not success:
            # Спробувати скоригувати поріг або підсилення, якщо сигнал
не виявлено
            if rangefinder_sim.threshold > 0.1: # Не зменшувати поріг
занадто сильно

rangefinder_sim.set_threshold(rangefinder_sim.threshold * 0.8)

```

```

elif rangefinder_sim.gain < 2.0: # Збільшити підсилення
    rangefinder_sim.set_gain(rangefinder_sim.gain * 1.2)
else:
    print("!!! Не вдається виявити сигнал навіть після
коригувань. Пропуск цієї точки.")
    break # Вихід з циклу спроб для цієї точки
    continue # Спробувати знову з новими параметрами

distance_error = measured_dist - ref_dist
print(f" Похибка відстані: {distance_error:.3f} м (Допустимо:
+/-{max_distance_error_m:.3f} м)")

if abs(distance_error) <= max_distance_error_m:
    print(f" --> Відстань у межах допустимих відхилень для
{ref_dist:.2f} м.")
    # Калібруємо офсет часу для цієї точки
    # Похибка в метрах переводиться в похибку часу (нс)
    time_error_s = (2 * distance_error) / SPEED_OF_LIGHT
    time_error_ns = time_error_s * 1e9
    current_offset_adjustment = -time_error_ns # Коригуємо у
зворотний бік

    total_offset_ns += current_offset_adjustment
    rangefinder_sim.apply_calibration_offset(total_offset_ns)
# Застосовуємо кумулятивний офсет

calibration_data[ref_dist] = {
    'measured_distance': measured_dist,
    'error_m': distance_error,
    'avg_amplitude': avg_ampl,
    'applied_offset_ns': total_offset_ns
}
break # Вихід з циклу спроб для цієї точки
else:
    print(f" !!! Похибка відстані занадто велика. Потрібне
коригування.")
    # Приклад простого адаптивного коригування

```

```

        # Налаштовуємо поріг або підсилення на основі амплітуди
        сигналу

        if avg_ampl < rangefinder_sim.threshold * 1.2 and
rangefinder_sim.threshold > 0.1:

rangefinder_sim.set_threshold(rangefinder_sim.threshold * 0.9) # Зменшити
поріг, якщо сигнал слабкий

        elif avg_ampl > rangefinder_sim.threshold * 1.5 and
rangefinder_sim.threshold < 0.9:

rangefinder_sim.set_threshold(rangefinder_sim.threshold * 1.1) # Збільшити
поріг, якщо сигнал сильний

        else: # Якщо амплітуда в нормі, але похибка велика, це
може бути проблема офсету

            # Дуже проста евристика: коригувати поріг або
підсилення

            # Більш складні системи використовували б більш
витончені алгоритми

            # наприклад, регресійний аналіз.
            if abs(distance_error) > 2 * max_distance_error_m: #
Якщо похибка дуже велика

                if rangefinder_sim.gain < 2.0:
                    rangefinder_sim.set_gain(rangefinder_sim.gain
* 1.1)

                else:

rangefinder_sim.set_threshold(rangefinder_sim.threshold * 0.95)

                else: # Менша похибка

                    pass # Можливо, потрібно більше вимірювань, або
точкове калібрування часу.

            if attempts == max_attempts_per_point and abs(distance_error) >
max_distance_error_m:

                print(f"!!! Не вдалося відкалібрувати точку {ref_dist:.2f} м
після {max_attempts_per_point} спроб.")

                calibration_data[ref_dist] = {

                    'status': 'FAILED',

```

```

        'final_error_m': distance_error if 'distance_error' in
locals() else None
    }

    print("\n" + "="*50)
    print("        ЗАВЕРШЕННЯ КАЛІБРУВАННЯ")
    print("="*50)

    print("\n--- Звіт про калібрування ---")
    print(f"Початковий   попір:   {initial_threshold:.3f},   Початковий
коефіцієнт підсилення: {initial_gain:.2f}")
    print(f"Фінальний   попір:   {rangefinder_sim.threshold:.3f},   Фінальний
коефіцієнт підсилення: {rangefinder_sim.gain:.2f}")
    print(f"Загальний           застосований           офсет           часу:
{rangefinder_sim.calibration_offset_ns:.2f} нс")

    for dist, data in calibration_data.items():
        if 'status' in data and data['status'] == 'FAILED':
            print(f"Точка {dist:.2f} м: КАЛІБРУВАННЯ НЕ ВДАЛОСЯ. Фінальна
похибка: {data['final_error_m']:.3f} м")
        else:
            print(f"Точка           {dist:.2f}           м:           Виміряно
{data['measured_distance']:.2f} м, Похибка {data['error_m']:.3f} м, Ампл.
{data['avg_amplitude']:.3f},           Застос.           офсет:
{data['applied_offset_ns']:.2f} нс")

    # Перевірка лінійності (дуже спрощена)
    print("\n--- Перевірка лінійності (спрощена) ---")
    distances_calibrated = [d for d, data in calibration_data.items() if
'status' not in data]
    offsets = [data['applied_offset_ns'] for d, data in
calibration_data.items() if 'status' not in data]

    if len(distances_calibrated) > 1:
        # Простий аналіз: чи сильно змінюється офсет на різних відстанях
        # В реальному житті тут був би регресійний аналіз
        offset_range = np.max(offsets) - np.min(offsets) if offsets else

```

```

    print(f"Діапазон зміщення офсету по точках: {offset_range:.2f}
нс")

    if offset_range > 1.0: # Якщо офсет сильно змінюється, лінійність
може бути проблемою
        print(" Попередження: Значні зміни офсету можуть вказувати на
проблеми з лінійністю приймача.")
    else:
        print(" Лінійність (за офсетом) виглядає задовільно.")
    else:
        print(" Недостатньо точок для аналізу лінійності.")

    print("\nКалібрування завершено.")

# --- Запуск програми ---
if __name__ == "__main__":
    # Еталонні відстані для калібрування (в метрах)
    reference_distances = [5.0, 10.0, 20.0, 50.0, 100.0]

    # Ініціалізація симулятора далекоміра зі зміщенням
    # Уявіть, що "заводський" далекомір має невелике зміщення
    simulated_rangefinder = LaserRangefinderSimulator()
    simulated_rangefinder.calibration_offset_ns = random.uniform(-5.0,
5.0) # Початкове випадкове зміщення
    print(f"Імітація далекоміра з початковим зміщенням часу:
{simulated_rangefinder.calibration_offset_ns:.2f} нс")

    # Запускаємо процес калібрування
    calibrate_receiver(simulated_rangefinder, reference_distances)
    print("\n--- Тестування далекоміра після калібрування ---")
    test_distances = [15.0, 75.0, 30.0]
    for test_dist in test_distances:
        measured_d, _, _ =
simulated_rangefinder.measure_distance(test_dist, 50, 20)
        if measured_d is not None:
            print(f" Тестова відстань: {test_dist:.2f} м, Виміряно:
{measured_d:.2f} м, Похибка: {measured_d - test_dist:.3f} м")
        else:
            print(f" Тестова відстань: {test_dist:.2f} м, Вимірювання не
вдалося.")

```