

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

НАЗАРКЕВИЧ ІГОР БОГДАНОВИЧ

УДК 621.396.08

**КАЛІБРУВАННЯ УЗ СЕНСОРІВ ЛІНІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ
ЛАЗЕРНИМ ІНТЕРФЕРОМЕТРОМ**

152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

15 «Автоматизація та приладобудування»

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Ігор НАЗАРКЕВИЧ

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –
Доктор технічних наук, професор
Святослав ЯЦИШИН

Львів - 2024

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для успішного вступу України в Європейський Союз необхідно розвивати і впроваджувати методи і засоби метрологічного забезпечення, зокрема вимірювання лінійних розмірів. Особливо це стосується об'єктів нанотехнологій, що формуються основу прогресу у Промисловості 4.0. У той час як впроваджуються квантові еталони метричних одиниць, до числа вторинних і робочих засобів вимірювання відносять все частіше лазерні інтерферометри (Інтерферометри – прилади для вимірювання лінійних параметрів з похибкою 0,1 нм), а вже і засновано світовий день Інтерферометрії. Причому, у червні 2012 р. було уточнено час (на цілу 1 секунду) за допомогою інтерферометрії із наддовгою базою. Даний метод базується на моніторингу обертання Землі шляхом спостереження за положенням віддалених космічних об'єктів. У 2017 р. група науковців отримала Нобелівську премію в галузі фізики за доведення існування гравітаційних хвиль внаслідок використання лазерних інтерферометрів.

З'являються смарт-метрологія, квантова метрологія, оптична метрологія (фото нижче) на основі лазерної інтерферометрії, ad-hoc метрологія, дистанційна метрологія, тощо, що вже зараз описується терміном Metrology 4.0.

При цьому, різні види лазерних інтерферометрів досліджуються Технічним університетом м. Ільменау і розробляються фірмою SIOS, Німеччина, Ільменау лабораторію якої відкрито на кафедрі ІВТ у 2018 р. Саме там я отримав диплом магістра, спеціалізуючись на вимірюваннях з допомогою лазерного інтерферометра.

Зв'язок дисертаційної роботи із планами, темами та науковими програмами. Робота дисертанта відповідає чинному науковому напрямку кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій – теоретичні та прикладні основи метрології і вимірювань в інформаційних технологіях (інформаційно-вимірювальних, кібер-фізичних, робототехнічних та інших системах); тестування якості продукції і програмного забезпечення.

Мета і завдання дослідження. Дане дослідження переслідує мету, що полягає в аналізі стану метрологічної єдності вимірювань лінійного розміру об'єктів, а також удосконалення методів та елементів еталонної бази вимірювань і дослідження, зокрема робочих еталонів (2-го розряду), у галузі метрологічного забезпечення

вимірювань лінійних розмірів, передача одиниці лінійного розміру від еталонного засобу до робочого засобу вимірювальної техніки для вимірювання зовнішніх розмірів (п.3.2.2.3 та п.4.2.1 ДСТУ 3741 : 2015) - ультразвукового смарт-сенсора і, тим самим, покращення його метрологічних характеристик.

Для реалізації окресленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз вітчизняних нормативних документів в області вимірювань лінійних розмірів і вивчити досвід провідних європейських країн, вишів та компаній;
- вивчити стан еталонної бази України в області вимірювань лінійних розмірів, інтенсивності звуку та його тиску;
- вивчити та провести аналіз характеристик вимірювання лінійних розмірів;
- вивчити та провести аналіз процедур калібрування зразкових та лабораторних засобів вимірювання розмірів та відстаней;
- дослідити процедури передачі розміру одиниць довжини з використанням оптичної лави;
- дослідити можливості калібрування ультразвукових сенсорів, зокрема фірми IFM, з використанням лазерного інтерферометра, як робочого еталону 2-го розряду – вимірювача довжин хвиль лазера у діапазоні 0,4 – 4,0 мкм (п.3.1.2.1. ДСТУ 3741 : 2015);
- розробити методику калібрування ультразвукових сенсорів з допомогою лазерного інтерферометра;
- розробити методику дистанційного навчання метрологів роботі з лазерними інтерферометричними уставами.

Об'єкт дослідження – дослідження характеристик робочих інтерферометричних еталонів та промислових смарт-засобів вимірювання лінійних розмірів для робототехніки та інших галузей промисловості.

Предмет дослідження – характеристики вимірювання з використанням інтерферометричних засобів із лазерними джерелами випромінювання, методи їх створення та використання для калібрування ультразвукових вимірювачів відстані.

Методи дослідження. У праці над дисертацією розкрито прикладні та теоретичні аспекти метрології та інформаційно-вимірювальної техніки,

обчислення, визначення середніх та середньоквадратичних значень, девіації та дисперсії, а також вивчення, програмування, розроблення, дослідження та стандартизація, в тому числі у галузі методів і засобів метрологічного забезпечення, включаючи робочі еталони та інші види ЗВТ. Дослідження здійснювались з допомогою засобів еталонної лазерної інтерферометрії виробництва провідних закордонних фірм в Україні та Німеччині; у них використано унікальне устаткування еталонної бази України, включаючи еталони одиниць потужності звуку та звукового тиску ДП ДНДІ «Система» та безпосередньо ультразвукові смарт-сенсори фірми IFM, поставлені фірмою, як грантова допомога Львівській політехніці. Саме вони підлягали калібруванню, як сенсори, придатні для використання у різних галузях промисловості й робототехніці.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у оптимізації метрологічного забезпечення передавання розміру одиниці довжини від робочого еталону на основі лазерного інтерферометра до ультразвукового засобу вимірювання для потреб Промисловості 4.0.

У дисертаційній роботі отримано наступні наукові результати:

1. На підставі вивчення обладнання для еталонного та технічного забезпечення вимірювань одиниці довжини, визначено об'єкти досліджень та сформовано предмет дослідження, яким є метрологічні характеристики еталонного засобу, методи їх формування й використання для калібрування ультразвукових сенсорів відстані, розвинуто і вдосконалено методіку підготовки робочого інтерферометричного еталону та каліброваних сенсорів до проведення калібрування, установлення їх на оптичній лаві, обґрунтовано використання прямого методу калібрування, а також уточнено процедури оцінювання непевності отриманих результатів, що дало змогу оптимізувати метрологічні характеристики режимів передавання розміру одиниці довжини зміною контрольованих чинників впливу.
2. На основі проведених досліджень метрологічних параметрів **вперше** показано, що лазерний інтерферометр типу LM-20/50 може використовуватись у метрологічному забезпеченні галузі для перевірки,

калібрування й випробування ультразвукових сенсорів, як пристроїв для вимірювання відстані у робототехніці. Для калібрування УЗ сенсора необхідно попередньо уточнити його метрологічні параметри та їх підкоректувати, використовуючи програмно-технічні можливості, закладені у інтерфейсі УЗ сенсора сервісною оболонкою ІО - Link.

3. Для покращення параметрів передавання розміру одиниці відстані визначено чинники впливу (температура, вологість, вібрація, тощо) на калібрований ультразвуковий сенсор і удосконалено його методику калібрування, що дало змогу знизити похибку калібрування на нижній межі вимірювання відстані, тобто у «мертвій зоні». Окрім того, **вперше** запропоновано онлайн ігрові методи на базі інсталяційного програмного забезпечення, розробленого у вигляді мобільного застосунку-аналогу ПЗ Duolingo зі сформованим словником термінів, що дало змогу навчати фахівців із метрології роботі з лазерним інтерферометром.
4. За результатами калібрування, визначене граничне значення абсолютної похибки каліброваного робочого ЗВТ - 0,68 мм, що знаходиться у межах 0,05 мкм – 20,2 мм, зазначених пунктом 4.2.2. ДСТУ 3741:2015. Зведена похибка вимірювання з допомогою ультразвукового сенсора зменшилась. Для оцінювання якості калібрування УЗ сенсорів застосовано СКВ-метрологічний підхід, який відповідає положенням ISO/IEC Guide 98-4:2018 «Невизначеність вимірювань. Частина 4»: СКВ результатів вимірювання зменшилось на 25 % - від 4,4 % (дані фірми-виробника) до 3,3 % (результати досліджень), що підкреслило коректність обраного методу і підбору метрологічних інструментів для перенесення розміру одиниці довжини.

Застосування отриманих результатів досліджень. Отримані результати досліджень використано для калібрування ультразвукових смарт-сенсорів. Це дало змогу підвищити точність калібрування та зменшити непевність вимірювання при їх використанні для потреб Промисловості 4.0.

Державне підприємство ДП ДНДІ «Система», що є зберігачем Національного еталону одиниці звукового тиску в повітряному середовищі НДЕТУ АUV-03-2019; Національного еталону одиниці потужності ультразвуку

в водному середовищі НДЕТУ AUV-01-2018; Національного еталону одиниці ультразвукового тиску в водному середовищі НДЕТУ AUV-02-2018 - використало результати під час контролю встановлення мікрофонів в еталонах при визначенні розміру одиниць.

Крім того, результати роботи використано в навчальному процесі на кафедрі «Інформаційні вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології», в тому числі магістрів при викладанні дисципліни «Робототехніка, системи та комплекси», та аспірантів при викладанні дисциплін «Вибрані питання опрацювання результатів вимірювань та вимірювальних сигналів», «Аналітичні та чисельні методи досліджень».

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто сформовано постановка задачі з вивчення можливості впровадження лазерних інтерферометрів у галузі; досліджено лазерні інтерферометри, як елементи забезпечення метрологічної єдності при передаванні розміру; вивчено умови досягнення метрологічної єдності при передаванні розміру еталонної одиниці від робочого вторинного еталону до каліброваного засобу вимірювання; уточнено і розвинуто методологію калібрування засобів вимірювальної техніки – смарт-сенсорів провідних європейських фірм, розроблено спеціальні програмно-технічні засоби для навчання в онлайн-режимі метрологів особливостями роботи з інтерферометричним устаткуванням.

Апробація результатів. Викладені в роботі наукові положення й результати досліджень доповідались і обговорювались на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних і науково-технічних конференціях: 2-й Міжнародній науковій конференції «Цифрове наукове суспільство: соціально-економічні, правові та міжнародні аспекти», 05.04.2024; м. Рівне, Україна, а також 9-й Міжнародній науковій конференції, 28-29.03.2024 р., Відень, Австрія. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10912325>.

Структура та обсяг роботи. До складу дисертаційної роботи входять: перелік умовних позначень, вступ, чотири основні розділи з висновками до них,

загальні висновки, список використаних джерел та додатки у кількості 4-х. Загальний обсяг роботи складає 128 сторінок, з яких 111 сторінок основного тексту, що містять 47 рисунків та 13 таблиць. Список використаних джерел налічує 83 найменувань.

Публікації: За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 4 наукові праці, з них - 4 статті у фахових виданнях України, а також 2 тез доповідей.

Калібрування УЗ сенсорів лінійного переміщення лазерним інтерферометром

АНОТАЦІЯ

Назаркевич І. Б., Калібрування УЗ сенсорів лінійного переміщення лазерним інтерферометром, – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню Доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти та науки України, Львів, 2024.

Дисертація присвячена дослідженню, вивченню та вирішенню проблем метрологічного забезпечення вимірювань лінійних розмірів на основі калібрування ультразвукових смарт-сенсорів відстані з допомогою високоточних і прецизійних лазерних інтерферометрів, як робочих еталонних засобів.

У першому розділі розглянуто особливості вимірювань відстані (лінійних розмірів) та необхідне для цього метрологічне забезпечення.

Розглянуто основні одиниці системи SI, у тому числі, у галузі метрологічного забезпечення ЗВТ довжини та інших лінійних розмірів об'єктів. Оскільки найбільш ймовірними об'єктами, де можуть бути застосовані ультразвукові смарт-сенсори, є об'єкти робототехніки, то більша увагу приділена саме їм. Виконання вимірювань потребує створення належних технічних умов, зокрема, вибору методів та процедур вимірювань, застосування вимірювальних інформаційно-вимірювальних приладів (систем) і допоміжного обладнання. Це дає змогу реалізувати вимірювання й отримати задовільні за

даних умов результати. Проте, існує значний вплив методики та самого обладнання на метрологічні параметри вимірювань.

Вимірювальні методи і засоби, при цьому, поділяються відповідно виду вимірюваних фізичних величин. Розглядаючи їх методи, вивчаємо сутність, як методів безпосереднього порівнювання ЗВТ електричних, оптичних чи теплових величин з їхніми еталонами (еталоном вважається ЗВТ, що забезпечує відтворення, зберігання і можливість передавання розміру одиниці вимірювання іншим засобам вимірювальної техніки).

Еталонний засіб та калібрований прилад формують інформаційно-вимірювальну систему. При цьому, контрольований параметр може послідовно передаватись на еталон та на калібрований прилад, а може одночасно подаватись на них. У даній роботі використовується саме останній підхід. Тут контролюється відстань до проміжкового екрану, встановленого між еталонним та каліброваним засобами.

У додаток, на прикладі вимірювання температури тіла людини показана необхідність здійснення калібрування термометра, як одиниці ЗВТ.

У *другому розділі* розглянуто методологію передавання розміру одиниці довжини, методи і засоби, а також досліджено метрологічні характеристики робочого еталону вимірювання одиниці лінійних розмірів на основі лазерного інтерферометра.

Вивчено формування метрологічних характеристик лазерних інтерферометрів, як засобів вимірювання відстані. При відомих метрологічних характеристиках лазерного інтерферометра типу LM-20/50, у разі його застосування, як робочого еталону для перевірки та калібрування ультразвукових сенсорів, виняткового значення набуває методологія здійснення перевірки та особливості передачі розміру одиниці довжини.

На основі оптичної лави розроблено устаткування для встановлення і закріплення, як лазерного інтерферометра (робочий еталон), так і каліброваного сенсора, що сформувало основу методу прямої передачі розміру довжини. На підставі експериментальних досліджень встановлено організаційні (оточуюче середовище), методологічні (послідовність дій), механічні особливості

(кріплення на оптичній лаві та усунення люфтів та нахилів) для мінімізації дрейфу показів інтерферометра у часі.

Показано, що при чутливості інтерферометра порядку 0,2 нМ та сумарній абсолютній похибці визначення відстані – 2 нМ, а також при дрейфі показів – до 10 нМ, похибка передавання розміру одиниці довжини є істотно більшою за значення дрейфу і становить 20-30 нМ.

Визначено фактори впливу (стабільність частоти роботи лазера та інші похибки вимірювання), що можуть збільшити похибку передавання розміру одиниці довжини та запропоновано заходи для її зменшення. Проведено калібрування лазерного інтерферометра, що дало змогу обґрунтувати його залучення як робочого еталону.

У третьому розділі увагу приділено питанням дослідження ультразвукових смарт-сенсорів відстані та їх калібрування, як етапу передавання розміру від робочого еталону до ЗВТ.

Описано конструкцію та будову ультразвукових смарт-сенсорів, зокрема сенсорів фірми IFM, Німеччина з точністю $\pm 4,4$ % на нижній межі вимірювального діапазону. Досліджено метрологічні характеристики та придатність до використання їх, як сенсорів відстані для потреб робототехніки. Виділено питання використання їх у процесі передавання одиниці лінійного розміру, як засобів вимірювальної техніки. Проведеними дослідженнями встановлено наступне.

Враховуючи специфіку оптичного засобу – робочого еталону – для калібрування *in situ* запропоновано використовувати прямий метод калібрування ультразвукового сенсора. У результаті, уточнено його метрологічні характеристики, що особливо важливо при малих відстанях до об'єкту. Апробовано метод одночасного кріплення лазерного інтерферометра та ультразвукового сенсора на рейці оптичної лави, коли на екран, встановлений між двома засобами, положення якого сприймається як умовний нуль, одночасно діє оптичне випромінювання лазера та звуковий сигнал сенсора. Тоді похибка вимірювання, що складається із систематичної та випадкової компонентів, мінімізується усуненням першої - при аналізі результатів, а випадкові відхилення

служать базою для обчислення середньоквадратичних відхилень, що характеризують якість вимірювань і передавання розміру одиниці довжини.

За результатами калібрування, граничне значення абсолютної похибки каліброваного сенсора становить 0.6836 мм при відстані 20,2 мм від об'єкту або $\pm 3,3 \%$. Воно відповідає вимогам пункту 4.2.2. ДСТУ 3741:2015 (0,05 мкм – 20,2 мм), потрапляючи у зазначені межі. Точність калібрування ультразвукового сенсора зросла на 25 %, оскільки СКВ результатів вимірювання зменшилось від 4,4 % до 3,3 %, що підкреслює коректність обраного методу та підбору приладів для перенесення розміру одиниці довжини від робочого еталону до робочого ЗВТ.

Застосовано СКВ-метрологічний підхід для оцінювання якості калібрування ультразвукових сенсорів, який відповідає положенням Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement і ефективно впроваджується у світі, до прикладу, для оцінювання якості поверхонь.

У четвертому розділі розглянуто методологію віддаленого навчання метрологів (магістрів та аспірантів) основам лазерної інтерферометрії та практиці використання робочого еталону на основі лазерного інтерферометра для калібрування промислових ультразвукових смарт-сенсорів, причому з використанням розробленого у процесі виконання роботи програмного забезпечення, встановлюваного в мобільні засоби зв'язку і придатного для он-лайн самопідготовки особи, що навчається.

Ключові слова: методи і засоби вимірювальної техніки, метрологічні характеристики, калібрування, передавання розміру одиниці довжини, метрологічне забезпечення, робочий еталон, непевність вимірювання, смарт-сенсори.

Calibration of ultrasound sensors of linear movement with a laser interferometer

ABSTRACT

I. Nazarkevych, Calibration of ultrasound sensors of linear movement with a laser interferometer. – Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for

the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 "Metrology and information-measuring technique" - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

The dissertation is devoted to the research, study and solution of problems of metrological support of measurements of linear dimensions based on the calibration of ultrasonic smart distance sensors with the help of high-precision and exact laser interferometer as working standard.

The first chapter deals with the features of distance measurements (linear dimensions) and the metrological support necessary for this.

The main SI units are considered in the field of metrological assurance of the means of length measurements. Since the most likely objects where ultrasonic smart sensors can be applied are objects of robotics, more attention is paid to them. The performance of measurements requires the creation of appropriate technical conditions, in particular, the selection of measurement methods and procedures, the use of measuring information-measuring devices and auxiliary equipment. This makes it possible to implement measurements and obtain satisfactory results under the given conditions. However, there is a significant impact of the technique and the equipment itself on the metrological parameters of the measurements.

Measuring methods and means are divided according to the type of measured physical quantities. Examining their methods, the essence is studied as methods of direct comparison of the calibrated means with their standards (a standard is a measuring device that ensures the reproduction and/or storage of a unit of measurement of one or more values, as well as the transfer of the size of this unit to other measuring instruments). The controlled parameter can be sequentially transmitted to the working standard and the calibrated device, or can be simultaneously applied to them. Here works the last approach. The distance to the screen installed between the reference and calibrated means is controlled here.

In addition, on the example of measuring human body temperature, the necessity of calibrating the thermometer as a unit of CRT is shown.

In the second chapter, the methodology of transmitting the size of a unit of length, methods and means are considered, as well as the metrological characteristics

of the working standard for measuring a unit of linear dimensions based on a laser interferometer are studied.

The formation of metrological characteristics of laser interferometers as means of distance measurement was studied. Given the known metrological characteristics of the laser interferometer type LM-20/50, in the case of its application as a working standard for calibrating ultrasonic sensors, the methodology of the transmission of the size of a unit of length acquires the great importance. On the basis of the optical bench, the equipment for installing and fixing both the laser interferometer (working standard) and the calibrated sensor were developed; this forms the basis foundations of the method of direct transmission of the length dimension. Studies of environmental, methodological, and mechanical features (mounting on the optical bench and elimination of backlashes and inclinations) were established to minimize the drift of interferometer readouts over time.

It is shown that with an interferometer sensitivity of ~ 0.2 nM and a total absolute distance determination error of 2 nM, as well as with a drift of readouts of up to 10 nM, the error of transmitting the size of a unit of length is significantly greater than the value of the drift and is 20-30 nM. Impact factors (stability of the laser frequency and other measurement errors) that can increase the error of transmission of the size of a unit of length have been determined, and measures to reduce them have been proposed. Calibration of the laser interferometer was carried out, which made it possible to justify its use as a working standard.

In the third chapter, attention is paid to the research of ultrasonic smart distance sensors and their calibration, as a stage of transferring the size from the working standard to the measuring instrument.

The design of ultrasonic smart sensors is considered, in particular sensors of the IFM company, Germany with an accuracy of ± 4.4 % at the lower limit of the measuring range. The metrological characteristics and their suitability for use as distance sensors for the needs of robotics were studied. The issue of using them in the process of transferring a unit of linear size as a metrological instrument is highlighted. The following has been established in my issue:

Considering the specifics of the laser interferometer - the working standard - for in situ calibration, it is proposed to use a direct method of calibrating the ultrasonic sensor. As a result, its metrological characteristics have been clarified, which is especially important at short distances to the object. The method of simultaneously attaching a laser interferometer and an ultrasonic sensor to the rail of an optical bench was tested, when the optical radiation of the laser and the sound signal of the sensor simultaneously act on the screen installed between the two metrological instruments, the position of which is perceived as a conditional zero. Then the measurement error, consisting of systematic and random components, is minimized by eliminating the first - when analyzing the results, and random deviations serve as the basis for calculating RMS deviations that characterize the quality of measurements and the transmission of the size of a unit of length.

According to the calibration results, the absolute error of the calibrated sensor is 0.6836 mm at a distance of 20.2 mm from the object or $\pm 3.3\%$. It meets the requirements of clause 4.2.2. DSTU 3741:2015 (0.05 μm - 20.2 mm), falling within the specified limits. The accuracy of the calibration of the ultrasonic sensor increased by 25%, as the RMS-value of the measurement results decreased from 4.4% to 3.3%, which emphasizes the correctness of the chosen method and selection of metrological instruments for transferring the size of the unit of length from the working standard to the working mean.

The RMS-metrology approach is used to assess the quality of the calibration of ultrasonic sensors, which corresponds to the approach of the Guide to the Expression of Uncertainty and is effectively implemented in the world, for example, to assess the quality of surfaces.

In the fourth chapter, the methodology of remote training of metrologists (masters and postgraduates) in the basics of laser interferometry and the practice of using a working standard based on a laser interferometer for the calibration of industrial ultrasonic smart sensors is considered, and with the use of developed here software, installed in mobile phones and suitable for online self-training of the students.

Keywords: methods and means of measuring techniques, metrological characteristics, calibration, transmission of the size of a length unit, metrological support, working standard, uncertainty, smart sensors.

СПИСОК ПРАЦЬ, ВИКОНАНИХ У РЕЗУЛЬТАТІ РОБОТИ НАД ДИСЕРТАЦІЄЮ

1. S. Yatsyshyn, I. Nazarkevych, R. Mastylo, Calibration of the Ultrasonic Sensor-Range Finder by the Laser Interferometer, *Measuring Equipment and Metrology*, Volume 80, Number 4, pp.10-17, 2020, <https://doi.org/10.23939/istcmtm2020.04.010>
2. S. Yatsyshyn, I. Nazarkevych, Learning interferometric equipment through the integration of game methods into a mobile application, *Energy Engineering and Control Systems*, Volume 9, Number 2, pp. 131-135, 2023. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.02.131>
3. O. Sehed, I. Nazarkevych, Series termination of single-ended LVCMOS signals, *Measuring Equipment and Metrology*, Volume 84, Number 4, pp.5-9, 2023, <https://doi.org/10.23939/istcmtm2023.04.005>
4. I. Nazarkevych, O. Sehed, Features of transferring size of unit of length from working standard to measuring device, *Measuring Equipment and Metrology*, Volume 85, Number 1, pp.16-24, 2024, <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.01.016>
5. I. Nazarkevych, S Yatsyshyn, The Exactness of Ultrasound Sensors of Robotics, IX International Scientific and Practical Conference « World science priorities», March 28 – 29, 2024, Vienna. Austria. P. 111-112, ISBN 978-92-44513-95-8. DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.10912325>.
6. І. Б. Назаркевич, С. П. Яцишин, Розвиток ігрового методу вивчення інтерферометрії з допомогою мобільного застосунку, Матеріали 2-ї Міжнародної наукової конференції «Цифрове наукове суспільство: соціально-економічні, правові та міжнародні аспекти», 05.04.2024; м. Рівне, Україна.

Зміст

Перелік умовних позначень.....	17
Анотація.....	18
Вступ.....	19
1. Засоби вимірювань відстані (лінійних розмірів) та їх метрологічне забезпечення	20
1.1. Основні одиниці і засоби вимірювання лінійних розмірів	22
1.2. Метрологічне забезпечення вимірювання лінійних розмірів та методика опрацювання результатів вимірювань	36
1.3. Еталонні засоби та передавання розміру одиниці	38
1.3.1. Локаційний метод вимірюванні відстані.....	40
1.3.2. Калібрування сенсорів та його необхідність////////	41
Висновки до розділу 1.....	43
2. Методологія вимірювань відстані (лінійних розмірів), методи і засоби та дослідження робочого еталону вимірювання одиниці лінійних розмірів ...	45
2.1 Лазерні інтерферометри та лазерна інтерферометрія	46
2.1.1. Стабільність частоти роботи лазера і похибки вимірювання....	49
2.2 Методи формування метрологічних характеристик вимірювачів відстані.....	51
2.3 Процедури калібрування лазерного інтерферометра.....	52
2.3.1. Контроль температури і вологості оточуючого середовища при калібруванні.....	58
Висновки до розділу 2.....ю.....	67
Розділ 3. Дослідження ультразвукових смарт-сенсорів відстані та їх калібрування	68
3.1. Методика дослідження та калібрування	73
3.1.1. Вивчення методичної складової похибки.....	75
3.1.2. Підготовка до проведення калібрувань і зняття сигналів ультразвукових сенсорів	76
3.2. Дослідження непевності вимірювань	79

3.2.1. Калібрування та опрацювання результатів	79
3.3. Методологія калібрування та використання еталонних засобів	82
Висновки до розділу 3	90
4. Методологія віддаленого навчання основам роботи і практиці лазерної інтерферометрії з використанням розробленого ПЗ.....	92
4.1. Ігрові методи у освоєнні інтерферометричних технологій та їх розроблення	96
4.2. Розроблення ігрових методів освоєння інтерферометрії	97
Висновки до розділу 4.....	109
Висновки	110
Список використаної літератури	112
Додатки	119
Додаток 1. Схема передавання одиниці лінійного розміру.....	120
Додаток 2. Програмне забезпечення для регулювання температури.....	121
Додаток 3. Лістинг програмного забезпечення для навчання метрологів основам роботи з лазерним інтерферометром	123
Додаток 4. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	128

Перелік умовних позначень

ЗВТ – засоби вимірювальної техніки

НД – нормативна документація

СКВ – середньоквадратичне відхилення (результатів вимірювання)

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

МХ – метрологічна характеристика

ЕД - експлуатаційна документація

ДП – державне підприємство

АНОТАЦІЯ

Кількість чинних у країні еталонів одиниць фізичних величин визначає її рівень у світовій ієрархії. Тому даному питанню постійно приділяють увагу на державному рівні й на науково-технічному рівні. Зокрема, кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка», що спеціалізується у галузі Метрології та інформаційно-вимірювальної техніки (спеціальність 152) приділяє істотну увагу, навіть, у тематиці аспірантських робіт проблемі еталонів та метрологічного забезпечення.

Особливо це стосується об'єктів нанотехнологій, що закладають основу прогресу у Промисловості 4.0. У той час, як впроваджуються квантові еталони метричних одиниць, до числа вторинних і робочих засобів вимірювання відносять все частіше лазерні інтерферометри (Інтерферометри – прилади для вимірювання лінійних параметрів з похибкою 0,1 нм), а вже і засновано світовий день Інтерферометрії. З'являються смарт-метрологія, квантова метрологія, оптична метрологія (фото нижче) на основі лазерної інтерферометрії, ad-hoc метрологія, дистанційна метрологія, тощо, що вже зараз описується терміном Metrology 4.0.

При цьому, різні види лазерних інтерферометрів досліджуються Технічним університетом м. Ільменау і розробляються фірмою SIOS, Німеччина, Ільменау, лабораторію якої відкрито на кафедрі ІВТ у 2018 р. Саме там я отримав диплом магістра, спеціалізуючись на вимірюваннях з допомогою лазерного інтерферометра. Цей досвід переніс у тему та результати даної дисертаційної роботи.

ВСТУП

Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] від 1-го січня 2016 року по-новому висвітлює поняття «калібрування». Хоча на даний момент воно висвітлюється фахівцями, постає низка питань в галузі нанотехнологічних пристроїв, до числа яких відносять лазерні інтерферометри, де похибка вимірювання співмірна із розміром атому. Адже зазначені інтерферометри за своїми метрологічними характеристиками можуть успішно служити робочими еталонами при забезпеченні метрологічної єдності вимірювань у галузі.

Для реалізації Програми інтеграції України в Європейський Союз необхідна гармонізація не тільки українських і міжнародних стандартів, в тому числі і в області метрологічного забезпечення вимірювання характеристик одиниць лінійних розмірів, але і однотипність необхідного для цього обладнання та устаткування.

Невідкладно слід вирішувати питання «метрологічних характеристик та точності еталонів», якими оснащені сертифіковані лабораторії, стосовно умов і методів формування еталонної одиниці та передачі розміру даної одиниці до кінцевого споживача, яким до прикладу ультразвуковий сенсор робототехнічної установки. На жаль, вищезгадане обладнання є вартісним та унікальним; воно ж вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, а також його спеціальної підготовки переважно закордоном.

РОЗДІЛ 1. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ВІДСТАНІ (ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ) ТА ЇХ МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Суттю роботи засобів вимірювальної техніки є перетворення фізичної величини, що поступає на вхід, у таку саму або іншу фізичну величину так, щоб проявлялася однозначна відповідність поміж ними або між їхніми головними чи вибраними параметрами у часі.

Фізична величина, розмір, значення величини. Об'єкти довкілля – це фізичні об'єкти, їхні системи та процеси, які там відбуваються, і характеризуються низкою різноманітних властивостей. Фізична величина – це означена якісно властивість фізичного об'єкту, що має певний розмір, тобто кількісний вміст. Згідно з [2] фізична величина – це властивість, спільна у якісному відношенні різним матеріальним об'єктам та індивідуальна у кількісному стосунку для кожного з них. Приклади фізичних величин: довжина, прискорення, напруга, температура, тощо.

Розмір фізичної величини відтворює кількісний вміст даної величини в конкретному об'єкті. Він існує об'єктивно, незалежно від того, що про нього відомо [3]. Особливо чітко це видно на прикладі одиниць еталонних величин, що забезпечуються на основі фізичних сталих речовини.

Виконання вимірювань потребує створення належних технічних умов, зокрема, вибору методів та процедур вимірювань, застосування вимірювальних або інформаційно-вимірювальних приладів і комплексів (систем) та допоміжного вимірювального обладнання. Це дає змогу реалізувати вимірювання й отримати задовільні за даних умов результати. Проте, існує значний вплив методики та самої апаратури на метрологічні параметри вимірювань, що описано нижче.

Вимірювальні методи, при цьому, поділяються відповідно виду вимірюваних фізичних величин. Розглядаючи електричні, оптичні та теплові методи, розуміємо їх сутність, як методів безпосереднього порівнювання електричних, оптичних чи теплових величин з їхніми еталонами (еталон - ЗВТ, що забезпечує відтворення, зберігання та передавання розміру одиниці

вимірювання іншим, робочим ЗВТ) або ж як непряме застосування фізичних ефектів, переважно квантових.

З-поміж непрямих методів вирізняється окрема група електричних методів, призначених для вимірювання неелектричних величин. Ці методи характеризуються такою кількістю позитивних рис, що переважно стає доцільним перетворювати будь-які характеристики на електричні та надалі використовувати вимірювання електричного струму чи напруги для оцінювання згаданих характеристик. Як видно з попередньої інформації, під час вимірювань використовуються 2 метрологічні прийоми - перетворення неелектричної величини в електричну та порівняння останньої з відповідним взірцем (еталоном).

Поява аналогових елементів, таких як транзистори, операційні підсилювачі, спеціалізовані аналогові мікросхеми тощо, при розумінні того, що електричні вимірювання є набагато простішими та зручнішими, призвели до появи широкого класу засобів вимірювання неелектричних величин, у яких функціонально виокремлено два блоки: первинний перетворювач, який перетворює вимірювану фізичну величину у електричну, переважно у струм чи напругу; та засіб вимірювання відповідної електричної величини. Таким чином, метрологічна перевірка засобів вимірювання неелектричних величин поділяється на дві частини: метрологічна перевірка первинного перетворювача та метрологічна перевірка вторинного засобу вимірювання електричної величини.

По-перше, це пов'язано з тим, що еталони електричних величин, переважно, мають менші похибки відтворення значення фізичної величини порівняно з еталонами неелектричних величин. По-друге, тривалість перевірки засобів вимірювання неелектричних величин є значно більшим порівняно з засобами вимірювання електричних величин. Так, наприклад, під час метрологічної перевірки перехід від одного значення напруги до іншого триває секунди, максимум десятки секунд, а перехід від одного значення температури до іншого може тривати від десятків хвилин до годин. По-третє, виникає можливість уніфікувати процес метрологічної перевірки засобів вимірювання

електричних величин, оскільки переважно вихідний сигнал первинних перетворювачів неелектричних величин є уніфікованим, наприклад, 0-10 В, 0-20 мА тощо. Отже, із міркувань зручності та швидкості проведення метрологічної перевірки функціональні блоки таких засобів вимірювання перевіряються окремо.

Сьогодення у вимірювальній техніці характеризується появою мікроконтролерів, що дало змогу перенести практично все математичне опрацювання результатів вимірювання з аналогової частини до цифрової. Цим суттєво спрощується аналогова частина конструкції і, як наслідок, зменшується похибка засобу вимірювання. Це наочно демонструється на прикладі вимірювання середньоквадратичного значення напруги. Для її знаходження необхідно вхідний сигнал піднести до квадрату, використавши аналоговий перемножувач, проінтегрувати та взяти корінь квадратний. Похибка такого перетворення у кращому випадку становить 0,5 – 1 %. Завдяки цифровому мікроконтролеру даний розрахунок спрощено, а похибка вимірювання суттєво зменшена. Основне опрацювання даних і отримання результату вимірювання тепер відбувається у мікроконтролері програмним способом.

1.1. Основні одиниці і засоби вимірювання лінійних розмірів

Геометричні розміри – це група понять лінійних та кутових розмірів, площі та об'єму. До лінійних розмірів належить довжина, товщина покриття, відстань між об'єктами, мікронерівність поверхні, тощо. До кутових розмірів відносяться величини - «плоский кут» та «тілесний кут».

Вимірювання лінійних розмірів займає суттєве місце в науці й техніці, зокрема, у приладобудуванні. Завдання вимірювань лінійних розмірів можна розділити на наступні діапазони:

– діапазон від часток мкм до декількох десятків метрів та кутових розмірів: це - вимірювання розмірів деталей, їх відхилень від заданих значень, вимірювання товщини покриття, тощо;

- діапазон від часток метра до сотень метрів при визначенні рівня рідких речовин у резервуарах, ємностях і свердловинах, у баках автомашин;

– вимірювання відстаней між космічними об'єктами в межах від метрів до мільйонів кілометрів.

Основні методами на тепер вважаються електричні методи і засоби вимірювань лінійних розмірів, які поділяються на контактні та безконтактні, а залежно від засад вимірювального перетворення сигналів - на електро-механічні, фізичні та спектрометричні.

У викладеному плані розглянемо насамперед лінійні розміри та їх вимірювання, а далі методи і засоби метрологічного забезпечення при перенесенні розміру одиниці вимірюваної величини від еталону до робочого засобу. Оскільки це величезна сукупність методів і приладів, зупинимось на незначній частці їх та одному лише етапі перенесення – від робочого еталону – до робочого пристрою ЗВТ (ультразвукового сенсора).

Історично склалося визначення метра, як матеріального об'єкту певної довжини, що зберігається у вигляді металевого стрижня, виготовленого із певного матеріалу (так, перший такий еталон виготовлено із латуні у Франції в 1795 р., 1799 р. – із платини і т.д.).

Чинне визначення еталону метра ухвалено на 26-ій Генеральній конференції мір і ваг 2018 року, від 20.05.2019 р. Дане визначення стосується швидкості світла у вакуумі, а саме $c = 299\,792\,458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Через обернено пропорційний вираз приходимо до виразу для одиниці – метра – з допомогою сталих c і Δv в даному випадку для атому цезію. Сутність цього висновку формально зводиться до варіанту визначення, акцептованого раніше Резолюцією 1 17-ої Генеральної конференції з мір і ваг 1983 року. Приведене означення прийнято на підставі міркування, що швидкість світла є фундаментальною фізичною сталою, визначеною точно і без похибки значенням $299\,792\,458 \text{ м/с}$.

Стосовно одиниці «метр», вище приведені визначення означає, що відтепер його значення повинно визначатись експериментально. При цьому, виникає певна похибка. Тобто, для практики встановлення розміру «метра» його слід порівнювати із довжиною хвилі якогось випромінювання. «Метр» є однією із 7-

и основних одиниць Міжнародної системи SI, то завдяки ньому визначаються чимало похідних одиниць.

Поступ у науці в 20-му столітті сформував необхідність точнішого визначення одиниці довжини. Зокрема, завдяки прогресу у спектроскопії, завдяки якій стало реальним визначати одиницю довжини через довжину хвилі світла. Саме тому 11-а Генеральна конференція мір і ваг 1960 р. прийняла таке визначення метра: Метр відповідає $1650\ 763,73$ довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що створеного при переході між рівнями $2p^{10}$ та $5d^5$ атома криптому-86. Це дає змогу прийти до використання оптичних методів і засобів вимірювання лінійних розмірів для вимірювання відстаней і довжин з їх допомогою.

Лінійні вимірювання здійснюються засобами, що обладнані лінійними еталонними мірами та вимірювальними мікроскопами й діють за принципом порівняння еталона й досліджуваної величини. Поділяються на засоби для визначення малих відхилень розміру досліджуваного об'єкта від розміру еталонної міри (оптиметри (рис.1.1), ультраоптиметри й оптикатори) та для безпосередніх вимірювань лінійних параметрів об'єктів через їх порівняння з еталонними штриховими мірами – шкалами (до цієї групи відносяться компаратори, довжиноміри, сферометри, катетометри, вимірювальні машини).

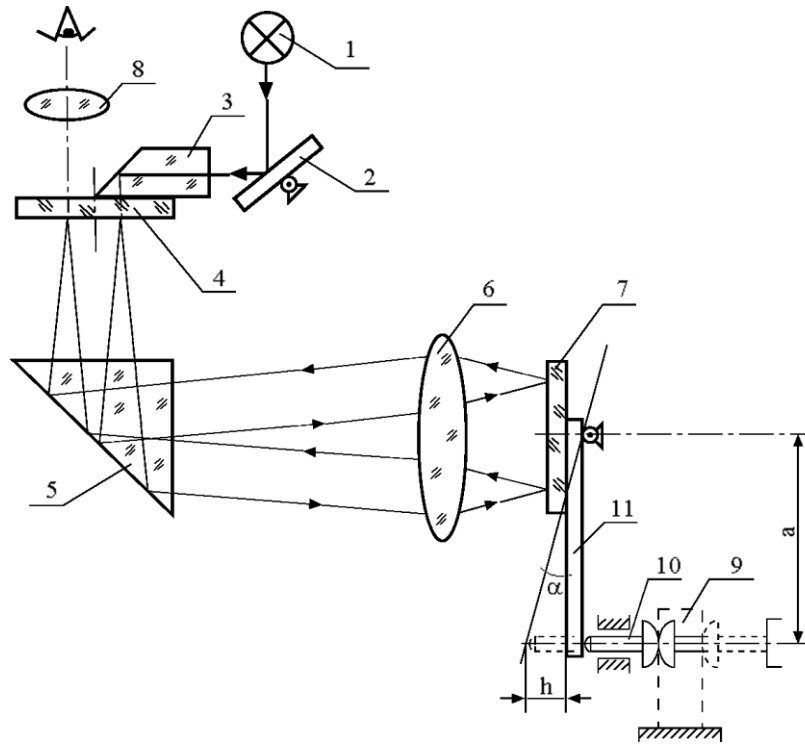


Рис. 1.1. Оптиметр, як засіб вимірювання (з похибкою $\pm 0,0002$ мм для діапазону від 0 до 0,06 мм) та високою чутливістю [3]

Для вимірювань малих переміщень об'єктів використовується явище інтерференції. Засобом, що його реалізує, є інтерферометр.

Інтерферометр Майкельсона. Розглянемо спрощену схему інтерферометра Майкельсона (рис.1.2). Монохроматичне світло від джерела S через діафрагму D та об'єктив O_1 потрапляє під кутом 45° на напівпрозору плоскопаралельну пластинку A . Сторона пластинки, віддалена від джерела, посріблена та напівпрозора, розділяє промінь на два: промінь 1 (відбивається від посрібленої верстви) і промінь 2 (проходить крізь неї).

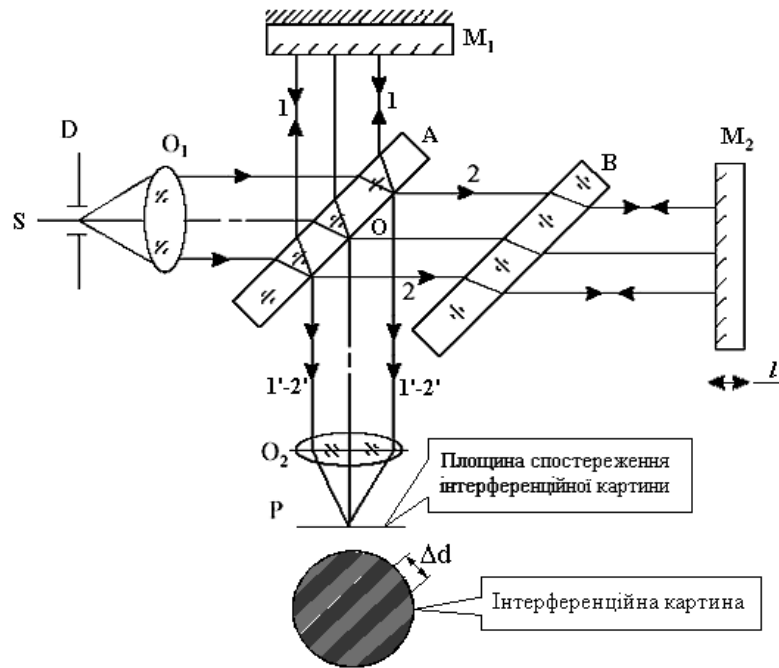


Рис. 1.2. Принцип роботи інтерферометра Майкельсона

Дзеркала M_1 , M_2 – плоскі або кутові призматичні. Промінь 1 відбивається від дзеркала M_1 і повертається назад, знову проходить через пластинку $A(1')$. Промінь 2 направлений до дзеркала M_2 , відбивається від останнього, розвертається і відбивається від пластини $A(2')$. Оскільки промінь 1 проходить пластину A двічі, то для компенсування різниці ходу, яка виникає на шляху другого променя, ставиться пластинка B , яку називають компенсатором. Когерентні хвилі $1'$ та $2'$ сформуєть на пластині A інтерференційну картину, яку через об'єктив O_2 , можна спостерігати на площині P . Оптична різниця шляхів проходження хвиль $1'$ та $2'$ становить $\Delta d = 2n(d_2 - d_1)$, тут n – абсолютний показник заломлення повітря, а d_1 та d_2 – відстані від точки O до дзеркал M_1 та M_2 . Якщо $d_1 = d_2$, тоді матимемо інтерференційний максимум. Зміщення одного із дзеркал на відстань $\frac{\lambda}{4}$ приводить до виникнення інтерференційного мінімуму [3].

Зміщення l викликає відмінність Δd шляхів проходження променів – опорного та вимірювального, а отже, зміну фази коливань світлового променя, яка пов'язана із довжиною оптичного шляху (тобто їх фазове модулювання), а саме: $\Delta d \approx l \sin \beta$, а довжині хвилі λ відповідає повний період обертання вектора інтенсивності I , тобто фазовий кут 2π радіан, тому різниці ходу Δd

відповідає кут $\phi \equiv \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} l \sin \beta = \frac{k}{\lambda} l$. Інтенсивність результуючого випромінення:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\gamma + \frac{k}{\lambda} l\right), \quad (1.1)$$

тут I_1 та I_2 – інтенсивності променів опорної та вимірювальної гілок, відповідно; γ – значення фазового кута перед початком вимірювання; k – інтерферометричний коефіцієнт.

За зміною інтерференційної картини можна дійти висновку про малі переміщення одного із дзеркал (наприклад, M_2 на відстань l) з похибкою близькою до 10^{-11} м.

Світловий еталон метра, побудований з використанням явища інтерференції світла, надав метрові, як природній мірі, змогу піднятися на рівень квантових еталонів, покращивши точність його відтворення у 100 і більше разів. Це – особливо важливо для приладобудування та робототехніки. За допомогою удосконаленого еталону Метра можна забезпечити його точність відтворення щонайменше 10^{-9} (замість 10^{-7} з допомогою штрихової міри [4]). Зазначений стандарт стосується Державної повірочної схеми для засобів вимірювання довжини в діапазоні довжин від $1 \cdot 10^{-9}$ м до $1 \cdot 10^5$ м при довжинах хвиль випромінювання, що знаходиться у діапазоні лінійних розмірів від 0,2 мкм до 50 мкм (додатки А-Д). Він дає формулювання та визначає роль Державного первинного еталона одиниці довжини, комплексів ЗВТ, що включені до його складу, а також «основні метрологічні характеристики еталона та порядок передавання розміру одиниці довжини від державного еталона за допомогою вторинних та робочих еталонів робочим засобам вимірювальної техніки з зазначенням похибок та основних методів повірки (калібрування). Повірочна схема складена із 5-и частин:

— Частина 1. Джерела випромінювання та засоби вимірювання довжини хвиль (додаток А);

— Частина 2. Штрихові міри довжини та вимірювачі переміщень (додаток Б);

— Частина 3. Плоскопаралельні кінцеві міри довжини та вимірювальні кільця (додаток В);

— Частина 4. Віддалеміри та приймачі супутникових навігаційних систем (додаток Г);

— Частина 5. Засоби мікроскопії, вимірювачі нанопереміщень та міри розмірних параметрів наноструктур (додаток Д) [4].

У дисертаційній роботі нас цікавлять Частини 1, 4 (оскільки працюємо з віддалемірами) та частково Частина 5, позаяк лазерний інтерферометр можна віднести і до неї.

Сам «Державний первинний еталон призначено для відтворювання, зберігання та передавання розміру одиниці довжини вторинним еталонам, робочим еталонам та робочим засобам вимірювальної техніки методом звірення за допомогою компаратора, звіренням за допомогою мір порівняння, методом прямих вимірювань та методом безпосереднього звірення» [4]. При цьому, в основу вимірювань кладуть одиницю, яка відтворюється еталонами. В п.2.1.3 вказано комплекс технічних ЗВТ, які входять до складу еталону. Це, зокрема, стабілізовані гелій-неонові лазери. Не вникаючи у його будову, оскільки у подальшому розглядається наш вторинний еталон 2-го розряду, підкреслю, що саме вищевказаний лазер входить основним структурним елементом у наш еталон. Тому базуючись на ідентичних вихідних метрологічних характеристиках, у даному разі, на тій самій довжині хвилі стабілізованого когерентного джерела світла, має право залучити лазерний інтерферометр, як вторинний еталон, для подальшого перенесення розміру одиниці довжини до промислового ЗВТ, як є ультразвуковий сенсор.

Державний еталон метра залучають для передавання розміру одиниці довжини вторинного еталону, далі до робочого еталону, і т.д. аж до робочим ЗВТ вимірювачам лінійних переміщень методами прямих вимірювань та безпосереднього звірення. Вторинним еталонами може служити комплекс ЗВТ, який складається із лазерів зі стабілізованою частотою у діапазоні від 0,3 до 11 мкм. Його застосовують для передачі розміру одиниці робочим еталонами 2-го розряду у якості яких в даній роботі використовується лазерний інтерферометр.

Як робочий еталон 2-го розряду застосовують вимірювачі довжини хвиль лазерів у діапазоні від 0,4 до 4,0 мкм. Для них межі допустимої відносної похибки не повинні перевищувати значень 10^{-8} – 10^{-3} , залежно від засобів спектrometerії.

Робочі ЗВТ, част.2, до яких відносяться вимірювачі лінійних переміщень в межах від 1 мм до 50 м; у них межі допустимої абсолютних похибок не повинні перевищувати значень 0,05 мкм – 20,2 мм.

Нижче, у розділах 2 та 3 детальніше обґрунтовуються метрологічні характеристики, як робочого еталону 2-го розряду, яким обрано лазерний інтерферометр зі стабілізованою частотою роботи гелій-неонового лазера, так і робочого ЗВТ 2-го розряду – ультразвукового смарт-сенсора з можливістю переналаштування метрологічних характеристик.

1.1.1. Основні характеристики засобів вимірювання лінійних розмірів

Робота кожного приладу характеризується, незалежно від будови та вимірюваної величини, декількома основними характеристиками, поданими нижче.

Перша характеристика - діапазон вимірювання. Для аналогових приладів діапазон вимірювання відповідає відхиленню стрілки до кінцевих позначок шкали, а для цифрових приладів - максимальним значенням, зафіксованим на полі відліку.

Друга характеристика - чутливість вимірювального приладу, визначена як відношення зміни показів до достатньо малої зміни вимірюваної величини, що зумовлює зміни показів.

Отримані результати зазвичай використовуються за умови, що апріорі знають похибок або/і непевності вимірювань [1, стаття 10]. Похибка змінюється від діапазону вимірювань та багатьох інших факторів. Практично, вона лежить в області «невизначеності» або «непевності», притаманній кожному конкретному приладові.

Третя характеристика – відтворюваність, тобто здатність ідентичного відліку під час почергового вимірювання тієї самої величини з незмінним

амплітудним значенням. Вона, як і стабільність вимірювального засобу, що характеризує здатність засобу вимірювання зберігати незмінними у часі основні метрологічні характеристики, донедавна вважалася кращою в аналогових приладах. Внаслідок поширення напівпровідникових технологій переваги набули цифрові прилади, зокрема, з автоматичним калібруванням під час проведення вимірювань. Задовільних результатів досягнуто завдяки впровадженню конструкцій з високоточним підбором номіналів резисторів, конденсаторів тощо та реалізації їх попереднього старіння.

У цілому, зазначені параметри приладів, що випускаються значними партіями, можна передбачити і описати класом приладу та гарантією виробника. Гарантія стосується часу, впродовж якого вона є чинною, а сам прилад зберігає свої основні параметри та характеристики і, понад усе, клас точності. Виробник несе відповідальність за прилад лише тоді, коли умови його експлуатації відповідають існуючим нормам, в тому числі вказаним у паспорті чи інструкції. При цьому, повна тривалість користування приладом може бути значно більшою від гарантійного терміну, але клас точності приладу поза гарантійними межами невідомий і, в кращому випадку, потребує додаткового вивчення спеціалістами. Останні встановлюють поправки, які повинні враховуватись при подальшій експлуатації даного засобу вимірювання (поза гарантійним терміном).

Коли порівнювати норми та особливості експлуатації аналогових і електронних вимірювальних приладів, то можна зауважити, що норми та вимоги стосовно правил експлуатації електронних приладів є значно строгішими. Останні — суттєво швидші, багатодіапазонні, з незначною похибкою та можливістю застосування математичного апарату до обрахунку числа імпульсів відліку.

Доступність та поширеність персональних комп'ютерів з їх програмним забезпеченням зумовили виникнення новітніх концепцій вимірювання, а також проектування та виготовлення складних вимірювальних приладів і систем.

Сучасний вимірювальний прилад має чотири функціональні блоки: блок збирання та накопичення даних; блок їх перетворення, блок генерування вибірок та блок візуалізації даних. Крім того, виділеною вважається операція перевірки

технічних і, особливо, метрологічних характеристик цього приладу; вона переважно виконується в окремо виділений час з використанням спеціалізованого обладнання навченими спеціалістами. Разом з тим, переважно вимірювання параметрів технічно складних об'єктів, як, наприклад, енергогенеруючі станції та інші, здійснюється багатьма однотипними (термометри) або й різнотипними (вольтметри, амперметри, ватметри тощо) засобами вимірювань. У такому разі метрологічна служба підприємства повинна організувати їх узгоджене й ефективне використання за призначенням, що досягається шляхом створення інформаційно-вимірювальних комплексів.

Останнім часом набули поширення смарт-засоби вимірювальної техніки, які передбачають у значній мірі реалізацію багатьох функцій метрологічної служби підприємства, регіону, тощо за рахунок додатково вбудованих у прилад блоків і, навіть, вбудованих мікросхем або вбудованих кодо-керованих мікросхем [5].

Разом, вони формують розпорошені інформаційно-вимірювальні системи (рис.1.3), які набувають віднедавна функцій розпорошених кібер-фізичних систем, що контролюють окремі метрологічні характеристики. Передусім, останні у смарт-сенсорах забезпечуються додатковими розумними функціями, що виражаються у впровадженні операцій само- :[6] і детально обговорюється у [7].

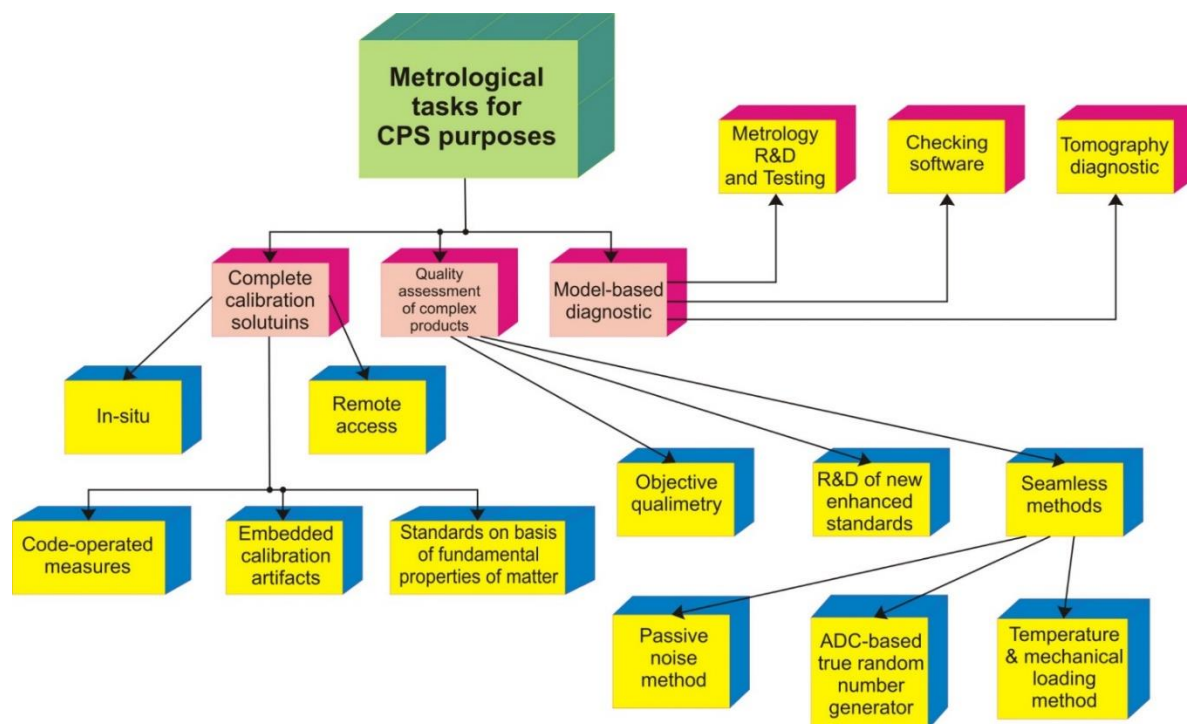


Рис.1.3. Метрологічні аспекти розвитку кібер-фізичних систем [7]

Похибки засобів вимірювальної техніки

Значення вимірюваної фізичної величини, отриманої за показами приладу A_x , відрізняється від значення дійсної величини A_d . Ця різниця називається абсолютною похибкою Δ : $\Delta = A_x - A_d$. Для її компенсації (у випадку, коли ця похибка є систематичною, наприклад при зважуванні за відсутності об'єкта зважування, стрілка ваги не встановлюється проти відмітки «0») вводиться поправка $p = -\Delta$, яка дорівнює абсолютній похибці з протилежним знаком. Це є значенням, на яке слід змінити показ приладу, щоб отримати дійсне значення вимірюваної величини.

Якісні характеристики вимірювання краще описуються відносною похибкою, що виражається у відсотках від вимірюваного значення, тобто:

$$\delta = \frac{\Delta}{A_d} 100 = \frac{A_x - A_d}{A_d} 100. \quad (1.2)$$

Основна похибка вимірювального приладу – це значення відносної похибки за номінальних параметрів середовища, визначених технічними умовами на даний прилад [9].

Для електромеханічних приладів, як номінальні параметри середовища, приймаються – температура 23°C (з допустимим відхиленням $\pm 2^{\circ}$); відносна вологість 40-60%; частота 50 Гц (з відхиленням ± 5 Гц); положення згідно з вимогами, наведеними на циферблаті приладу (горизонтальне , вертикальне \perp чи під кутом (з допустимим відхиленням 5°)).

Точність вимірювального приладу визначається відносною похибкою δ_m , що виражається у відсотках від максимального значення шкали приладу A_m , і називається класом точності засобу вимірювання (γ), наведеним у правому нижньому кутку шкали приладу. Вказана похибка визначається з виразу:

$$\delta_m = \frac{\Delta}{A_m} 100 = \frac{A_x - A_d}{A_m} 100 \quad (1.3)$$

Сама точність T – це модуль оберненої відносної похибки, що виражається у безрозмірних одиницях $T = \frac{1}{|\delta_m|}$. До прикладу, прилад класу точності 0,2 (%) = 0,002 характеризується високою точністю: $T = 1/0,002 = 500$; тоді як прилад класу точності 2,5 % = 0,025 характеризується низькою точністю: $T = 1/0,025 = 40$.

Допустиме значення основної похибки дорівнює класу точності засобу вимірювання. Міжнародною нормою [9] передбачено класи точності 1; 3; 5, а також їх десяти кратності й підкратності (0,1; 0,3; 0,5). Крім того, допустимими класами точності вважаються також 0,2; 1,5 та 2,5. Наприклад, для засобу класу 1 максимальне значення основної допустимої похибки становить 1%. У вимірювальних приладах, що працюють за нестандартних умов (зміна температури $\pm 10^\circ$, зміна частоти $\pm 10\%$, кут нахилу понад 5°) слід вводити поправку у значення основної допустимої похибки.

Для високоточних вимірювань, або ж у процесі перенесення розміру одиниці певної величини, що призводить до калібрування певного ЗВТ, здійснюють аналіз похибок вимірювання, намагаючись мінімізувати їх вплив. Кінцевою метою аналізу похибок вимірювань вважають [3] оцінювання границь, в межах яких знаходиться дійсне значення похибки. Результат вимірювання разом з інтервалом, що визначається границями похибки вимірювання, покриває з певною вірогідністю істинне значення вимірюваної величини.

Незнання істинного значення і неможливість встановлення похибки вимірювання зумовили створення міжнародними організаціями з метрології нормативних документів, де для оцінки якості вимірювань застосовується термін «непевність» (uncertainty – engl.) результату вимірювання. Офіційне визначення: непевність – це пов'язаний з результатом вимірювання параметр, що стосується розсіювання значень, які можна приписати вимірюваній величині.

Метрологічне забезпечення вимірювання лінійних розмірів та методика опрацювання результатів вимірювань

Вимірювані величини можуть змінюватись у часі; за характером змін у часі вимірювані величини відносять до статичних і динамічних.

Статичними називаються величини, значення яких встановлюються незалежно від часу, принаймні на період проведення вимірювань. Динамічними вважаються величини, що змінюються у часі під час проведення вимірювань. В обох випадках маємо справу із детермінованими величинами, які змінюються у передбачуваний спосіб.

З метрологічної точки зору найважливішою вважається систематика за способом порівнювання досліджуваних величин із взірцями. В цьому випадку можна твердити про існування прямого вимірювання, а у випадку заміни конкретної величини іншою, що підлягає теж безпосередньому вимірюванню, говорять про посередні або непрямі методи [10].

Приклад: Прямий або безпосередній метод - зважування об'єкта на коромисловій вазі, де еталонами порівняння виступають попередньо відкалібровані тягарці - гирки. Непрямий метод - зважування цього самого об'єкта на пружинній вазі.

Встановлення рівності досліджуваної величини еталонній (взірцевій) вимагає використання обладнання, що дає змогу об'єктивно твердити про їх абсолютну або приблизну рівність, а також про інтерполяцію між найближчою чи якоюсь конкретно вибраною величиною, більшою чи меншою за вимірювану. Перший випадок стосується "нульового" методу порівняння величин, другий - "різницевого" методу. У крайньому разі, коли прилад сам на власній шкалі здатний вказувати всі вимірювані значення в певних границях, отримуємо метод відхилень (тут прикладом служить та сама пружинна вага), який вирізняється у гірший бік точністю вимірювань, проте у кращий бік зменшенням часу вимірювання.

На відміну від вказаного, посереднє вимірювання вважається методом пізнання, що включає вимірювання інших величин і встановлення шуканої величини на підставі висновків із використання певних мір (еталонів).

Методи посереднього вимірювання часто застосовуються у вимірюваннях динамічних процесів, коли тривалість вимірювань має бути якомога коротшою, так як сама вимірювана величина інтенсивно змінюється. Поступовий підбір вартостей взірців, притаманний безпосереднім методам, тут не підходить, навіть, якщо автоматизувати їх зміну.

Області застосувань прямих та непрямих методів не є чітко розділеними. Вони змінюються залежно від удосконалення вимірювальних приладів та техніки й технології зняття відліків. Істотне ущільнення активних елементів напівпровідникової техніки й зумовлена цим поява інтегральних схем,

процесорів, чіпів тощо призвели до домінування непрямих методів вимірювання, що вимагають автоматизації та складних обчислень, проте значно скорочують тривалість вимірювань.

З-поміж непрямих методів найбільшого поширення набули методи, де будь-яка вимірювана величина перетворюється у електричну напругу / струм.

Приклад: непрямий метод – електричне вимірювання температури вимірюванням термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС).

Компенсаційний метод вважається надзвичайно важливою різновидністю нульового методу. Його відмінною рисою є зменшення до мінімуму споживання енергії вимірюваної величини, що дає змогу вимірювати характерні риси явищ / об'єктів в обсягу мікроскопічних енергій, зужитих у процесі вимірювання. Ця властивість є особливо важливою, оскільки у самому визначенні акту вимірювання закладено вимогу не змінювати, при цьому, властивості контрольованого явища/об'єкта. Такі зміни фіксуються завжди, оскільки прилади, призначені для проведення вимірювання, споживають енергію, порівнювану з енергією вимірюваного явища/об'єкта. Суттю компенсаційного методу є заміна енергії, необхідної для здійснення експерименту й отримуваної від контрольованих явищ/об'єктів, енергією, що постачається з допоміжного джерела.

Приклад: найкраще використовувати компенсаційні методи для вимірювань електричних, електромеханічних, пневматичних та інших величин.

Розвиток методології вимірювання здійснюється в напрямку, визначеному реальними потребами вимірювань найскладніших об'єктів і швидкоплинних процесів із урахуванням загальних тенденцій розвитку техніки вимірювання й обчислення, а також технологій їх реалізації. Для сьогодення характерним є поєднання методології вимірювання та технології обчислення.

Вищевикладене створило підстави для появи та розвитку пожежних сповіщувачів 3-го покоління, які оснащені мікроконтролерами на відміну від автоматизованих сповіщувачів 2-го покоління, виконаних на елементах транзисторно-транзисторної логіки. Мікроконтролери представляють собою спрощені мікропроцесори, додатково оснащені багатьма допоміжними

функціями. Завдяки цьому комбіновані сповіщувачі 3-го покоління спроможні забезпечити отримання інформації у цифровому вигляді від власних різнотипних давачів, її ефективний числовий аналіз та передавання сформованого у сповіщувачі сигналу про виникнення небезпечної ситуації (пожежі чи вогнища займання).

1.2. Еталонні засоби та передавання розміру одиниці

Разом з тим, еталонний засіб та калібрований прилад формують інформаційно-вимірювальну систему [11]. При цьому, контрольований параметр може послідовно передаватись на еталон та на калібрований прилад, а може одночасно подаватись на них. У даній дисертаційній роботі використовується саме останній підхід. Тут контролюється відстань до проміжкового екрану, встановленого між еталонним та каліброваним засобами. Так-що між показами обидвох існує зівпадіння.

Інформаційно-вимірювальна система - це сукупність засобів вимірювання й допоміжних пристроїв, призначених виконувати певне метрологічне завдання в межах конкретного методу вимірювання та при конкретному способі організації обладнання. Саме інформаційно-вимірювальні системи необхідні для опрацювання різнорідної інформації при калібруванні ультразвукового сенсора з допомогою лазерного інтерферометра [12]. Тут слід вивчати, порівнювати та зіставляти покази засобів контролю температури, тиску, об'єму, задимленості, сигнали ввімкнення та вимкнення потужного енергетичного обладнання тощо [13].

Побудова (опрацювання та реалізація) настільки складних систем, як інформаційно-вимірювальні, вимагає створення практичних методів, відмінних від існуючих дотепер. Вимірювальні прилади проектуються для вимірювання конкретних фізичних величин.

На підставі подальшого аналізу роботи системи, аналізу проходження сигналу чи інформації приступають до оптимізації роботи системи. Сукупність вимірювальних приладів, що формують систему, можна подати у вигляді "чорного ящика", на вхід якого поступає багатовимірний сигнал X , що містить

інформацію про досліджуваний вектор стану явища, а на виході фіксується такий самий багатовимірний сигнал $У$. При цьому, він повинен бути так перетвореним стосовно вхідного сигналу, щоб його інформативність була доступною міркуванню людини або щоб стало можливим записати сигнал, а також опрацювати його обчислювальним пристроєм (останній часто виступає складовою частиною інформаційно-вимірювальної системи).

Реально на вхід поступають сигнали, що характеризують вологість, температуру, тиск, задимленість тощо. Ці різні сигнали перетворюються, бажано, без втрат і спотворень в уніфікований багатовимірний, найчастіше, електричний сигнал. Останній проходить наступними ланками системи, де почергово може порівнюватись із взірцевим сигналом (так працюють асоціативні обчислювальні системи) за виглядом, амплітудою тощо, при умові їх попереднього узгодження. Сигнал, що утримує закодовану інформацію про співвідношення досліджуваної і взірцевої величин, підлягає повторному опрацюванню на виході системи. При цьому, система може складатися із значної кількості розпоршених метрологічних пунктів-станцій, кожен з яких оснащений власними смарт-сенсорами, що контролюють різні властивості (рис.1.4.) [7].

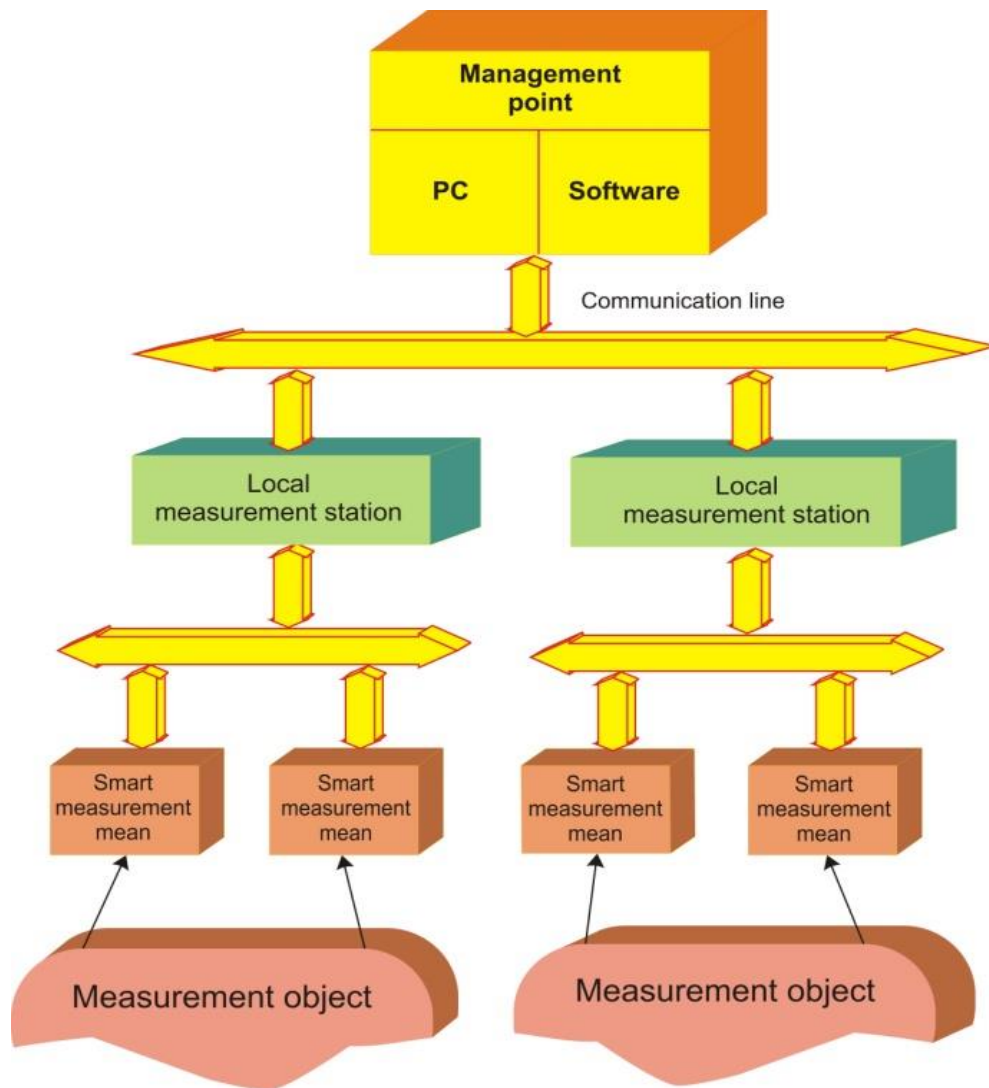


Рис.1.4. Кібер-фізична систем, що складається із значної кількості розпоршених метрологічних станцій, які контролюють окремі об'єкти з допомогою розумних метрологічних інструментів [7]

1.3. Сучасні вимірювання лінійних розмірів на базі смарт-метрології

До геометричних розмірів, як групи вимірювальних параметрів, відносяться лінійні та кутові розміри, площа та об'єм. Причому, до лінійних розмірів належать «довжина», «товщина покриття», «відстань між об'єктами», «шорсткість поверхні», тощо. Щодо кутових розмірів, тут визначальними є «плоский кут» та «тілесний кут» [14]. Вимірювання останніх здійснюються доволі часто в різних галузях науки та техніки, зокрема, в дрона-будуванні й

використанні та робототехніці, де відносна кількість вимірювань цих величин досягає 80% всіх вимірювань.

При цьому, вимірювання лінійних та кутових розмірів розділяють на групи вимірювань:

- у діапазоні від часток мікрометра до декількох десятків метрів та кутових розмірів - від 0,1" до 360°. Вимірювання тут стосуються розмірів деталей, їхніх відхилень від заданих значень, контролю шорсткості поверхонь, визначення товщини покриттів;

- у діапазоні від часток метра до сотень метрів при визначенні рівня рідко- і твердо- фазних речовин у резервуарах та ємностях, включаючи рівень пального в баках автомашин;

- встановлення просторових координат об'єктів та відстаней між об'єктами, зокрема між космічними об'єктами, що знаходяться на відстанях від одиниць міліметра до мільйонів кілометрів.

Останньо в силу інтенсивного розвитку мікро- і нано- електроніки та нанотехнологій в цілому суттєво оновились технологія вимірювань лінійних та кутових розмірів. Внаслідок прогресу фотолітографічних методів в конструюванні мікропроцесорів і мікроконтролерів і одночасно розвитку найновішого прикладного наноматеріалознавства (поява 2d-мірних наноповерхонь) досліджуються і впроваджуються методи вимірювань, які ще раніше видавалися неможливими. Такими є розроблення і впровадження нановимірювальних в водночас нановиробничих машин, до прикладу в Технічному університеті м. Ільменау, Німеччині. Революція у метрології призвела до появи Метрології 4.0 [15], яка розвинулась одночасно зі черговою промисловою революцією і тому отримала вказану назву.

Одним з її наочних результатів стала поява унаслідок розвитку цифрових технологій, як і мініатюризації «розумних» сенсорів [16]. Інтелект, необхідний цим сенсорам, з'явився завдяки мікроконтролерам (MCU), процесору цифрового сигналу, специфічній інтегральній схемі ASIC або програмованій користувачем вентиляційній матриці. Перед появою мікроелектроніки сенсори або перетворювачі, які використовувались для вимірювання фізичних величин, таких як

температура, тиск або витрата, зазвичай були безпосередньо пов'язані з пристроєм зчитування. Перетворювач перетворив вимірювану фізичну величину в переміщення. Технології ініціювали потребу у сенсорах з електричним виходом. Це вимагало перетворення аналогового сигналу в цифровий формат для надходження до контролера. Сьогоднішні аналого-цифрові перетворювачі - ADC, як правило, мають джерело живлення 5 В, що продиктувало напругу живлення для багатьох посиленних та сигналізованих датчиків.

Визначення розумного сенсора, прийняте Комітетом Інституту інженерів з електротехніки та електроніки - IEEE 1451.2, визначає розумний сенсор як такий, що «надає функції, які перевищують обсяг, необхідний для правильного подання вимірної величини. Ця функція, як правило, спрощує інтеграцію перетворювача в аплікації в мережевому середовищі» [17].

Що робить сенсор «розумним»? Дуже часто це означає наявність мікроконтролера або мікропроцесора. Однак це є необхідною, але недостатньою умовою. Іноді мікроконтролер використовується лише для обчислення за заданими рівняннями. Якщо говорити про інтелектуальні сенсори, то різні інтелектуальні функції означають самоперевірку, самодіагностику, самоадаптацію, самоідентифікацію, самокалібрування, самокомпенсацію, само- і т.д... Часто розумний сенсор не може мати жодної інтелектуальної функції, як і інтелектуальний сенсор може не бути розумним. З іншого боку, інтелектуальна сенсорна система може базуватися на будь-яких сенсорах, а не тільки на розумних чи інтелектуальних.

1.3.1. Локаційний метод вимірюванні відстані

Найточнішими методами вимірювань відстаней між об'єктами є спектрометричні методи, зокрема метод локації, що базується на вимірюванні часу пролітання вимірюваної відстані променем світла з відомою швидкістю. Реалізація зазначеного методу можлива з використанням випромінювань різної довжини хвилі: тут часто визначальними є методи радіо-, оптичної або акустичної локації. Локаційний метод використання звукових та ультразвукових хвиль відносять до ехозвукової різновидності.

У такому випадку джерело випромінювання служить нульовою точкою відліку відстані, а приймач знаходяться на іншому боці вимірюваного розміру; замість нього може використовуватись спеціальний відбивач або ж межа контрольованого об'єкту [3].

Досліджуваний нижче у дисертаційній роботі ультразвуковий сенсор вимірювання відстані, що промислово випускається фірмою IFM [18], працює, як локаційний ЗВТ.

У сенсорі використовується локаційний метод в його імпульсній різновидності. На рис. 1.5 наведена спрощена структурна схема оптичного локаційних світловіддалеміра, робота якого базується на використанні імпульсного випромінювання. Таким самим чином, працює і ультразвуковий віддалемір.

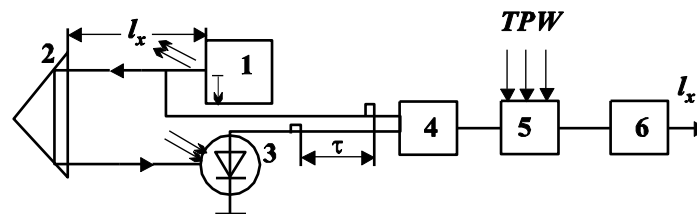


Рис.1.5. Структурна схема оптичного локаційних світловіддалеміра та його робота

1.3.2. Калібрування сенсорів та його необхідність

Згідно з медичних досліджень в галузі вимірювання температури [19] нормальна температура людського тіла становить 37,0 °С. Вона різниться від людини до людини, рівня активності людини та часу доби. Тому діапазон від 36,1 до 37,3 °С вважають прийнятним. Відповідно до експериментованих результатів, показ термометра повинен бути відкаліброваним під зазначене значення. У таблицях 1.1-1.2 наведено значення температури тіла без калібрування та з калібруванням ЗВТ та з порівнянням зі стандартним показанням.

Таблиця 1.1. Зчитані дані температури тіла без попереднього калібрування термометра

пацієнт	Стандартне значення T	Виміряне значення T	Похибка відносна, %	Стандартне значення T	Виміряне значення T	Похибка відносна, %
П1	36,5	36,0		36,6	36,1	
П2	36,2	35,6		36,2	35,6	
П3	36,9	36,3		37,0	36,3	
П4	36,1	35,6		36,3	35,8	

Таблиця 1.2. Зчитані дані температури тіла за наявності попереднього калібрування термометра

пацієнт	Стандартне значення T	Виміряне значення T	Похибка відносна, %	Стандартне значення T	Виміряне значення T	Похибка відносна, %
П1	36,4	36,2		36,6	36,3	
П2	36,3	35,5		36,4	36,2	
П3	36,8	36,5		37,0	36,7	
П4	36,0	35,8		36,2	36,0	

У таблицях, приведених вище, відносна похибка вимірювання оцінюється, як: «виміряне значення – стандартне значення, розділене на стандартне значення $\times 100\%$, де стандартне значення - це покази зразкового термометра».

Висновки до розділу 1

У розділі розглянуто та вивчено особливості вимірювання та відтворення одиниці довжини (лінійного розміру), а також досягнення метрологічної єдності вимірювань у діапазоні довжин від 10 нм до 100 мм. Для цього досліджено методи і засоби вимірювань, їхні характеристики, області застосувань та можливості використання більш досконалих засобів вимірювальної техніки, а саме робочих еталонів, для калібрування промислових засобів вимірювання лінійних розмірів. Вивчено також можливості та метрологічні характеристики ЗВТ різного технічного спрямування та застосування, описано можливості їх самоперевірки, самокалібрування, самоверифікації та внесення поправок у градувальні характеристики. Показано, що актуальним завданням сьогодення можна вважати саме організацію забезпечення передавання розміру одиниці довжини в різних частинах Схеми передачі розміру, а саме від робочих еталонів до промислових ЗВТ (Додаток 1).

При цьому, важливим вважається перехід на використання вбудованих еталонів [20], а також так-званих «внутрішніх» (intrinsic) [21] еталонів. Останні часто будуються на основі використання квантових ефектів, як для генерування високостабільного опорного сигналу [22], так і для безпосереднього використання фізичних сталих речовини [23] для забезпечення значення міри фізичної величини.

Тут прикладом, окрім одиниці довжини, може служити навіть одиниця електричної потужності [24], виражена через значення двох частот, прив'язаних відповідно до напруги та струму. Частота, як знаємо [25], вимірюється найточніше з усіх фізичних величин. При цьому, для її практичного відтворення на місці розроблено, впроваджено і використовується спеціальний ЗВТ на основі комп'ютера [26], де реалізовано ефект «гребінки» [27].

Таким чином, для практичної передачі розміру одиниці довжини на рівні від робочого еталону до промислового засобу вимірювання, у роботі запропоновано зосередити увагу на лазерному інтерферометрі, як прикладній реалізації робочого еталону одиниці лінійного розміру, та на ультразвуковому

смарт-сенсорі, як на промисловому ЗВТ, що може служити сенсором, до прикладу, у робототехніці [28].

Особливо важливим представляється використання смарт-сенсорів ультразвукового ряду для контролю відстаней при використанні груп дронів, коли застосовується спеціальні алгоритми керування їх польотом у групі і вони, до прикладу повинні здійснювати одночасно розворот, як зграйка риб, не порушуючи строю і місця у групі.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА РОБОЧИЙ ЕТАЛОН ВИМІРЮВАННЯ ОДИНИЦІ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ

Інтерферометри – це вимірювальні прилади, в яких використовується інтерференція хвиль. Беручи за основу довжину хвиль на яких працює інтерферометр, можна розрізняти акустичні інтерферометри, що працюють на звукових хвилях, та інтерферометри для роботи на електромагнітних хвилях. Тут існують оптичні інтерферометри (ультрафіолетової, видимої і інфрачервоної областей спектра) і радіохвильові інтерферометри. Причому оптичні інтерферометри є більше поширеними.

Застосовуються інтерферометри вельми широко. Так, акустичні інтерферометри і радіоінтерферометри застосовують для визначення швидкості поширення хвиль (акустичних хвиль та радіохвиль), для встановлення відстані між двома випромінювачами або ж між випромінювачем і контрольованим об'єктом, тобто застосовуються як далекоміри.

Розглянемо найпоширеніші оптичні інтерферометри. Їх залучають у спектроскопії для вимірювання довжин хвиль лінійчатих спектрів, для контролю показників заломлення, до прикладу, матеріалів оптичних кабелів та якості оптичних деталей, у металообробці для визначення розмірів, у астрономії для встановлення кутових розмірів зірок, тощо. Засади роботи інтерферометрів – однозначні – інтерференція 2-х пучків світла тої самої когерентності та часто і довжини хвилі або спектру (тепер часто використовують інтерферометрії білого світла.

Тобто, в основу роботи інтерферометрів покладено просторове розділення пучка світла за допомогою спеціального пристрою з метою отримання двох або більше взаємно когерентні промені, направлення їх різними оптичними шляхами (неоднакові довжини) з наступним зведенням до купи і фіксуванням результату інтерференції. Інтерференційна картинка залежить від багатьох факторів (особливості розділення вихідного пучка на окремі когерентні підпучки, їх кількість та інтенсивність, спектр пучка.

Існує чимало методів формування когерентних пучків інтерферометром, що визначається конструкцією інтерферометра. За кількістю пучків інтерференції світла оптичні інтерферометри можна розділити на двопроменеві і багатопроменеві. Останні використовуються, головним чином, для вивчення тонкої структури спектрів, тоді як двопроменеві інтерферометри є, в основному, технічними приладами або засобами вимірювань.

Розглянемо детальніше їх метрологічні характеристики та методологію досліджень, щоби орієнтуватись у специфіці досліджень і забезпечення цих характеристик.

Рис.2.1. Основи лазерної вимірювальної техніки

2.1. Лазерні інтерферометри та лазерна інтерферометрія

Лазерна інтерферометрія розпочиналася від побудови лазера, як такого (рис.2.1).

Лазерна вимірювальна техніка:вступ (основи)

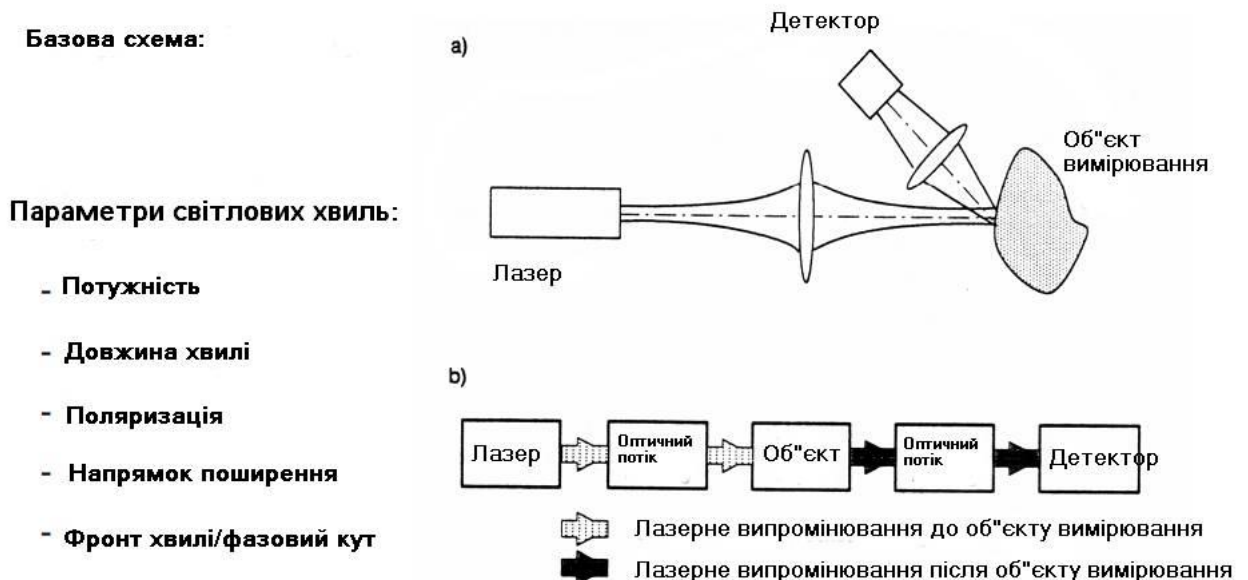


Рис.2.1. Схема роботи лазерного далекоміра

Дані вимірювачі відстані називаються вимірювачами інтерферометричного типу. Тут основними засадами роботи вважаються:

- Оптичне випромінювання джерела світла розділяється принаймні на 2 групи або пучки;
- Відбувається зсув фази принаймні одного пучка при його проходженні крізь газове середовище, або ж при його відбиванні між межі розділу 2-х середовищ;
- Створюються умови для змішування 2-х пучків світла від того самого джерела, причому один пучок – видозмінений за характеристиками. Як наслідок, отримуємо результуючий пучок у вигляді сукупності чорно-білих рисок (для монохроматичного вихідного випромінювання).

Будова газового лазера



Рис.2.2. Особливості будови гелій-неонового лазера

Гетеродинний інтерферометр

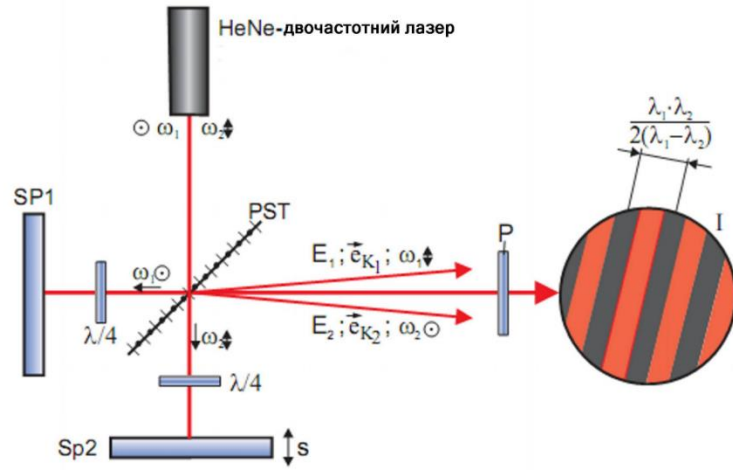


Рис.2.3. Лазерний інтерферометр

Модель інтерференційної картини

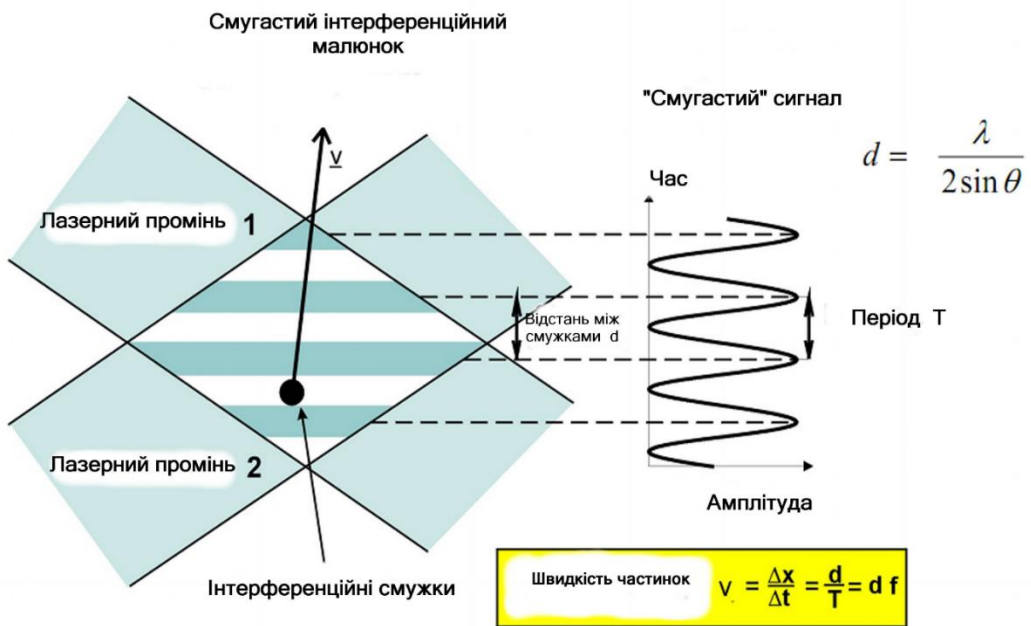


Рис.2.4. Модель інтерферометричної картини

2.1.1. Стабільність частоти роботи лазера і похибки вимірювання

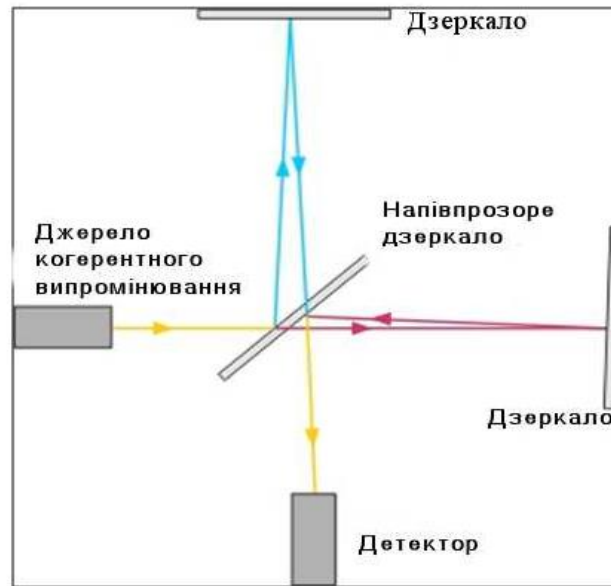


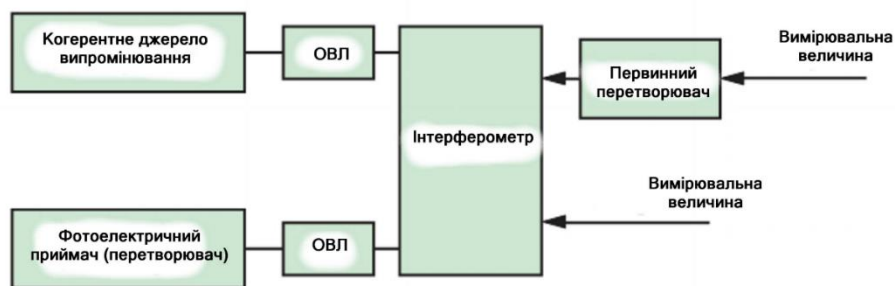
Рис.2.5. Інтерферометр Майкельсона

**ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ
ІНТЕРФЕРОМЕТРА МІХЕЛЬСОНА**

- Нерухоме дзеркало порівняння і рухоме вимірювальне дзеркало
- Вимірювання шляхом підрахунку максимумів, або мінімумів
- Інтенсивність $I = I_{\max} \cdot \cos^2\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta s\right)$
- Роздільна здатність: до 10 нм при діапазоні вимірювання понад 10 м при можливій швидкості досліджуваного процесу до 10 м/с
- На практиці: використовуються одно- і двочастотні лазери
 Двочастотний лазер: лазер випромінює дві взаємоперпендикулярні електромагнітні хвилі з $\Delta f = 2 \text{ bis } 700 \text{ MHz}$
 \Rightarrow переміщення вимірювального дзеркала приводить до зміщення частоти інтерференційної картини в залежності від напрямку
 \Rightarrow визначення напрямку переміщення досліджуваного об'єкту
- Невизначеність вимірювання в основному через коефіцієнт заломлення середовища по ходу променів лазера, і визначається як:
 $n(\text{Luft}) = f(p, T, \text{Gaszusammensetzung})$
Bsp.: $\Delta T = 1^\circ\text{C} \Rightarrow$ вим. невизначен. $\approx 1 \mu\text{m/m}$

Рис.2.6. Особливості та характеристики інтерферометра Майкельсона.

Компоненти лазерних інтерферометричних сенсорів



ОВЛ - оптоволоконна лінія

Рис.2.7. Блок-схема лазерного інтерферометричного сенсора

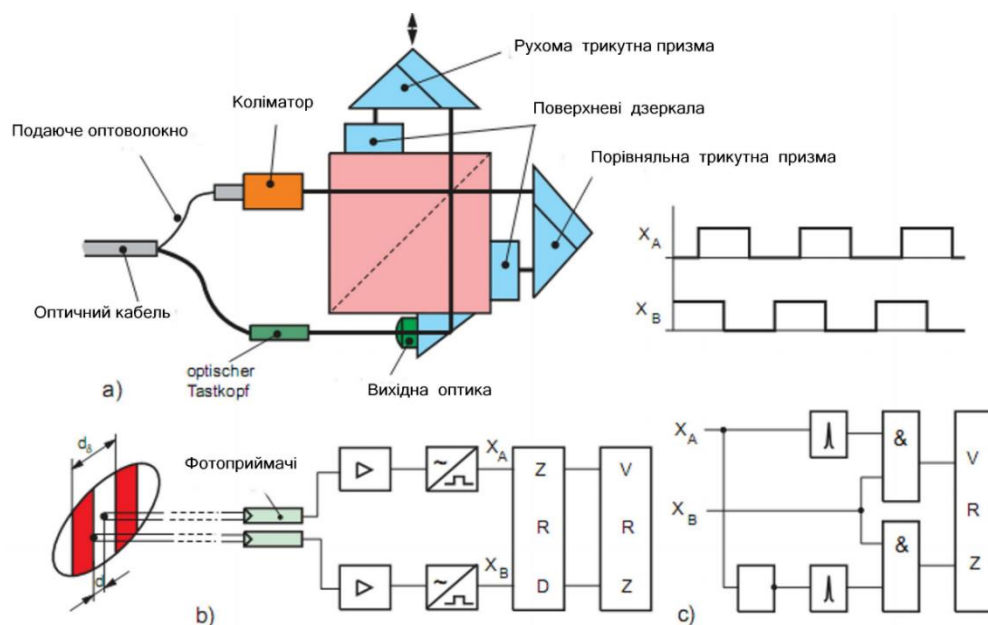


Рис.2.8. Засади роботи лазерного інтерферометричного сенсора

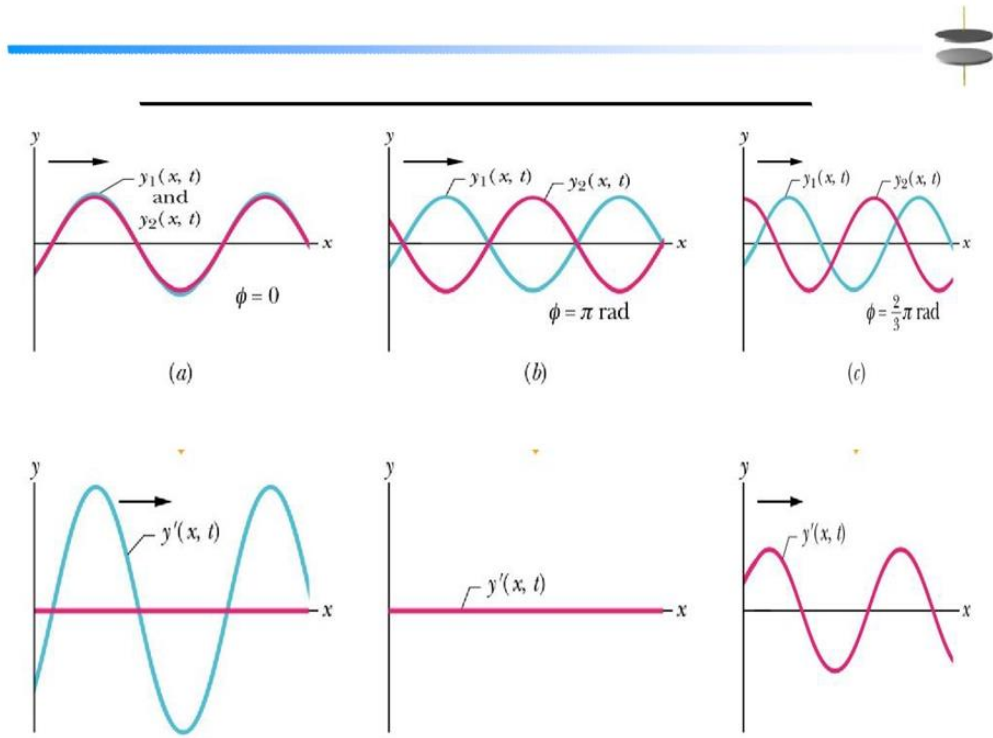


Рис.2.9. Фізичні основи накладання світлових пучків в інтерферометрі

2.2. Формування метрологічних характеристик вимірювачів відстані на основі лазерного випромінювання

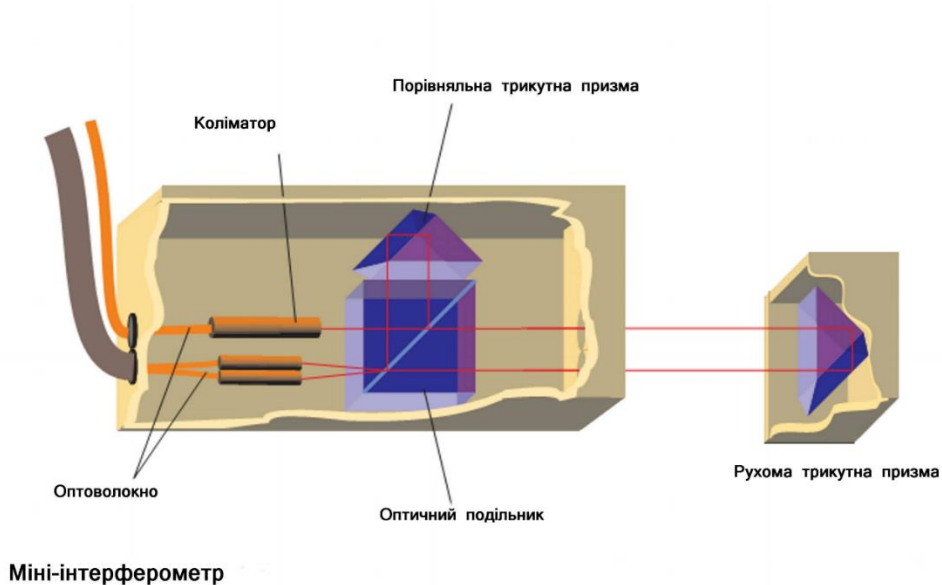


Рис.2.10. Калібрування міні-інтерферометра. Оптична схема

2.3. Методи та процедури калібрування лазерного інтерферометра

Перед початком вимірювання за допомогою лазерного інтерферометра здійснено перевірку столу на наявність вібрацій навколишнього середовища. Вимірювальна установка зображена на рис.2.11.

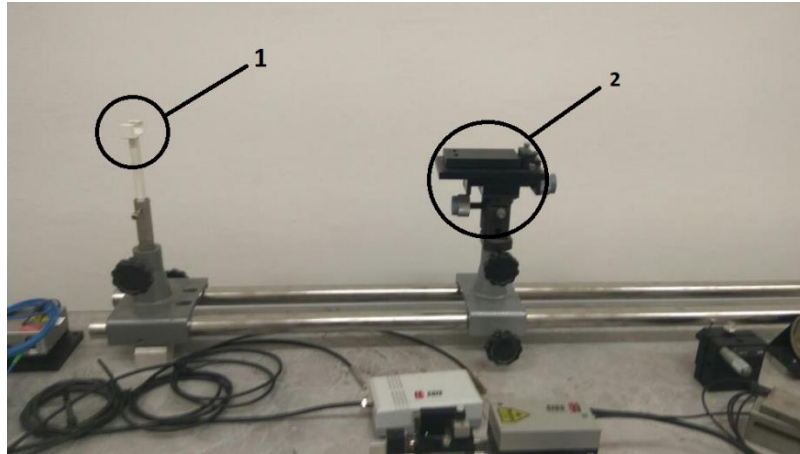


Рис.2.11. Вимірювальна установка для проведення експерименту. 1 – кріплення дзеркальця, 2 – кріплення інтерферометра

Насамперед, досліджували можливу дію вібрацій на установку, позаяк вона є високочутливою щодо щонайменших зрушень. Перевірку установки виконували таким чином. На оптичній лаву закріплювали дзеркальце на відстані близько 20 см від об'єктиву інтерферометра. Потім його включали. Запускали ПЗ, за яким відстань між дзеркальцем і об'єктивом програмно скидали до нуля. Тоді записували приладом показ інтерферометра, одночасно фіксуючи дію вібрацій установки на покази (рис.2.12).

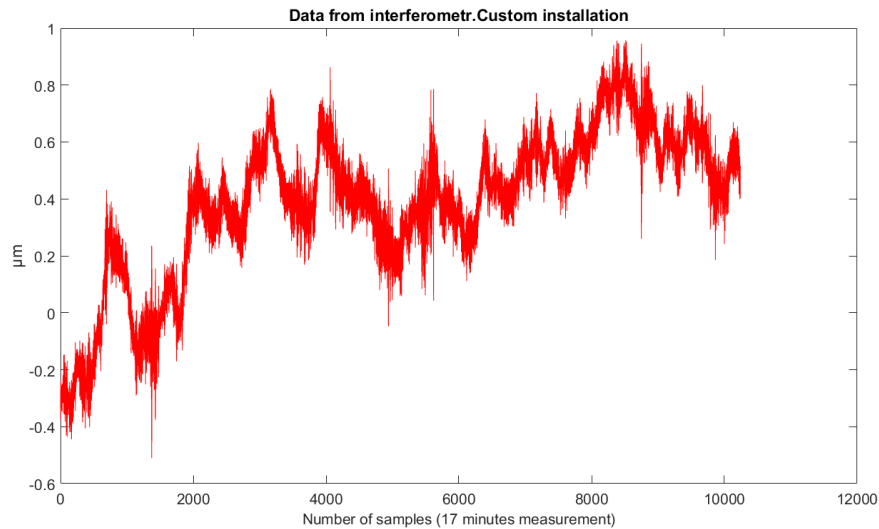


Рис.2.12. Вібрування установки, зафіксоване інтерферометром

Аналізуванням графіку дійшов висновку, що дані можуть бути некоректними, оскільки на вимірювання істотно впливає спосіб кріплення фіксатора для рефлекторного дзеркальця (рис.2.11), яке також має власну частоту коливань, аналогічно коливанню тягарця настінного годинника.

Усунення наслідків описаного вимагало заміни нестандартного ЗВТ на засіб вимірювання у складі спеціалізованої установки компанії SIOS (рис.2.13). З її допомогою здійснено повторні вимірювання, аналогічні вищеописаним (рис.2.11). Результати приведено на рис.2.14.



Рис.2.13. Установка компанії SIOS: 1 –дзеркальце, 2 - лазерний інтерферометр,
3 – підшипник на рейці

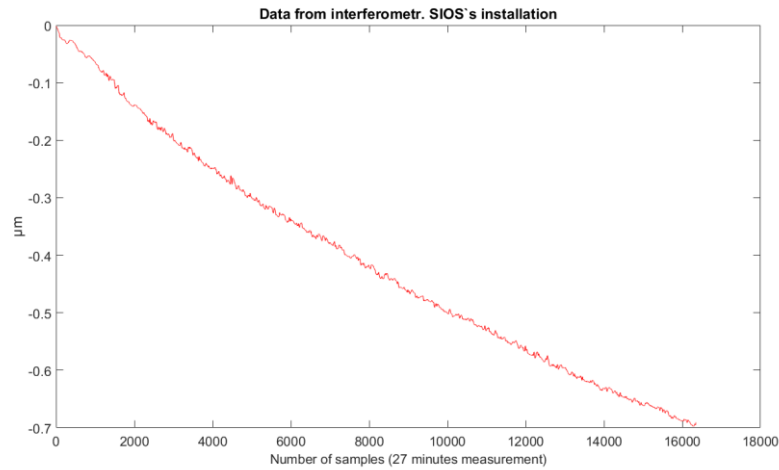


Рис.2.14. Вібрації, виявлені при встановленні спеціального обладнання компанії SIOS на оптичній лаві

Вібрації знаходяться на рівні декількох десятків нанометрів (рис.2.14), що практично не впливає на виконання перевірки ультразвукового сенсора фірми IFM, оскільки чутливість останнього - 1 мм.

Проте виявлено іншу проблема – дрейф показів лазерного інтерферометра у часі. Для вивчення причин цього, вирішив тестувати поверхню стола на горизонтальність, оскільки дрейф показів міг бути спричинений зміщенням підшипника вимірювальної установки, який забезпечував переміщення дзеркальця, (рис.2.13) під дією ваги по похилій поверхні стола за наявності вібрацій.

Для вивчення дії можливого зміщення установки в цілому під дією земного тяжіння при ледь похилому столі оптична лава із закріпленими засобами вимірювання була розвернута на 180°, так що підшипник опинився у крайньому положенні нахилу стола. Як наслідок, підшипник отримав змогу запертися у край вимірювальної установки, чим був гарантовано знерухомлений. Такий захід дав можливість усунути дрейф показів. Тест повторили двічі (рис.2.15-2.16). Отримані результати показали, що дрейф показів не зумовлений неконтрольованим нахилом поверхні столу.

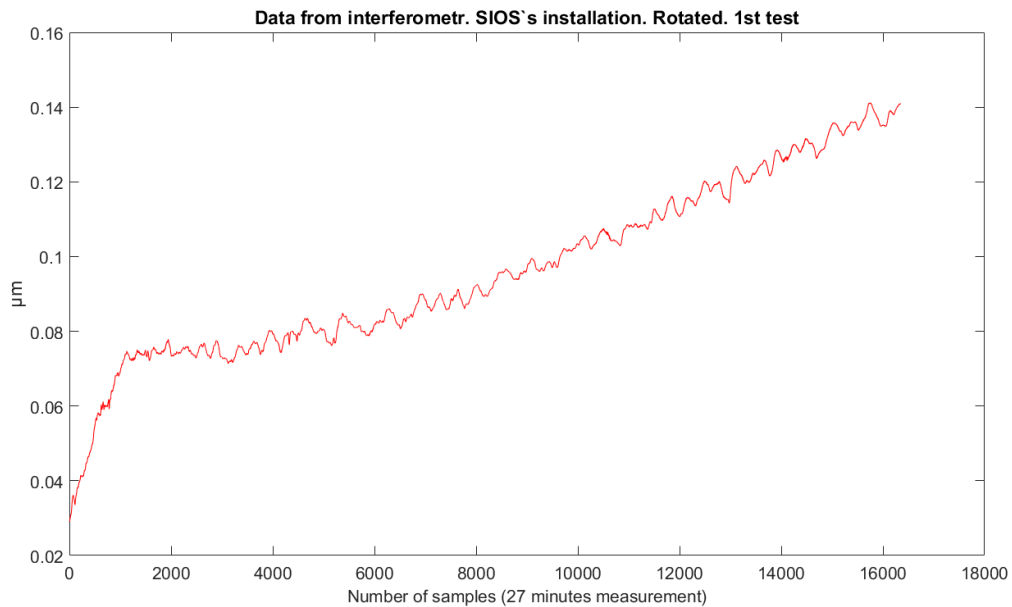


Рис.2.15. Результати тестування установки при її розвороті на 180° відносно вихідного положення. Перший тест

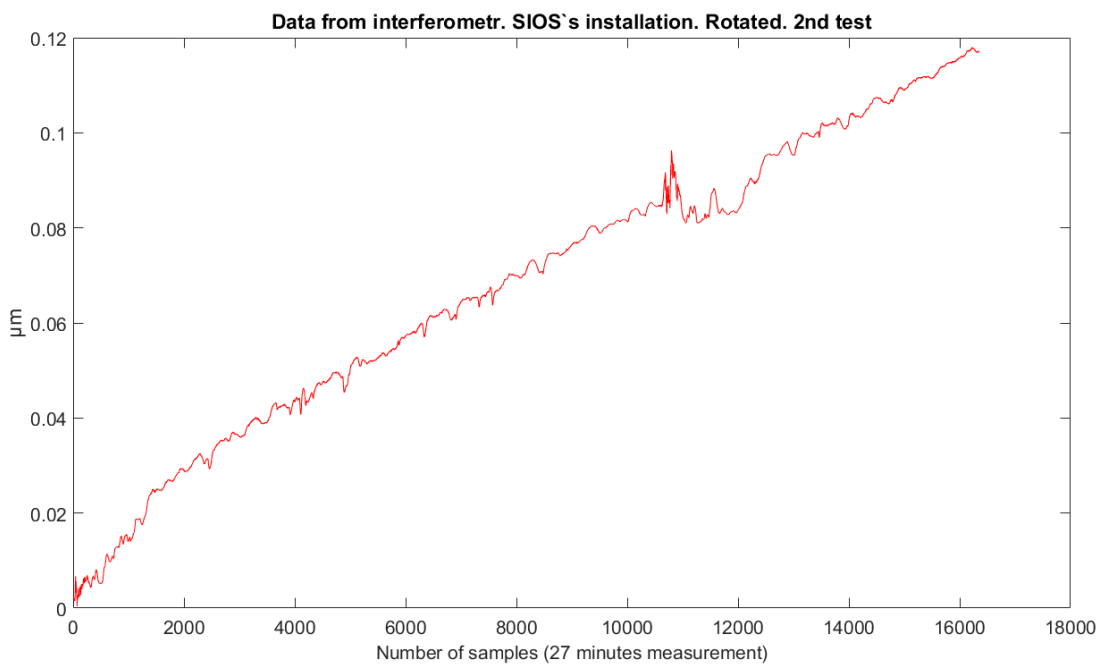


Рис.2.16. Результати тестування установки при її розвороті на 180° відносно вихідного положення. Другий тест

Наступним кроком протестував інтерферометр на характер дрейфу при зміні відстані вимірювання. Для цього помістив дзеркальце посередині рейки оптичної лави вимірювальної установки (рис.2.17), здійснив вимірювання, перемістив дзеркальце зміщенням його підшипника у від'ємному напрямі відносно центру (рис.2.18). Далі провів вимірювання, посунув підшипник із дзеркальцем у

додатному напрямі відносно центру установки (рис.2.19) і знову здійснив вимірювання.

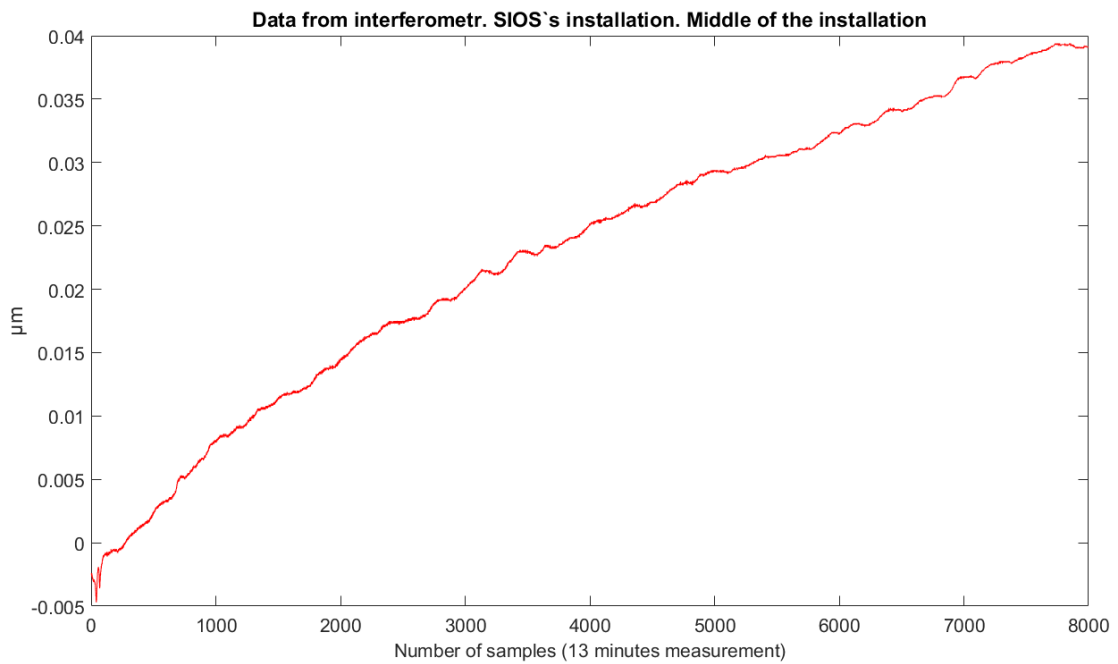


Рис.2.17. Центр устанавлення

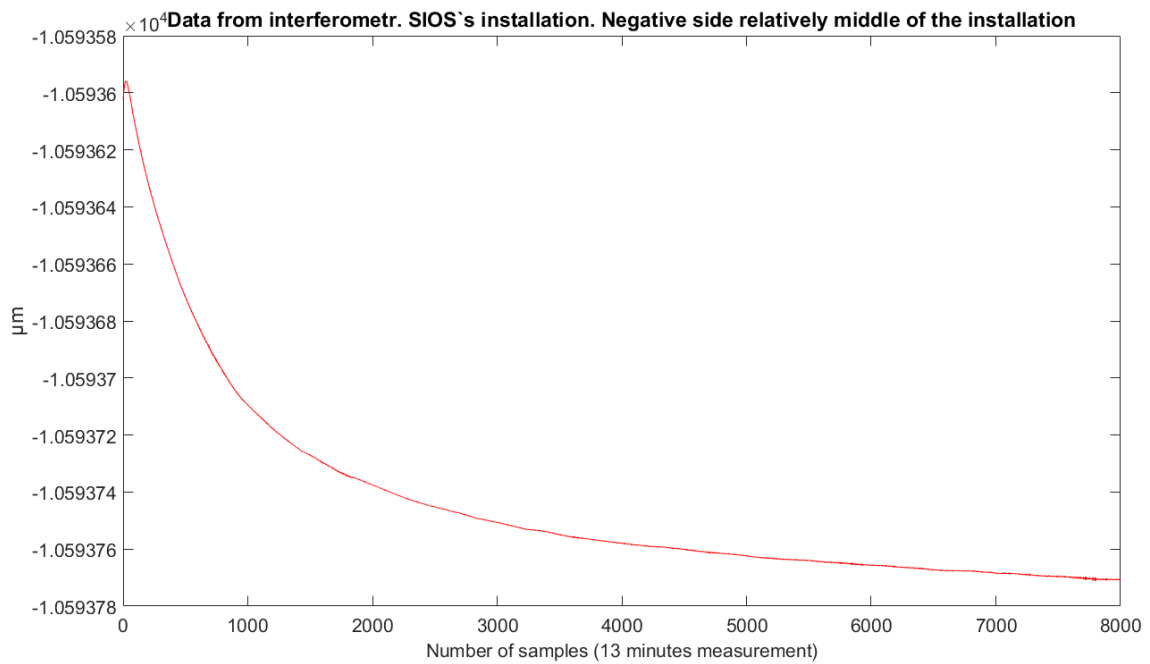


Рис.2.18. Від'ємний бік устанавлення

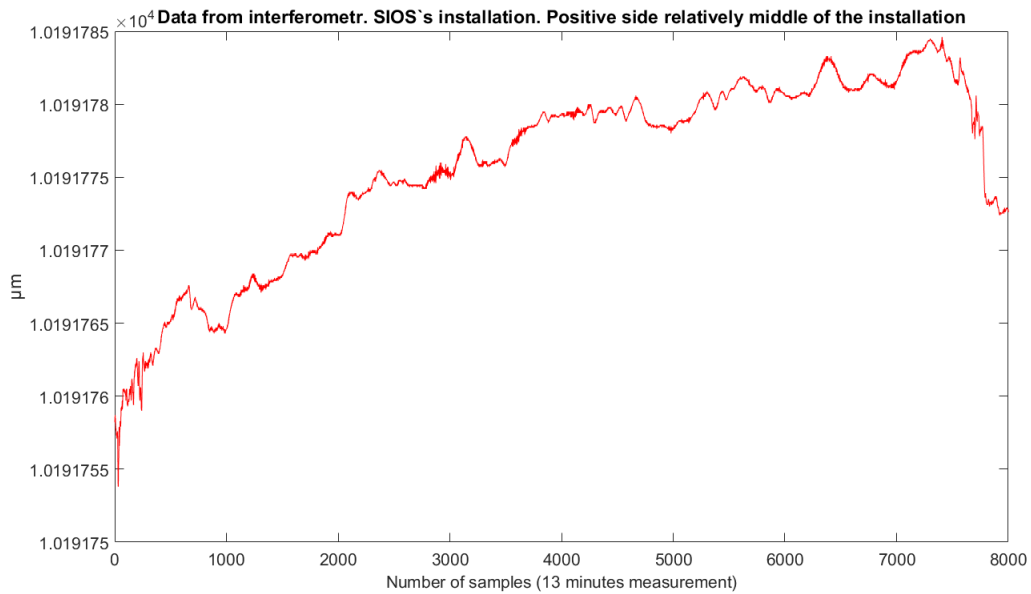


Рис.2.19. Додатній бік устанавлення

Після цього провів 4-и-годинний тест для того, щоб встановити чи дрейф показів інтерферометра є стабільним у часі (рис.2.20).

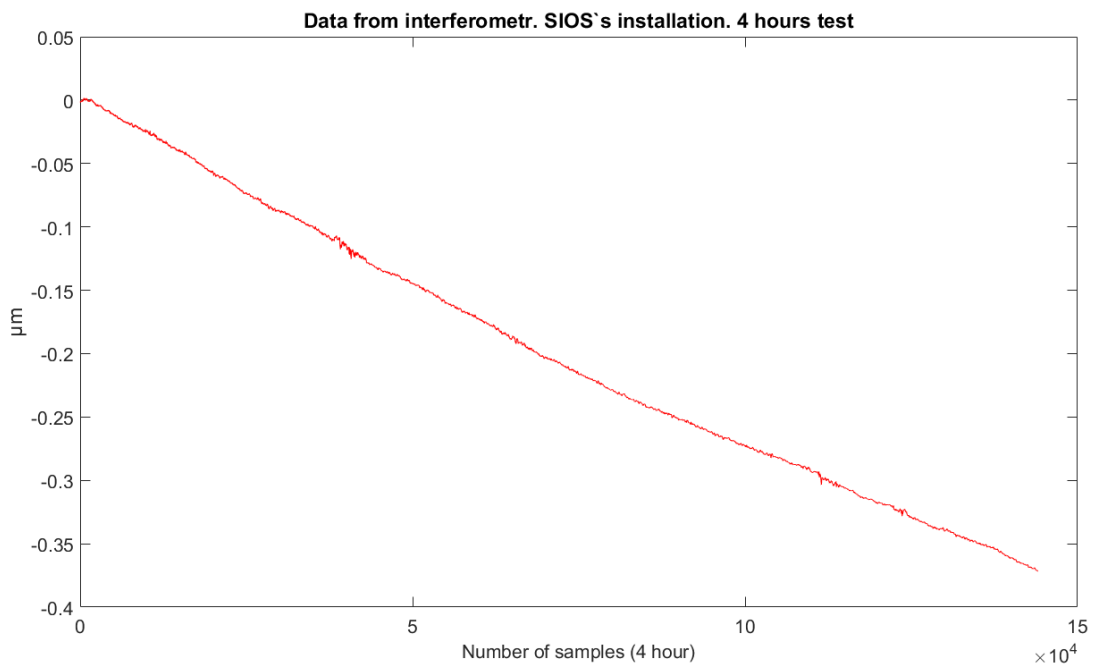


Рис.2.20. Результати чотиригодинного тесту

Як видно з графіку, дрейф показів є стабільним у часі.

Окремо на протязі 4-х годин вивчав дію кліматичних параметрів оточуючого середовища, як імпакт-факторів. При цьому, фіксував значення температури, тиску, вологості, а також додатково корекція довжини хвилі роботи

лазера інтерферометра. Це стосувалось перевірки того чи не корелює значення зафіксованого дрейфу показів інтерферометра у часі зі зміною умов оточуючого середовища. Для факт-чекінгу здійснив перевірку результатів вимірювання на корельованість дії зазначених чинників впливу (рис.2.21).

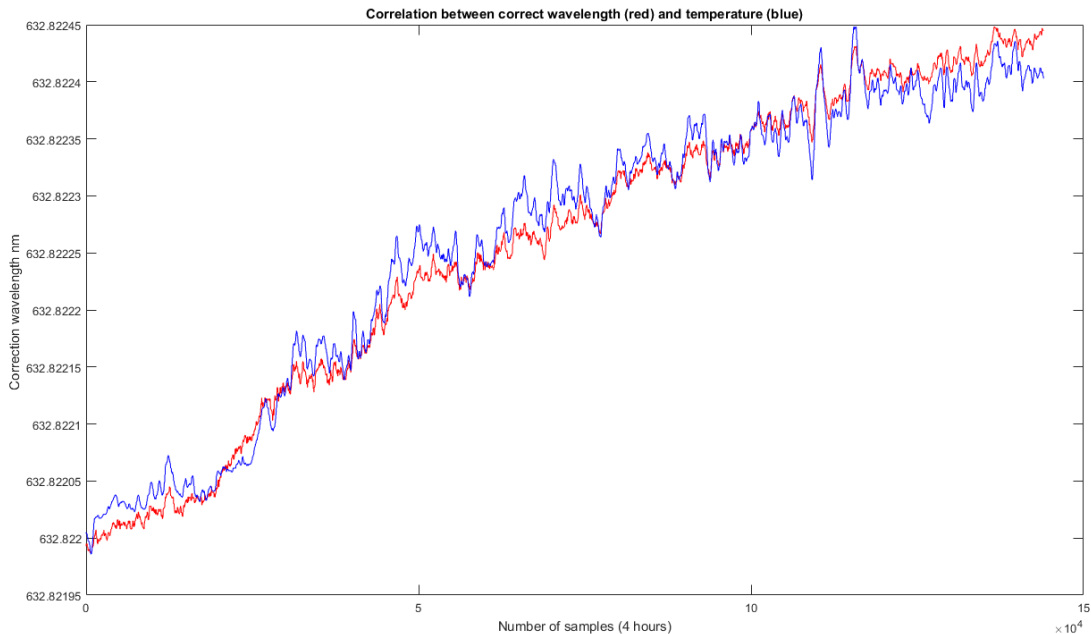


Рис.2.21. Перевірка на корельованість показів

Із графіку видно, зміни вимірюваних значень температури і довжини хвилі зв'язані прямо-пропорційною залежністю, або ж існує їх пряма кореляція. Інакше, температура незначно, але відчутно впливає на покази інтерферометра, зумовлюючи погіршення його метрологічних характеристик внаслідок дрейфу показів.

2.3.1. Контроль температури і вологості оточуючого середовища при калібруванні

Вивчення причин нестабільності ЗВТ та, зокрема, погіршення метрологічної простежуваності при передаванні одиниці розміру зумовило зреалізувати максимально жорсткі вимоги щодо стабілізації температури і оптимізації вологості у межах 30-50 % у приміщенні, де здійснюється передавання.

З цією метою нижче приведемо загально відомі рішення [15], зміст яких полягає у автоматизації засобів кондиціонування температури та вологості. Зокрема, ефективним вважається смарт-сенсор типу DHT 11 (рис.2.22-2.24).

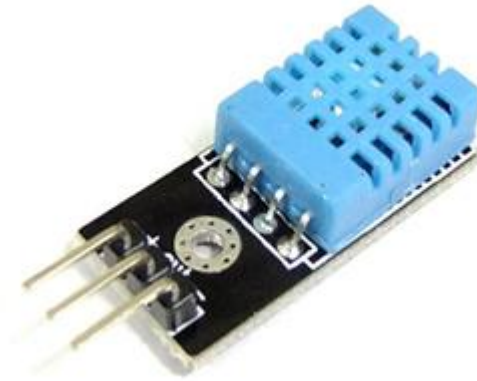


Рис.2.22. Модуль вимірювання температури і вологості на базі сенсора DHT11

DHT11 - це цифровий сенсор, що складається з термістора і ємнісного перетворювача вологості. Він також містить АЦП для перетворення аналогових значень вологості і температури (Табл.2.1-2.3). Швидкодія і точність смарт-сенсора – задовольняють вимогам щодо приміщень при невисокій вартості.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики сенсора DHT11

Спектр визначення вологості	20% - 80%
Спектр визначення температури	0°C - 50°C
Напруга живлення	5 В
Частота запиту	1 Гц
Струм у стані спокою	50 мкА

Переважно сенсор використовується у парі з LCD матрицею (1602A).

Таблиця 2.2. Технічні характеристики LCD матриці (1602A)

Напруга живлення	5 В
Розмір екрану	2.6 дюйму
Тип екрану	2 рядки по 16 символів
Колір підсвічування	Синій

Колір символів	Білий
Габарити	80мм x 35мм x 11мм
Кількість контактів	16

Для підключення до мережі застосовують інтерфейсний модуль типу I2C (рис.2.24).

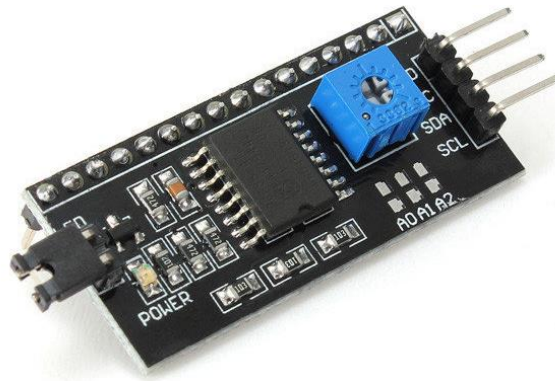


Рис.2.23. Інтерфейсний модуль I2C

Таблиця 2.3. Технічні характеристики інтерфейсного модулю I2C

Підтримка екранів	LCD 16×02 / 20×04
Додатково	регулювання контрасту
Напруга живлення	5 В
Інтерфейс	I2C

У схемі передбачено використання мікропроцесора Arduino Uno (табл.2.4; рис.2.25).

Табл. 2.4. Загальні характеристики МП типу Arduino Uno

Мікроконтролер	Atmega328P
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Вхідна напруга (максимальна)	6-20 В
Цифрові входи/виходи	14
Аналогові входи	6
Постійний струм через вхід/вихід	40 мА
Постійний струм для виводу 3.3В	50 мА
Флеш пам'ять	32 Кб (Atmega328P)

ОЗП	2 Кб (Atmega328P)
EEPROM	1 Кб (Atmega328P)
Тактова частота	16 МГц

МП Arduino виконано у вигляді апаратно-обчислювальної платформи. Її основними компонентами є плата введення/виведення плюс середовище розроблення на мові Processing/Wiring. Разом, описане формує інструмент для розроблення електронних пристроїв.

Ця платформа, призначена для «physical computing» з відкритим програмним кодом. Її конструюють на друкованій платі з середовищем для написання ПЗ. Застосовується для створення електронних пристроїв з можливістю приймання сигналів від цифрових і аналогових датчиків, підключених до неї, а також для керування різними виконавчими пристроями. Мова програмування Arduino є реалізацією Wiring, схожої платформи для «physical computing», заснованої на мультимедійному середовищі програмування Processing [29]. Приклад плати подано на рис.2.24.



Рис.2.24. Основні елементи плати Arduino Uno

Подамо нижче для довідки основні технічні характеристики мікроконтролера ATmega328P, що використовується у платі Arduino Uno.

Примітка:

ATmega328P - мікроконтролер сімейства AVR, як і усі інші має 8-бітовий процесор і дозволяє виконувати більшість команд за один такт. Пам'ять: 32 КБіт Flash (пам'ять програм, що має можливість програмування) 2 КБіт ОЗУ 1 КБіт EEPROM (постійна пам'ять даних) Периферійні пристрої: Два 8-бітові таймери/лічильника з модулем порівняння і дільниками частоти 16-бітовий таймер/лічильник з модулем порівняння і дільником частоти, а також з режимом запису; Лічильник реального часу з окремим генератором; Шість каналів PWM (аналог ЦАП); 6-канальний ЦАП зі вбудованим датчиком температури; Програмований послідовний порт USART; Послідовний інтерфейс SPI; Інтерфейс I2C; Програмований сторожовий таймер з окремим внутрішнім генератором; Внутрішня схема порівняння напруги; Блок обробки переривань і пробудження при зміні напруги на виводах мікроконтролера;

Спеціальні функції мікроконтролера: Скидання при включенні живлення і програмне розпізнавання зниження напруги живлення. Внутрішній генератор тактових імпульсів, що калібрується. Обробка внутрішніх і зовнішніх переривань 6 режимів сну (знижене енергоспоживання і зниження шумів для точнішого перетворення АЦП) Напруга живлення і швидкість процесора: 1.8 - 5.5 В при частоті до 4 МГц; ; 2.7 - 5.5 В при частоті до 10 МГц; 4.5 - 5.5 В при частоті до 20 МГц.

ATmega328P - мікроконтролер сімейства AVR, як і всі інші має 8-бітний процесор і дозволяє виконувати більшість команд за один такт.

Память:

- 32 Кб Флеш (пам'ять програм, що має можливість самопрограмування)
- 2 Кб ОЗП
- 1 Кб EEPROM (постійна пам'ять даних)

Периферійні пристрої:

- Два 8-бітних таймери / лічильники з модулем порівняння і подільниками частоти.
- 16-бітний таймер / лічильник з модулем порівняння і подільником частоти, а також з режимом запису.
- Лічильник реального часу з окремим генератором.
- Шість каналів PWM (аналог ЦАП).
- 6-канальний ЦАП з вбудованим сенсором температури.
- Програмований послідовний порт USART.
- Послідовний інтерфейс SPI.
- Інтерфейс I2C
- Програмований сторожовий таймер з окремим внутрішнім генератором.
- Внутрішня схема порівняння напруг.
- Блок обробки переривань і пробудження при зміні напруги на виходах мікроконтролера.

Електрична функціональна схема побудованого пристрою для контролю температури та вологості приведена на рис.2.25, а алгоритм роботи – на рис.2.26.

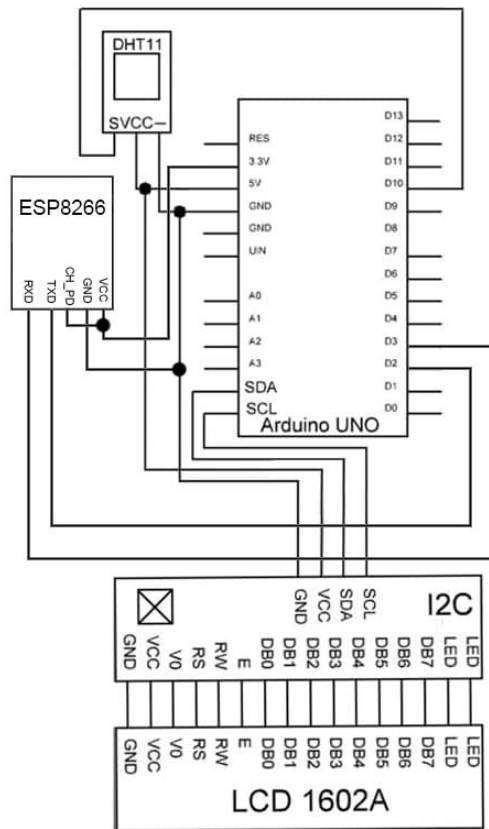


Рис.2.25. Електрична функціональна схема побудованого пристрою контролю температури та вологості

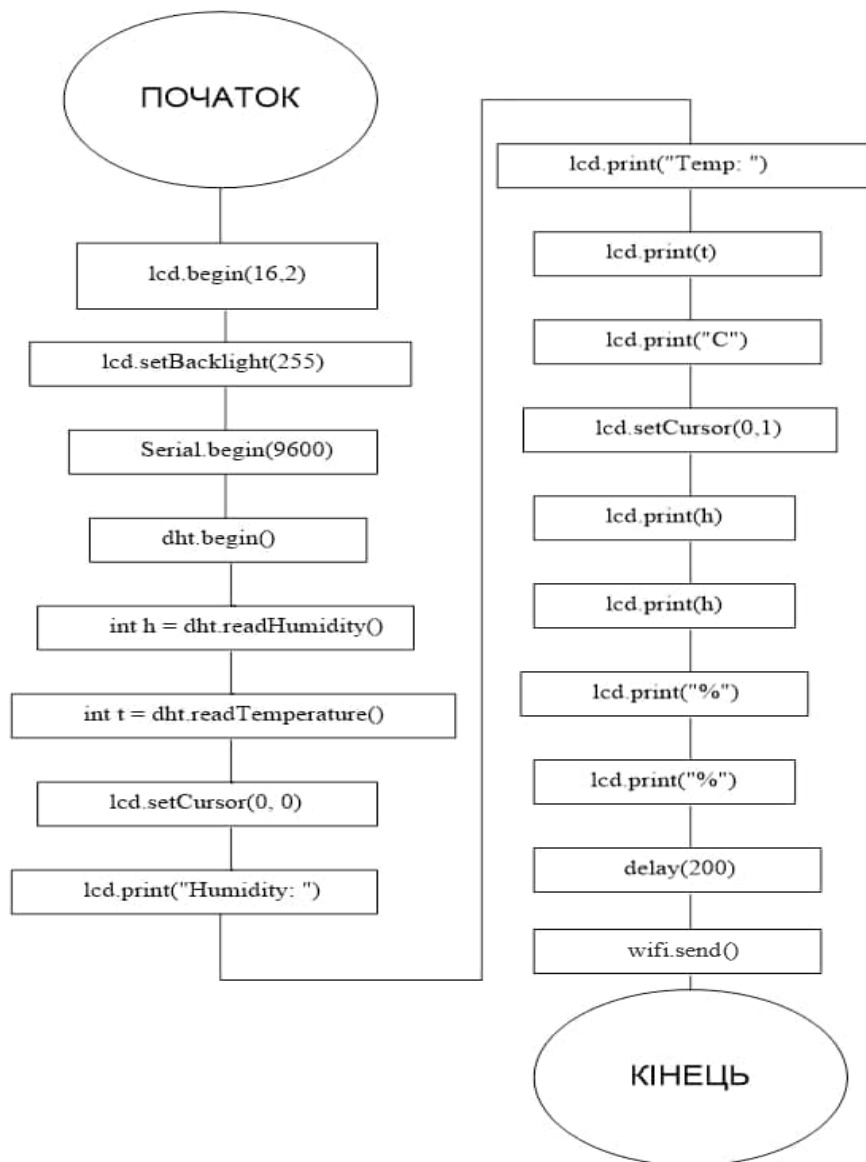


Рис.2.26. Алгоритм функціонування пристрою

Також зазначу, що було написане ПЗ для вищевказаного пристрою з метою фіксації значень температури та вологості в умовах експерименту. Воно приведене у Додатку 3.

Отож, забезпечивши незмінність температурно-вологісних умов калібрування, підійшли до виконання вимірювань, наперед на максимально можливій відстані, нехтуючи умовами оточуючого середовища (рис.2.27).

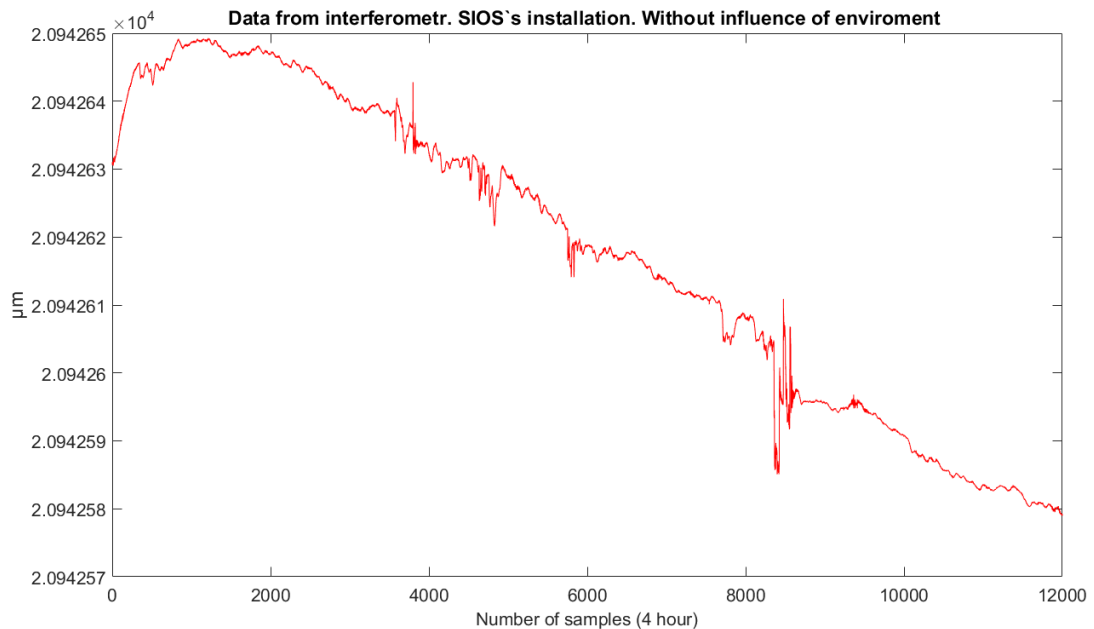


Рис.2.27. Результати тесту без корекції умов навколишнього середовища

Хоча дрейф показів інтерферометра і надалі існував, але він був незначним за значенням. Тому калібрування обраного смарт-сенсора було виконано на попередньо підготовленій і дослідженій експериментальній установці, вказаній на рис.2.11.

Тут, на протязі тривалості усіх тестів дрейф показів інтерферометра не перетнув межі у 1 мкм. Це свідчить про те, що дрейфом показів інтерферометра можна знехтувати за умови термостатування роботи лазера інтерферометра. Іншою причиною нехтування дрейфом є те, що чутливість каліброваного сенсора UGT593 становить 500 мкм [30] і значно перевищує дрейф показів інтерферометра. Водночас, приведемо інші метрологічні характеристики даного сенсора: діапазон відстаней – 60 ... 800 мм при розмірі контрольованого об'єкта – 100 x 100 мм²; «сліпа» зона – від 60 мм у бік зниження; є наявна компенсація дрейфу, зумовленого зміною температури; дрейф точки виявлення - $\pm 2\%$; повторюваність показів – 1%; роздільна здатність – 1 мм.

Тобто, досліджуваний лазерний інтерферометр можна використовувати для верифікації і калібрування ультразвукового сенсора.

Висновки до розділу 2

1. При відомих метрологічних характеристиках лазерного інтерферометра, у даному разі промислового інтерферометра типу LM-20/50 фірми SIOS, Німеччина [31], у разі його застосування, як робочого еталону для перевірки та калібрування будь-яких ЗВТ, ультразвукових сенсорів провідних фірм світу виняткового значення набуває методологія здійснення перевірки та особливості передачі розміру одиниці довжини. Для цього у даному розділі значну увагу приділено устаткуванню та методології передавання розміру одиниці.

2. На основі оптичної лави розроблено устаткування для встановлення і закріплення, як лазерного інтерферометра (робочий еталон), так і каліброваного сенсора. На підставі попередньо проведених експериментальних досліджень, встановлено організаційні (оточуюче середовище), методологічні (послідовність дій), механічні (особливості кріплення на оптичній лаві та усунення люфтів та нахилів) вимоги для мінімізації дрейфу показів інтерферометра у часі.

3. Показано, що при чутливості інтерферометра порядку 0,1 нМ та сумарній абсолютній похибці визначення відстані – 1 нМ, а також при дрейфі показів – до 10 нМ похибка передавання розміру одиниці довжини повинна бути істотно більшою за значення дрейфу і становити від 20-30 нМ.

4. Визначено фактори впливу, що можуть збільшити похибку передавання розміру одиниці довжини та запропоновано заходи для її зменшення до вищезазначеного рівня. Показано, що похибка вимірювання, відтворюваність показів, чутливість лазерного інтерферометра значно нижчі за відповідні метрологічні параметри конкретного ультразвукового сенсора. Тому згаданий інтерферометр надається для калібрування сенсорів ультразвукових.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ СМАРТ-СЕНСОРІВ ВІДСТАНІ ТА ЇХ КАЛІБРУВАННЯ

Ультразвукові сенсори - це промислові контрольні пристрої, які використовують звукові хвилі з частотою, вищою від 20 000 Гц (поза межами діапазону людського слуху), для вимірювання відстані від сенсора до заданого об'єкту. Переважно ультразвуковий сенсор не слід налаштовувати або експлуатувати, поки він не прогріється. Коли він вперше вмикається, окремі електронні компоненти прогріваються. Ця зміна температури від холодного запуску до робочої температури формує «дрейф прогріву». Поки всі компоненти не прогріються до робочої температури, це може вплинути на похибку вимірювання. Таким сенсорам притаманні обмеження, що виражаються в наявності «мертвої зони». Остання - це область безпосередньо перед поверхнею сенсора, у якій він не спроможний здійснювати надійні та відтворювані вимірювання. Це пов'язано з явищем, названим «дзвоном». «Дзвін» виражається у продовженні вібрації сенсора після подання імпульсу генерування вихідного ультразвукового сигналу. Енергія повинна розсіятися, перш ніж сенсор зможе сприйняти відлуння поданого сигналу. Тобто, контрольований об'єкт повинен знаходитися поза межами «мертвої зони» ультразвукового сенсора [32].

У плані робототехніки відомі УЗ сенсори 6-го покоління фірми Bosch для вимірювання відстані під час безпечного й комфортного автоматичного/віддаленого паркування [33]. Сформована з їх допомогою система підтримує функції екстреного гальмування на низьких швидкостях завдяки оперативній реакції на різні перешкоди (наприклад, пішоходів або стовпи). Ультразвукові сенсори базуються на ехо-технології при роботі зі змінною частотою в діапазоні 43 кГц – 60 кГц.

Ультразвуковий сенсор є доступним у 3-х варіантах за дальністю виявлення:

- від 250 - до 15 см; об'єкт розміром 6 см;
- від 450 - до 15 см; об'єкт розміром 6 см;
- від 550 - до 15 см; об'єкт розміром 3 см;

Сенсор працює за принципом звукового висотоміра, за допомогою якого орієнтуються кажани. Він генерує ультразвукові імпульси, що відбиваються іншими тілами. Сигнали відлуння реєструються та оцінюються центральним блоком керування. Основна функція сенсорів 6-го покоління – допомагати водіям уникати зіткнень під час руху на малій швидкості.

Те саме стосується робототехніки, де зазвичай роботам доводиться об'їжджати завади. Для цього використовуються ультразвукові сенсори, що дозволяють виявити їх (рис.3.1). Перевагою таких відносно дешевих і поширених сенсорів вважається достатній діапазон видимості, можливість розпізнавання будь-яких об'єктів незалежно від кольору, форми, прозорості тощо.



Рис.3.1. УЗ Сенсор Lego Mindstorm EV 3

Технічні специфікації і особливості продукту:

- Вимірювання відстані в діапазоні від 1 до 250 см.
- Похибка вимірювання до +/- 1 см.
- Переднє підсвічування у вигляді червоного кільця горить постійно при передачі сигналу і блимає при вимірюванні.
- Якщо ультразвуковий сигнал розпізнано, сенсор повертає логічне значення «Істина».
- Автоматична ідентифікація проводиться програмним забезпеченням мікрокомп'ютера EV3.

Ультразвуковий сенсор HC SR04 (рис.3.2) - відомий сенсор для застосування в Arduino, Raspberry Pi, ESP8266 і ESP32 модулях. Дає змогу вимірювати відстань до об'єкта в діапазоні від 2 до 400 (180) см. Наприклад, якщо

ви хочете зібрати робота, який об'їжджає перешкоди, він підійде для того завдання.



Рисунок 3.2. Зовнішній вигляд ультразвукового сенсора HC-SR04

Ультразвукові сенсори часто використовуються як далекоміри [32-33]. Внаслідок негативних результатів дії оточуючого середовища метрологічні характеристики далекомірів вважаються незадовільними, адже в ньому поширюється звук і за часом його проходження судять про відстань. Коли параметри середовища, головним з яких вважається оптична густина, нестабільні у часі, то і покази далекомірів характеризуються незадовільною точністю.

Істотним недоліком вважається введення мінімального значення вимірюваної відстані, яке становить 3 ... 40 см. До інших недоліків УЗ сенсорів відносяться наступні: важко виміряти відстань до поверхонь, структура яких пориста і тому вони гарно поглинають ультразвук. Крім того, коли ультразвуковий пучок потрапляє на вимірювану поверхню під кутом до УЗ пучка (повернута пласка або сферична поверхні), то отримані результати стають недостовірними [34].

Як наслідок, похибки таких сенсорів-далекомірів можуть перевищувати 4 см для вимірюваної відстані 20 - 1400 см [35] (або ж відносна похибка 20 % для відстані 20 см), що незадовільно для робототехнічного застосування сенсора.

У смарт-сенсора UGT593 фірми IFM чутливість становить 500 мкм [30]. Інші метрологічні характеристики даного сенсора: діапазон відстаней – 60 ... 800 мм при розмірі контрольованого об'єкта – 100 x 100 мм²; «сліпа» зона – від 60 мм у бік зниження; дрейф точки виявлення, тобто відносна похибка виявлення -

$\pm 2\%$ при повторюваності показів 1% і роздільчій здатності 1 мм . Це означає, що абсолютна похибка виявлення достатньо розмірного ($100 \times 100\text{ мм}^2$) об'єкту становить $\pm 2\text{ мм}$ на відстані 100 мм або $\pm 1,2\text{ мм}$ на мінімальній відстані 60 мм . При меншій відстані потрапляємо у «сліпу» зону, де багатократне відбивання акустичного сигналу призводить до ненадійних показів сенсора.

Саме тому поставлено завдання у даній дисертаційній роботі детально вивчити генезис похибок УЗ сенсорів. Зазначені недоліки вимагають від експериментаторів не тільки враховувати вищезгадані параметри при використанні ультразвукових смарт-сенсорів-далекомірів, але забезпечити метрологічну єдність вимірювань з їх допомогою, як і встановити точність описаних сенсорів. Останнє може бути досягнуте розробленням метрологічного устаткування для калібрування ультразвукових сенсорів-далекомірів.

- **Опис функціональних можливостей ультразвукових сенсорів**

Ультразвуковий сенсор відстані – це пристрій, призначений вимірювати відстань до контрольованого об'єкта на основі аналізу тривалості поширення сигналу, враховуючи прибуття відбитого сигналу. Тобто, фіксується момент відправлення сигналу сенсором і моменту його повернення після відбивання. На їх різниці автоматично обчислюється відстань.

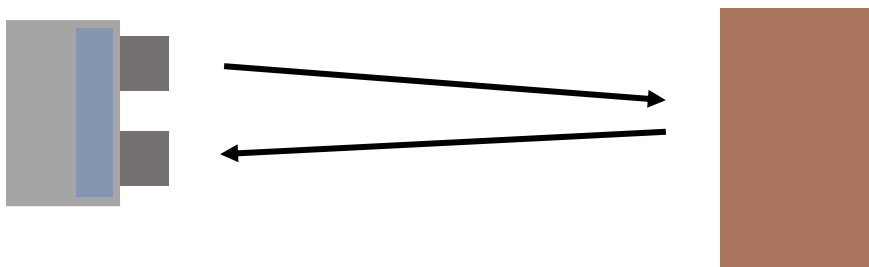


Рис. 3.3. Схема роботи ультразвукового сенсора

Оскільки швидкість поширення звуку в повітрі за нормальних умов становить 343 м/с , достатньо перемножити отриману вище тривалість, зафіксовану ЗВТ, на швидкість звуку, щоби встановити практично подвійну відстань до об'єкту:

$$d = \frac{v \times t}{2}, \quad (3.1)$$

де d – відстань «сенсор - об'єкт»; v – швидкість звуку; t – тривалість проходження ультразвуковою хвилею відстані від сенсора до об'єкту і назад [39].

На відміну від фотоелектричних сенсорів, на похибку встановлення відстані з допомогою ультразвукового сенсора практично не проявляє впливу колір контрольованого об'єкту: до прикладу, 2 об'єкти однакової форми, але різних виконань - прозоре скло 1-го об'єкта та чорний пластик 2-го об'єкта фіксуються однаково.

Загалом, УЗ сенсори виявляють відбивання від ширшої області, ніж фотоелектричні. Тому можуть контролювати широку область, не торкаючись об'єктів і не впливаючи на них механічно.

Проте, для УЗ сенсорів характерна інша, їм притаманна особливість. При їх використанні виникає так-звана зона нечутливості. Практично вона оцінюється проміжком між головкою сенсора та об'єктом виявлення і вважається мінімальною відстанню, на якій виявляється даний об'єкт.

Ще існує такий параметр, як зона непевності. Це область, що знаходиться поблизу сенсора; тут виявлення об'єкту стає неможливим внаслідок специфіки форми головки сенсора та реверберації сигналу виявлення у даній зоні через багатократність відбивань сигналу в описаному проміжку [40-42].

Такому сенсору притаманна наступна метрологічна характеристика – коефіцієнт посилення спрямованості просторової діаграми. Останнім вважається відношення звукового виходу, необхідного для передавання звукової енергії до об'єкту, неспрямованого випромінювача до звукового виходу випромінювача. Зі збільшенням частоти та зони опромінення коефіцієнт спрямованості зростає, тобто звукові хвилі випромінюються з більшою ефективністю. Спрямованість сенсора, що використовується як ультразвуковий перемикач, становить 8° - 30° , формуючи так-званий напівкутовий звуковий тиск.

На даний коефіцієнт істотно впливає форма УЗ сенсора і режим вібрації перетворювача, і, отже, вибирається форма, робоча частота і тип перетворювача для забезпечення необхідного діапазону [41].

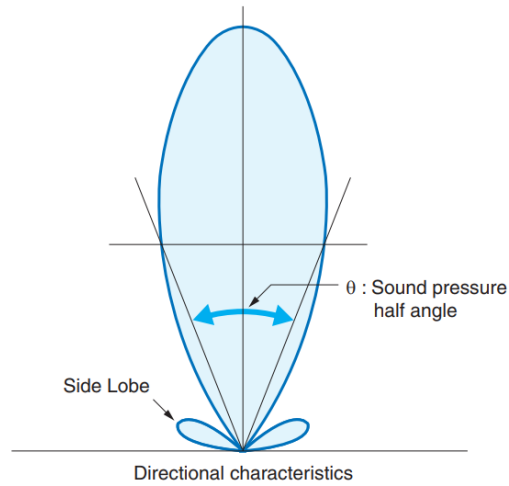


Рис. 3.4. Характеристики спрямованості [39]

3.1. Методика дослідження та калібрування

Перевірка ультразвукового сенсора відстані UGT593 (рис.3.5) фірми IFM здійснювалась за допомогою лазерного інтерферометра ML 20/50 фірми SIOS [31].



Рис.3.5. Зовнішній вигляд УЗ сенсора-далекоміра типу UGT593

Проведення експериментальних досліджень розпочали із вивчення показів ультразвукового сенсора шляхом самоаналізу отримуваних результатів. Це показано у нашій праці [43]. Сенсор встановлювали на оптичній лаві із міліметровою шкалою (рис.3.6); до неї прикріпляли екран відліку. У характеристиках сенсора зазначалось, що діапазон вимірювання становить 60 мм – 800 мм, а вихідні значення приводяться у мА, від 4-х до 20-и.

При попередніх дослідженнях сенсор встановлювали в діапазоні відстаней 70 ... 400 мм. Тоді ж розраховувалось співвідношення показів приладу в мА до мм. Таким чином, показ 4 мА відповідав відстані 70 мм, а 20 мА - 400 мм [43].

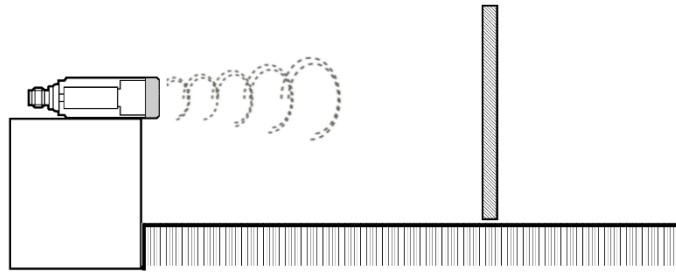


Рис.3.6. Схема дослідження характеристик ультразвукового сенсора

На наступному етапі перевірки сенсора використано стандартну рейку для переміщення рефлектора. Щоб спрямувати ультразвуковий сенсор на задню стінку рефлектора, площу опромінення збільшували за рахунок прикріплення перегородки розміром 100 x100 мм² до задньої стінки рефлектора (рис.3.7). На передню стінку цього самого рефлектора направляли оптичний пучок від лазерного інтерферометра [40].

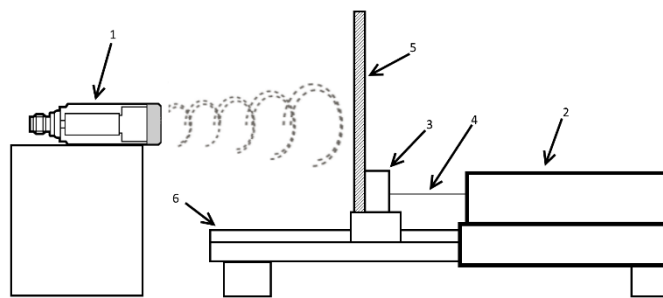


Рис.3.7. Схема дослідження ультразвукового сенсора на оптичній лаві: 1 - ультразвуковий сенсор; 2 - інтерферометр; 3 - рефлектор; 4 – оптичний пучок; 5 – перегородка; 6 – рейка оптичної лави [43].

УЗ сенсор та лазерний інтерферометр підключались до комп'ютера з метою реєстрації сигналів; отримані дані фіксувались протягом 6 хв. Щохвилини рефлектор зміщували на максимально можливу відстань 21 мм. Зафіксовані дані інтерферометра приведені на рис.3.8, а ультразвукового сенсора – на рис.3.9.

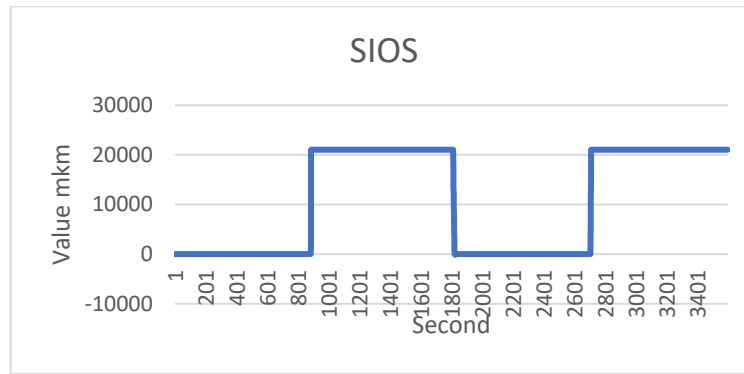


Рис.3.8. Дані інтерферометра та їх зміна при зміщенні перегородки [43]

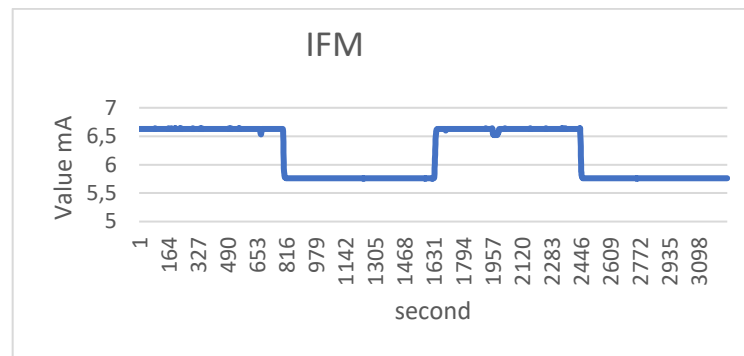


Рис.3.9. Дані ультразвукового сенсора та їх зміна при зміщенні перегородки [43]

3.1.1. Вивчення методичної складової похибки

Управління якістю вимірювань і сертифікація обладнання, зокрема, при передаванні розміру одиниць [44] та кваліфікаційні вимоги до калібрування в лабораторних умовах [45] передбачають вивчення чинників впливу, виділення систематичних складових похибок та використання спеціальних методів їх мінімізації [10]. Один із таких методів, до прикладу, при дослідженні нанотехнологіях [46]. полягав на залученні методу протиставлення при калібруванні – стандартному методі усунення даної складової похибки у метрології [47]. Як наслідок, підвищено точність встановлення Z-координати у нановимірювальній машині. Гідравлічний метод і засіб плавного взаємного переміщення досліджуваного наноб'єкту і кантилевера дають змогу з похибкою, порядку товщини одномолекулярного шару робочої рідини, забезпечувати їх взаємне переміщення по осі Z.

Інші методи, що стосуються нанопозиційної та водночас нановимірювальної машини при мультисенсорному застосуванні, базуються не на спеціальних методах мінімізації систематичних складових похибок, а на використанні високоточних технологій, що ґрунтуються на оптично-механічних перетворювачах переміщень та частотному контролі параметрів [48], досягають кращих результатів. Проте, вони вимагають комплексів вартістю 5 млн. Є. Тому подалі розглядаю класичні методи калібрування та мінімізації різних складових похибок, що базуються на [10, 49-50].

3.1.2. Підготовка до проведення калібрувань і зняття сигналів ультразвукових сенсорів

На самому початку вимірювального циклу стіл та оптичну лаву перевірили на наявність вібрацій з допомогою лазерного інтерферометра. Додатково опробовано докладність кріплення дзеркальця та інтерферометра (Устаткування для калібрування, встановлене на оптичній лаві, приведене на рис.2.4).

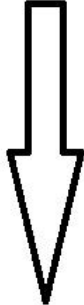
Зазвичай, стосовно ультразвукових сенсорів фірма-виробник, у даному випадку фірма IFM, Німеччина, рекомендує користуватися власним інтерфейсом типу IO-Link [30]. Проте, таке рішення не завжди підходить користувачам, зокрема виробникам засобів робототехніки [51].

Тому у даній праці намагався спроектувати і дослідити підключення ультразвукового сенсора до комп'ютерної мережі, минаючи вищеприведений інтерфейс. Інтелектуалізація вимірювань здійснюється, використовуючи ультразвуковий сенсор та плату Arduino. Основний функціонал полягає у постійному замірюванні сигналу сенсора. LCD дисплей виводить повідомлення [52]. Структурна схема зображена на рис. 3.10.

Вимірювання рівня звуку

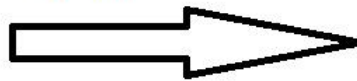


Надсилання
виміряних
значень



Аналіз отриманих значень

Передача
повідомлення на
дисплей



Вивід повідомлення



Рис.3.10. Схема структурна приладу інтелектуалізації вимірювань

Аналіз відбуватися на рівні плати Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P (рис.3.11) [53].

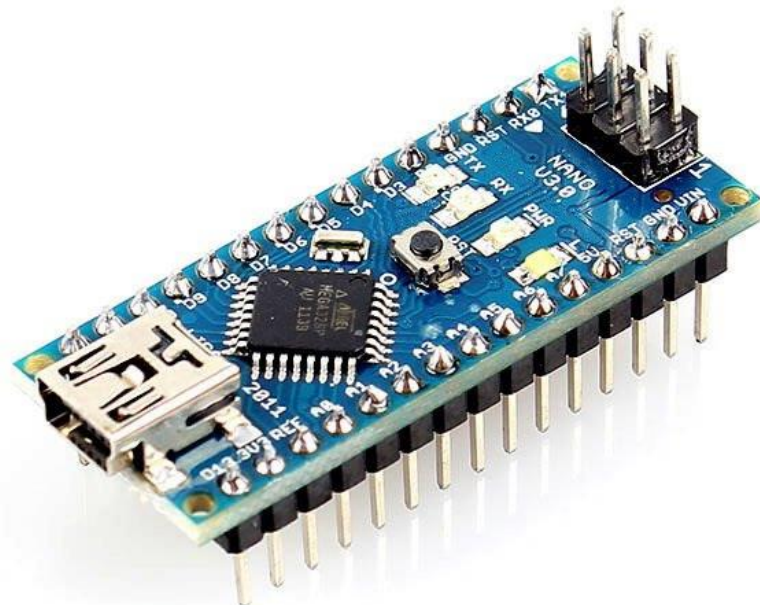


Рис.3.11. Зображення плати

Сигнал, що надходить від сенсора, порівнюється із значеннями уставок. Далі він вноситься у пам'ять мікросхеми або висвітлюється дисплеєм LCD 1602 із підключенням по інтерфейсу I2C. Останній являє собою послідовну шину даних, що забезпечують зв'язок інтегральних схем; він розроблений фірмою Philips у вигляді шини внутрішнього зв'язку для електроніки керування. Зараз використовується для з'єднання низькошвидкісних периферійних компонентів з материнською платою, вбудовуваними системами та мобільними телефонами.

Синхронні сигнали з швидкими фронтами сприймають доріжки на друкованих платах як лінії передачі, а не просто з'єднання провідників. Якщо довжина доріжки друкованої плати перевищує певні значення, необхідно узгодити її імпеданс з джерелом та/або навантаження. Неузгодженість імпедансу спричиняє відбивання сигналу, що поширюється від джерела до приймача і назад лінією передачі. Відповідне відбиття створює спотворення сигналу, так званий «відголос», викиди та нерівності наростання та спадання фронтів. Для усунення цих ефектів розглянемо практичні вказівки для послідовної термінації односторонніх сигналів зокрема на прикладі несиметричного сигналу типу LVCMOS [53]. Можливо, релевантним шляхом усунення або мінімізації спотворень сигналу є підбір оптимальної його частоти шляхом розробки і впровадження мікропроцесорного частотоміра для комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [54] або ж залучення сенсорних мереж з урахуванням отримуваних сигналів від сукупності сенсорів за складним алгоритмом [55].

З метою усунення можливих додаткових ефектів, зумовлених відсутністю послідовної термінації односторонніх сигналів зокрема на прикладі несиметричного сигналу типу LVCMOS, у роботі попередньо симульовано випадки неузгодженості імпедансу джерела і лінії та для кола з усунутим ефектом відбивання – з послідовною термінацією. Також виокремлено основні практичні аспекти виникнення помилки застосування такого роду узгодження.

У цілому, для запису і відтворення сигналів ультразвукового спектру ефект термінації, як показано, є неістотним. Лістинг програми приведено у Додатку 3. Підключити сенсор звуку можна так, як приведено на рис. 3.12.

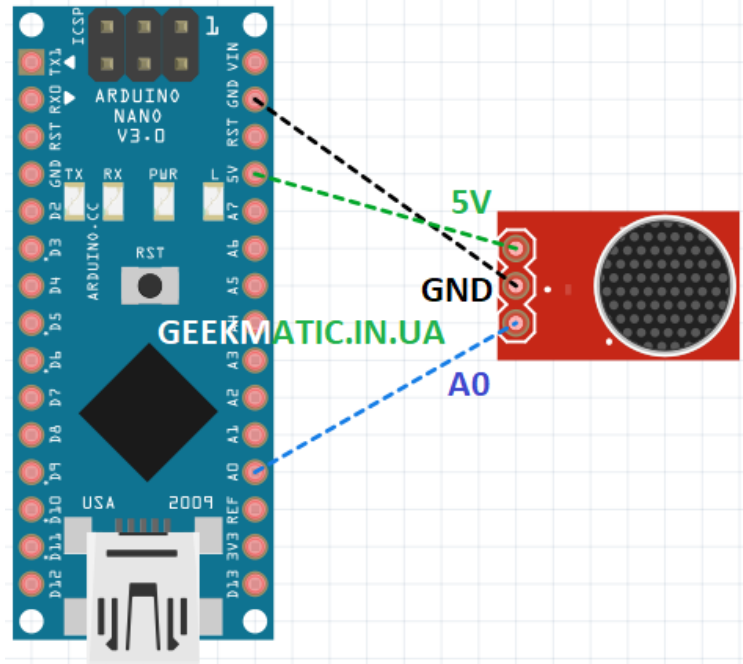


Рис.3.12. Схема підключення сенсора

3.2. Дослідження непевності вимірювань

Повторимо вихідні дані.

У розділі 2 сформовано і досліджено на базі оптичної лави установку для калібрування ультразвукового сенсора-далекоміра UGT593, фірми IFM, Germany з допомогою лазерного інтерферометра фірми SIOS, Germany. Там же вивчено дію низки чинників впливу на покази останнього. Це дало змогу усунути або мінімізувати низку систематичних похибок, зокрема зумовлених неідеальністю встановлення та закріплення інтерферометра; переміщення рефлектора, відносно якого здійснювали калібрування за показами УЗ сенсора та інтерферометра, а також похибок, зумовлених дією негативних імпаکت-факторів оточуючого середовища, в тому числі похибку, зумовлену температурним дрейфом, якою можна знехтувати.

3.2.1. Калібрування та опрацювання результатів

Використовуючи методику та уставу, описані вище, проведено калібрування УЗ сенсора типу UGT593 з допомогою лазерного інтерферометра типу LM-20/50. Результати досліджень, повторених 5-кратно, внесені у табл.3.1.

Таблиця 3.1. Результати калібрування ультразвукового сенсора з допомогою лазерного інтерферометра (перша точка відліку)

Кількість калібрувань	«Перша» точка - посередині рейки оптичної лави	
	Покази сенсора I_{iz} , mA	Покази інтерферометра l_{sz} , mm
1	6.63	0.0000002
2	6.63	0.0000001
3	6.63	0.0000003
4	6.63	0.0000001
5	6.63	0.0000001

Таблиця 3.2. Результати калібрування ультразвукового сенсора з допомогою лазерного інтерферометра (друга точка відліку)

Кількість калібрувань	Зміщення від нульової точки - друга точка відліку	
	Покази сенсора I_{id} , mA	Покази інтерферометра l_{sd} , mm
1	5.76	21.0663187
2	5.76	21.0663163
3	5.76	21.0663137
4	5.76	21.0663109
5	5.76	21.0663085

Значення, отримані від ультразвукового сенсора, подано в mA. Тому потрібно їх перетворити в мм за допомогою лінійної залежності: $l_{iz, \text{мм}} = 70 + ((I_{iz, \text{mA}} - 4) * 400) / (20 - 4)$. Опрацювання отриманих результатів, зокрема 5-го та 6-го стовпчиків таблиці, приведено нижче.

Насамперед, в одній точці оптичної лави (для того самого розташування дзеркальця) знаходимо середнє значення показу інтерферометра $l_s = 21.06631346$ мм і ультразвукового сенсора $l_i = 21.75$ мм.

Результати перетворення записано в Таблиці 3.3 [43].

Таблиця 3.3. Перетворені результати калібрування ультразвукового сенсора з допомогою лазерного інтерферометра [43]

№	Розташування дзеркальця рефлектора в нульовій точці посередині рейки оптичної лави, мм		Зсув дзеркальця рефлектора від нульової точки посередині рейки оптичної лави, мм			
	початкова відстань від сенсора до задньої стінки рефлектора, l_{iz}	початкова відстань від інтерферометра до рефлектора, l_{sz}	мінімальне зміщення рефлектора від сенсора, l_{id}	максимальне зміщення рефлектора від інтерферометра, l_{sd}	відстань l_i , на яку перемістив рефлектор, за даними сенсора	відстань l_s , на яку перемістили рефлектор, за даними інтерферометра
1	135.75	0.0000002	114	21.0663187	21.75	21.0663185
2	135.75	0.0000001	114	21.0663163	21.75	21.0663162
3	135.75	0.0000003	114	21.0663137	21.75	21.0663134
4	135.75	0.0000001	114	21.0663109	21.75	21.0663108
5	135.75	0.0000001	114	21.0663085	21.75	21.0663084

Далі визначаємо похибку калібрування ультразвукового сенсора в одній вищевказаній точці оптичної лави: $\Delta l = l_i - l_s = 0.6836$ мм; при дисперсії середнього значення показів інтерферометра $S = 1.65556 \cdot 10^{-11}$ мм; середньоквадратичне відхилення показів інтерферометра становить $S_l = 4.06886 \cdot 10^{-6}$ мм; непевність показів інтерферометра $U = 1.81965 \cdot 10^{-6}$ мм при п'ятикратному повторенні вимірювань цієї самій точці.

У результаті 5-кратного калібрування ультразвукового сенсора визначено його метрологічні показники, включаючи похибки вимірювання ним відстані. Визначена похибка вимірювання відстані з допомогою дослідженого сенсора становила 0.6836 мм при відстані ~21 мм або 3,25%.

Як показано вище, у розділі 3, для смарт-сенсора UGT593 фірми IFM [30] діапазон відстаней, що вимірюється з його допомогою становить від 60 мм до 800 мм при розмірі контрольованого об'єкта 100 x 100 мм² і «сліпій» зоні нижче 60 мм. Відносна похибка виявлення, зазначена виробником, не перевищує $\pm 2\%$ при повторюваності показів 1% і роздільчій здатності 1 мм. Це означає, що абсолютна похибка виявлення об'єкту становить ± 8 мм на відстані 400 мм або $\pm 1,2$ мм на мінімальній відстані 60 мм при роздільчій здатності 1 мм. У цілому, СКВ двох факторів становить $\pm 2,57$ мм або 4,4% для відстані 60 мм.

За результатами проведеного калібрування, граничне значення абсолютної похибки каліброваного робочого ЗВТ становить 0.6836 мм при відстані 20,2 мм, тобто працюючи з сенсором в найбільш проблемній «сліпій» зоні ми досягнули результату $\pm 3,3\%$ при роздільчій здатності 1 мкм; СКВ обох зазначених факторів становить ті самі $\pm 3,3\%$.

Інакше, точність калібрування ультразвукового сенсора зросла на 25% (СКВ зменшилось від 4,4% до 3,3%) Указане ще раз підкреслює коректність обраної методології та підбору приладів для перенесення розміру одиниці довжини від робочого еталону до робочого ЗВТ, навіть, у проблемній «сліпій» зоні ультразвукового сенсора.

3.3. Методологія калібрування та використання еталонних засобів

Методологія та методика калібрування повинні визначати порядок проведення, зміст і об'єм робіт по виконанню калібрування засобів вимірювальної техніки. При їх розробленні потрібно враховувати вимоги чинних в Україні нормативних документів та документів системи якості.

На жаль, зазначений інтерферометр є достатньо рідкісним засобом вимірювання Окрім того, саме настроювання, як оптичної лави, так і лазерного

інтерферометра – довготривалий процес, тоді як застосування переносних мір – значно (у декілька разів) пришвидшують процес. Тому нормативні документи рекомендують для перенесення розміру одиниці довжини залучати спеціальні кільцеві міри (п.2.2.3.1 ДСТУ 3741 : 2015). Також як робочі еталони 2-го розряду для калібрування робочих ЗВТ застосовують штрихові міри довжини в діапазоні від 0,001 мм до 1000 мм.

Далі залучення перегородки, як перешкоди-відбивача для лазерного пучка, з одного боку, а також для ультразвукового пучка, з іншого боку, вносить істотну систематичну складову похибки, зумовлену розбіжностями нульової точки відліку розміру, а також шорсткістю поверхні відбивання. Крім того, нагромаджуються зведені похибки, зумовлені незначним обертанням/поворотом сенсора при кріпленні на оптичній лаві і, відповідно, його індикатриси обертання стосовно випромінювання і приймання УЗ сигналу, потраплянням певних ділянок індикатриси на зміщені ділянки поверхні відбивання, тощо.

Внаслідок виникнення додаткових імпакт-факторів змінюється простежуваність результатів калібрування. Виникає потреба гарантувати, що кожен отриманий результат калібрування повідомляється з коректним значенням непевності.

Окрім того, впираємося у методологію калібрування: прямого чи посереднього. ДСТУ 3741 : 2015 переважно рекомендує прямий метод. Тобто, у випадку вищеописаного калібрування ультразвукових сенсорів за показами лазерного інтерферометра, методика калібрування визначена, як пряме або безпосереднє калібрування сенсора за показами інтерферометра.

Допускається непрямий метод калібрування, коли наперед калібрують інтерферометр і визначають з його допомогою відстань до екрану. Потім інтерферометр знімають і на його місце на оптичній лаві встановлюють сенсор, що підлягає калібруванню. Проте, тоді виникають додаткові проблеми, пов'язані: а) з точкою прив'язки сенсора до оптичної лави, б) із кріпленням сенсора; в) з появою нового виду похибки і відповідно виникненням додаткової складової непевності вимірювання, зумовленої можливим зміщенням положення сенсора стосовно попереднього місцезнаходження інтерферометра; в) з

повторним кріпленням інтерферометра на оптичній лаві при калібруванні у наступній точці шкали.

Тому, у роботі акцентовано метод одночасного кріплення лазерного інтерферометра та ультразвукового сенсора на рейці оптичної лави. Тут на екран, встановлений між двома засобами, положення якого сприймається як умовний нуль, одночасно діє оптичне випромінювання лазера та звуковий сигнал сенсора. Визначається відстань до екрану. І якщо у одній точці шкали виникає якась похибка, то вона розглядається як така, що складається із систематичної та випадкової складових. Перша із них усувається або мінімізується при аналізі результатів, а друга – служить базою для обчислення середньоквадратичних відхилень, що характеризують якість вимірювань згідно з [49, 56].

Більше того, підхід усунення з розгляду систематичної складової похибки у вигляді зміщення раніше розглядався у праці [57] і обґрунтовувався, як підхід до об'єднання двох параметрів «неточність» і «зміщення» в комбінований характерний параметр, що описує загальне відхилення вимірювання від цільового значення. Показано, як встановлені максимально допустимі значення похибки та зміщення можна перетворити на нове максимально допустиме значення для нового параметра перевірки, беручи до уваги досвід щодо наперед встановлених потреб, а також технічні обмеження для виконання цих вимог. Зведення двох правил контролю щодо «зміщення» і «похибки» результатів, до одного спільного параметру можна вважати явним спрощенням процедури оцінювання, що, проте, забезпечує певну гнучкість для виконання вимог.

Отож, у нашому випадку може виникати додаткова складова похибки і відповідно непевності отриманих результатів, зумовлена нерівнотовщинністю та нерівногладкістю екрану при його можливому зміщенні відносно центрування та повороту осей лазерного та ультразвукового пучків. Тому профіль екрану додатково вивчали, беручи до уваги роботу [58].

Відзначимо, що обґрунтуванням для введення нового комбінованого параметра контролю служать положення теорії опрацювання результатів вимірювання [49, 59]. За нею дисперсією D випадкової величини X називається математичне сподівання квадрата відхилення цієї величини від її математичного

сподівання (середнього значення). Дисперсія є інваріантною до змін коефіцієнту зсуву/зміщення. Таким чином, додавання константи а до значень випадкової величини не змінює дисперсії:

$$D(X + a) = D(X) \quad (3.2)$$

На цій основі запропоновано підхід для валідації індивідуальних вимірювань контрольних зразків, який дає змогу швидко оцінювати та краще підходить для виявлення критичних відхилень вимірювання якомога раніше. Його можна адаптувати для визначення власних правил контролю за допомогою контрольних вибірок із відомими цільовими значеннями.

- підхід середньоквадратичних відхилень

Нами у даній праці реалізовано підхід [60-62], що базується на середньоквадратичних відхиленнях, який, з одного боку, відповідає положенням [63-64], а, з іншого боку, ефективно впроваджується [65]. При цьому, оптимізація процедури обчислення непевності під час проведення калібрування УЗ сенсорів та самих робочих еталонів здійснюється наступним чином.

Обробка результатів вимірювань і обчислення непевності вимірювань при калібруванні повинно проводитися відповідно до Керівництва з оцінювання непевності вимірювань [63]. Насамперед обчислюються непевності коефіцієнта калібрування та чутливості ЗВТ в кожній точці калібрування. Для цього оцінюються стандартні непевності вхідних величин, описаних вище.

Непевність, що пов'язана з розпорошенням показів приладу, що калібрується, розраховується по типу А за відомою формулою:

$$\frac{u_A(\bar{X}_i)}{\bar{X}_i} = \frac{1}{\bar{X}_i} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3.4)$$

де X_i – результат окремих спостережень; \bar{X}_i – середнє значення багаторазових спостережень.

Інші непевності визначаються по типу В.

Непевність, що вноситься робочим еталоном:

$$\frac{u_B(H)}{H} = \frac{U_{\text{ет}}}{2}, \quad (3.5)$$

де $U_{\text{ет}}$ – розширена непевність еталонного значення із сертифікату калібрування або за даними фірми чи попередніх досліджень. Непевність коригуючого коефіцієнта по відстані розраховується за:

$$\frac{u_B(k_r)}{k_r} = \frac{0,2}{r}, \quad (3.6)$$

де r – відстань у метрах.

Вхідні величини приймаємо як некорельовані. Далі розраховується сумарна стандартна непевність коефіцієнту калібрування для методу безпосереднього калібрування, а бюджет непевності зводиться в табл.3.4.

Таблиця 3.4.

Бюджет непевності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X1 – температура навколишнього середовища			A
X2 - вологість навколишнього середовища			A
X5– відстань між екраном та інтерферометром			B
X6 – кут розсіяння індикатриси сенсора			B
X7– кут розсіювання індикатриси матеріалу екрану			B

Х8 – межі кута девіації кріплення екрану			В
Х9 – спотворення сигналу приймання сенсора багато- кратними гармоніками			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$

Розрахунок сумарної стандартної непевності калібрування при прямих вимірюваннях

Бюджет непевності наведено в табл.3.5.

Таблиця 3.5.

Бюджет непевності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
Х1			А
Х2			В
Х3			В
Х4			В
Х5			В
Х6			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$

Розрахунок сумарної стандартної непевності калібрування для методу непрямого калібрування.

Бюджет непевності наведено в табл.3.6.

Таблиця 3.6.

Бюджет непевності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X1			A
X2			A
X3			B
X4			B
X5			B
X6			B
X7			B
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$

Обчислення непевності калібрування робочого еталону

Тут непевність калібрування еталону – лазерного інтерферометра – дещо змінюється порівняно з прямим методом калібрування, оскільки процес істотно розтягується у часі внаслідок потреби постійно (у кожній каліброваній точці) переінстальовувати на оптичній лаві або еталонний засіб, або калібрований сенсор.

Непевність, що пов'язана з розсіюванням показів робочого еталону, що застосовується під час калібрування, розраховується по типу А, інші непевності визначаються по типу В (табл.3.7).

Таблиця 3.7.

Бюджет непевності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна непевність, %	Тип непевності
X3 – температура лазера, зовні			A

Х4 – часові ефекти лазера			А
Х8 – межі кута девіації кріплення екрану			В
Х9 – спотворення сигналу приймання багатократними гармоніками			В
Вихідна величина	Результат вимірювання	Сумарна стандартна непевність, %	Розширена непевність, %, при $k=2$, $P=0.95$

Тому, як наслідок, у роботі апробовано метод одночасного кріплення лазерного інтерферометра та ультразвукового сенсора на рейці оптичної лави.

Висновки до розділу 3

У розділі описано конструкцію та будову ультразвукових сенсорів фірми IFM, Німеччина, з точністю або $\pm 4,4$ % на нижній межі вимірювального діапазону. Досліджено їхні метрологічні характеристики та придатність до використання їх, як сенсорів відстані для потреб робототехніки. Виділено питання використання їх у процесі передавання одиниці лінійного розміру, як засобів вимірювальної техніки. Проведеними дослідженнями встановлено наступне:

1. Запропоновано і досліджено 2 методи калібрування ультразвукового сенсора за показами лазерного інтерферометра: прямий або безпосередній та посередній (непрямий), кожному з яких притаманні певні переваги та недоліки. Враховуючи специфіку лазерного інтерферометра для калібрування *in situ* сенсора запропоновано використовувати прямий метод. Для цього апробовано одночасне кріплення лазерного інтерферометра та ультразвукового сенсора на рейці оптичної лави, коли на екран, встановлений між двома засобами, положення якого сприймається як умовний нуль, одночасно діє оптичне випромінювання лазера та звуковий сигнал сенсора. Тоді похибка вимірювання, що складається із систематичної та випадкової компонентів, мінімізується усуненням першої - при аналізі результатів, а випадкові відхилення служать базою для обчислення середньоквадратичних відхилень, що характеризують якість вимірювань і передавання розміру одиниці довжини.

2. За результатами калібрування, граничне значення абсолютної похибки каліброваного сенсора становить 0.6836 мм при відстані 20,2 мм від об'єкту, що знаходиться у його «сліпій» зоні, або $\pm 3,3$ % при роздільчій здатності 1 мкм. Воно відповідає вимогам пункту 4.2.2. ДСТУ 3741:2015 (0,05 мкм – 20,2 мм), потрапляючи у зазначені межі. Точність калібрування ультразвукового сенсора зросла на 25 %, оскільки СКВ результатів вимірювання зменшилось від 4,4 % до 3,3 %, що підкреслює коректність обраного методу та підбору приладів для перенесення розміру одиниці довжини від робочого еталону до робочого ЗВТ.

3. Представлено новий підхід до об'єднання двох параметрів «неточність» і «зміщення» в комбінований характерний параметр, що описує загальне відхилення результату вимірювання від цільового значення. Показано, як встановлені максимально допустимі значення похибки та зсуву можна перетворити на нове максимально допустиме значення для нового параметра перевірки, отже, беручи до уваги досвід інших галузей [57], спрощується процедура оцінювання і збільшується швидкість оцінювання результатів та виявлення критичних відхилень вимірювання.

4. Застосовано СКВ-метрологічний підхід для оцінювання якості калібрування ультразвукових сенсорів, який, з одного боку, відповідає положенням [63-64], а, з іншого боку, такий підхід ефективно впроваджується у світі, до прикладу для оцінювання якості поверхонь або якості води за станом її поверхні.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДОЛОГІЯ ВІДДАЛЕНОГО НАВЧАННЯ ОСНОВАМ РОБОТИ І ПРАКТИЦІ ЛАЗЕРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗРОБЛЕНОГО ПЗ

Складність розуміння термінології, унікальність прикладної бази та обмежена кількість студентів аж ніяк не сприяють освоєнню лазерної інтерферометрії включно з практикою використання інтерферометрів. Для вирішення цих проблем пропонується залучення ігрових методів навчання, що дозволяє зробити процес більш ефективним. Застосунок, розроблений на базі платформи Unity [67], має на меті зробити вивчення інтерферометрії доступним, цікавим та ефективним, комбінуючи теоретичні знання з практичними завданнями і ігровими елементами.

Інтерферометрія, яка заснована на явищі інтерференції світла, є однією з найточніших та найбільш надійних методів оптичних вимірювань. Інтерференція відбувається, коли дві або більше хвиль співпадають таким чином, що взаємно посилюють або гасять одне одного. Це явище є ключовим в інтерферометрії та формує визначальні підстави вимірювань високою точністю у технологіях Промисловості 4.0 [68-69].

Вивчення інтерферометрії є невід'ємною частиною Метрології 4.0 [23, 70], як важливого компоненту підготовки фахівців у галузі оптики, метрології та фізики. Вже декілька століть цей метод використовується для дослідження оптичних властивостей різноманітних матеріалів, вивчення деформацій, температурних змін та інших параметрів. Основна відмінність інтерферометрії від інших методів полягає в її високій чутливості та точності.

З розвитком технологій інтерферометрія отримала нове дихання завдяки лазерним технологіям [71]. Лазери, з їх монохроматичним і когерентним світлом, стали ідеальним джерелом для інтерферометричних досліджень, що значно розширило можливості застосування методу.

Проте, не дивлячись на величезний потенціал інтерферометрії, вивчення цього напрямку може бути викликом. Основний бар'єр полягає в складності

термінології, математичних моделях та фізичних принципах, які лежать в основі явища інтерференції. Студентам часто важко уявити абстрактні концепції, що стосуються хвильової природи світла, фазових зсувів та інших аспектів.

Тому існує велика потреба у сучасних методах навчання, які б могли спростити і зробити більш доступним вивчення інтерферометрії для студентів різних рівнів підготовки. Це особливо актуально в умовах, коли традиційні методи навчання можуть не завжди бути ефективними в контексті глибокого розуміння та практичного застосування знань.

В усіх цих контекстах розробка сучасних інструментів для навчання, таких як мобільні застосунки [72], може зіграти важливу роль у підготовці наступного покоління фахівців у галузі інтерферометрії.

Складність розуміння термінології: Інтерферометрія має свою специфічну термінологію, яка може бути незрозумілою для новачків. Такі поняття, як фазовий зсув, когерентність, інтерференційний патерн, можуть викликати замішання без належної підготовки [73].

Унікальність прикладної бази: Інтерферометричне обладнання, особливо те, що використовує лазерні технології, може бути дорогим та вимагає спеціальних умов для роботи. Це може обмежувати доступ до практичної підготовки, особливо для учбових закладів з обмеженими ресурсами.

Обмежена кількість студентів: Оскільки інтерферометрія є досить вузько спеціалізованою галуззю, не всі студенти можуть бачити в ній перспективу для своєї кар'єри або наукових досліджень. Це може призвести до обмеженої кількості людей, які вивчають цей предмет.

Відсутність дидактичних матеріалів: Традиційні навчальні матеріали можуть не завжди ефективно висвітлювати складні поняття інтерферометрії. Це може призвести до того, що студенти мають важкості з розумінням ключових аспектів та принципів методу.

Недостатні практичні навички: Теоретична підготовка – лише одна частина вивчення інтерферометрії. Практичні навички, які здобуваються під час роботи з реальним обладнанням, є невід'ємною частиною навчального процесу. Однак доступ до такого обладнання може бути обмеженим.

Технологічні зміни: Сучасна техніка розвивається швидко, і те, що сьогодні вважається передовою технікою, завтра може стати застарілим. Студентам та викладачам необхідно неперервно оновлювати власні знання та вміння, аби бути в курсі останніх технологічних тенденцій.

Враховуючи вищезазначені недоліки, виникає потреба в нових підходах та методах навчання інтерферометрії, які б могли спростити процес вивчення та зробити його доступнішим широкому колу зацікавлених осіб.

Однак, ефективне використання інтерферометричних методик вимагає глибокого розуміння особливостей принципів роботи, а також набуття практичних навичок.

- **Вивчення особливостей роботи інтерферометричного обладнання.**

Перш за все, необхідно докладно розглянути, як функціонує інтерферометричне обладнання. Від чого залежить його точність? Які фактори можуть впливати на результати вимірювань? Відповіді на ці питання допоможуть студентам краще зрозуміти принципи роботи та взяти під контроль можливі джерела похибок [73].

Все приведене в області лазерної інтерферометрії, де вимагається глибоке розуміння принципів роботи та набуття практичних навичок за умов неперервного розвитку та зміни інтерферометричних методів, методик і, навіть, методології, ускладнюється переходом від однопроменевої до багатопроменевої інтерферометрії, від однохвильової до мультахвильової техніки, від інтерферометрії наноб'єктів до інтерферометрії космічних об'єктів [74].

- **Залучення ігрових візуалізованих методів навчання**

Сучасні педагогічні підходи вказують на ефективність ігрових методів навчання [75], які сприяють збільшенню мотивації студентів, підвищенню їхнього зацікавлення предметом та поглибленню розуміння матеріалу. Використання візуалізованих симуляцій інтерференційних явищ може значно полегшити процес засвоєння складних понять і закономірностей.

Для представлення розробки ігрового штучного інтелекту було використано середовище програмування Unity 3D, тому що воно є найбільш зручним для вирішення поставленої задачі [57, 67].

Його обрано через наступні переваги :

1. Підтримка більшості браузерів;
2. Підтримка мобільних браузерів IOS Mobile Safari, Android Browser, Firefox Mobile for Android;
3. Наявність вбудованого редактора IDE.

Unity3D – це програмне середовище для розробки 2D / 3D ігор і додатків, призначених для роботи в операційних системах Windows, OS X, Windows Phone, Android, Apple iOS, Linux, а також на ігрових консолях Wii, PlayStation 3 і Xbox 360, Xbox One. Існує можливість розробляти інтернет-додатки за допомогою підключення модуля WebGL до браузера Unity.

Всі програмні продукти, створені в середовищі ігрового движка Unity, володіють підтримкою графічних технологій DirectX і OpenGL. Движок вирізняється зручністю інтерфейсу, простотою роботи, а також наявністю безкоштовної версії, яка відрізняється від платної відсутністю підтримки динамічних тіней, деяких складних шейдерів та інших не обов'язкових функцій для некомерційних проектів.

Вбудований в ігровий движок редактор володіє інтуїтивно-зрозумілим Drag & Drop інтерфейсом, який легко адаптувати під себе. Він складається з кількох вікон і робочих панелей і дозволяє налагоджувати ігровий проект безпосередньо в редакторі. Окремо слід згадати про вбудований редактор ландшафту, який дозволяє моделювати ігрові локації безпосередньо в движку, створюючи складну географію і накладаючи текстури прямо в редакторі.

Движок підтримує три скриптових мови: C #, модифікований JavaScript і Boo Script (діалект Python). Редактор також підтримує технології DirectX 11 і HDR. Розрахунок ігрової фізики проводиться фізичним движком PhysX від nVidia.

● **Прикладний аспект інтерферометрії**

Крім теоретичних аспектів, навчальний процес повинен зосереджуватися на практичних навичках, які студенти зможуть застосувати в реальних умовах. Зокрема, це стосується роботи з реальним обладнанням, проведення вимірювань, аналізу результатів та виявлення можливих причин відхилень.

У підсумку, мета методологічної частини дисертаційної роботи полягає у вивченні інтерферометричного обладнання з усіма його особливостями та

розробленні ефективних методів навчання, зокрема, за допомогою ігрових технологій. Такий підхід спрямований на забезпечення глибокого розуміння матеріалу, підвищення мотивації студентів та підготовку висококваліфікованих спеціалістів в галузі інтерферометрії.

4.1. Ігрові методи у освоєнні інтерферометричних технологій та їх розроблення

Завдяки глобалізації та постійному технологічному прогресу сучасні студенти змінюють свої освітні уподобання та методи навчання. Ігрові методи, вже давно використовуються у різних відносинах, набули популярності й у сфері освіти через їх високу ефективність та здатність спонукати до активної участі.

- **Динаміка та мотивація**

Основна перевага ігрових методів полягає у тому, що вони використовують динаміку і конкурентоспроможність для стимулювання інтересу до навчання. Ігри можуть включати елементи змагань, досягнень та нагород, які заохочують студентів активно брати участь та прагнути досягнення найкращих результатів.

- **Візуалізація та досвід**

Ігрові методи дозволяють візуалізувати складні концепції та процеси. Замість читання текстових пояснень студенти можуть спостерігати за діями в реальному часі, проводити експерименти та отримувати безпосередній досвід, що сприяє глибшому розумінню матеріалу.

- **Адаптивність**

Сучасні ігрові методи часто включають адаптивний підхід до навчання [76]. Це означає, що вони автоматично налаштовують рівень складності в залежності від поточних знань та навичок студента, допомагаючи йому зосередитися на тих аспектах, де він потребує найбільшої підтримки.

- **Співпраця та взаємодія у команді**

Багато ігор навчального характеру зосереджені на груповій взаємодії та співпраці. Це дозволяє студентам навчитися працювати разом, обговорювати ідеї та приймати колективні рішення.

- **Занурення**

Завдяки ігровому дизайну та інтерактивності, студенти часто занурюються у навчальний процес, забуваючи про відхилення та дозволяючи собі зосередитися повністю на матеріалі.

4.2. Розроблення ігрових методів освоєння інтерферометрії

На основі Duolingo, як програми для вивчення англійської мови [77], розроблено власну програму для інтерферометрії, так і вивчення метрології. Нижче на зображенні показано саму програму в якій можна залогінитись (рис.4.1), вибрати рівень та прочитати інформацію в книжках (рис.4.2), і сам тест, в якому наведено варіанти відповідей і за неправильну відповідь віднімаються сердечки (рис.4.3).

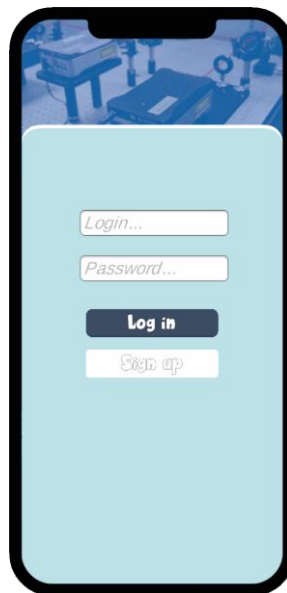


Рис.4.1. Знімок, на якому показано поля для реєстрації в застосунку

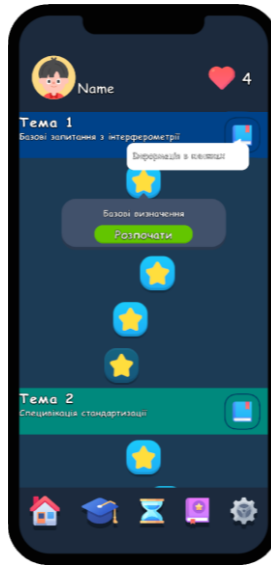


Рис.4.2. Основне меню гри, в якій можна вибрати та розпочати тест (рівень гри)

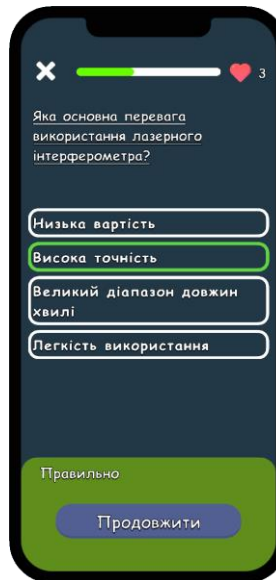


Рис.4.3. Приклад варіанту одного з завдань

Приклад варіанту одного з завдань у питаннях – відповідях (варіанти з указанням правильної відповіді) подано нижче.

1. Що таке метрологія?

- a) Вчення про метрику
- b) Вчення про вимірювання
- c) Вчення про метеорологію
- d) Вчення про метричні системи

Правильна відповідь: b

2. Яке основне призначення інтерферометрії?

- a) Для вивчення погоди
- b) Для вивчення взаємодії лазерів
- c) Для вимірювання довжини хвилі
- d) Для вимірювання лінійних розмірів завдяки використанню явища інтерференції

Правильна відповідь: d

3. Що є джерелом світла в лазерному інтерферометрії?

- a) Сонце
- b) Лампа розжарювання
- c) Лазер
- d) Світлодіод

Правильна відповідь: c

4. Яка основна перевага використання лазерного інтерферометра?

- a) Низька вартість
- b) Висока точність
- c) Значний діапазон довжин хвилі
- d) Легкість використання

Правильна відповідь: b

5. Що таке інтерференція у контексті інтерферометрії?

- a) Взаємодія між двома променями світла
- b) Взаємодія між двома матеріалами
- c) Втрата світла
- d) Підсилення світла

Правильна відповідь: a

6. Якому параметру відповідає взаємодія двох променів світла?

- a) Частоті
- b) Швидкості

c) Інтенсивності

d) Поляризації

Правильна відповідь: а

7. Що можна виміряти за допомогою інтерферометра?

a) Інтенсивність світла

b) Температуру

c) Зміни лінійних розмірів

d) Електричний струм

Правильна відповідь: с

8. Що таке лазер?

a) Літак

b) Вид лампи

c) Світлове джерело, яке випромінює світло внаслідок стимульованого випромінювання

d) Тип радіохвилі

Правильна відповідь: с

9. Яка основна характеристика світла лазера?

a) Поляризоване

b) Монохроматичне

c) Непостійне

d) Багатоколірне

Правильна відповідь: а, b

10. Що таке когерентне світло?

a) Світло однакової довжини хвилі та фази

b) Світло різних кольорів

c) Світло змінної інтенсивності

d) Світло високої поляризації

Правильна відповідь: а

11. Який матеріал часто використовують як резонатор у лазерах?

- a) Пластик
- b) Алмаз
- c) Кристал
- d) Метал

Правильна відповідь: c

12. Яким чином відбувається випромінювання світла?

- a) Атоми поглинають світло
- b) Атоми випромінюють світло
- c) Атоми стабілізуються
- d) Атоми руйнуються

Правильна відповідь: b

13.3 якою метою лазерні інтерферометри часто використовують у промисловості?

- a) Вимірювання відстані
- b) Вимірювання температури
- c) Лазерне різання
- d) Комунікація на великі відстані

Правильна відповідь: a

14. Який принцип роботи лазерного інтерферометра?

- a) Вимірювання інтенсивності світла
- b) Вимірювання частоти світла
- c) Вимірювання часу прольоту світла
- d) Вимірювання інтерференції між двома променями світла

Правильна відповідь: d

15. Чому лазерне світло часто має один колір?

- a) Тому що воно монохроматичне
- b) Тому що воно поляризоване

- c) Тому що воно некогерентне
- d) Тому що воно випромінюється з одного джерела

Правильна відповідь: a

16.Що таке фаза в контексті світла?

- a) Колір світла
- b) Швидкість світла
- c) Напрямок поширення світла
- d) Точка в часі хвилі, що відповідає певному стану коливань

Правильна відповідь: d

17.Які два основних типи інтерференції?

- a) Постійна та змінна
- b) Позитивна та негативна
- c) Конструктивна та деструктивна
- d) Передня та задня

Правильна відповідь: c

18.Як вимірюється довжина хвилі світла?

- a) Амплітуда
- b) Герци
- c) Метри
- d) Секунди

Правильна відповідь: c

19.Чим відрізняється лазер від звичайного джерела світла?

- a) Лазер випромінює світло в більш широкому спектрі
- b) Лазер випромінює світло, що має високий ступінь когерентності
- c) Лазер використовує менше енергії
- d) Лазер не може використовуватися для вимірювань

Правильна відповідь: b

20. В якому році було запропоновано концепцію лазера?

- a) 1910
- b) 1935
- c) 1958
- d) 1965

Правильна відповідь: c

21.3 якою метою використовують лазерні інтерферометри в астрономії?

- a) Для вимірювання відстані між зірками
- b) Для вимірювання діаметра зірок
- c) Для визначення хімічного складу зірок
- d) Для створення зображень зірок в високій роздільній здатності

Правильна відповідь: a

22. Який із наведених пристроїв використовує принцип інтерференції світла для вимірювань?

- a) Гальванометр
- b) Інтерферометр Майкельсона
- c) Осцилограф
- d) Амперметр

Правильна відповідь: b

23. Яке зображення свідчить про деструктивну інтерференцію двох хвиль?

- a) Посилення світлового сигналу
- b) Згасання світлового сигналу
- c) Незмінний світловий сигнал
- d) Пульсуючий світловий сигнал

Правильна відповідь: b

24. Яка з наведених одиниць використовується для вимірювання довжини хвилі світла?

- a) Ампер
- b) Герц
- c) Ньютон
- d) Нанометр

Правильна відповідь: d

25. У якому діапазоні хвиль знаходиться видиме світло?

- a) 1-10 мм
- b) 10-400 нм
- c) 400-700 нм
- d) 1-10 м

Правильна відповідь: c

26. Що таке дифракція?

- a) Розсіювання світла
- b) Відхилення світла
- c) Поглинання світла
- d) Заломлення світла, коли воно проходить крізь отвір або обходить перешкоду

Правильна відповідь: d

27. Що визначає колір лазерного світла?

- a) Його амплітуда
- b) Його частота
- c) Його швидкість
- d) Його інтенсивність

Правильна відповідь: b

28. Яка з наступних речовин є активним середовищем для лазера?

- a) Аргон
- b) Озон

с) Кисень

Правильна відповідь: а

29. В якому році створено перший лазер?

а) 1945

б) 1955

с) 1960

д) 1970

Правильна відповідь: с

30. Що таке аберация в контексті оптики?

а) Збільшення зображення

б) Спотворення зображення

с) Втрата світла

д) Колірне розсіювання

Відповідь: б

31. Який з наступних інтерферометрів використовує дзеркало, що рухається?

а) Інтерферометр Фабрі-Перо

б) Інтерферометр Майкельсона

с) Інтерферометр Юнга

д) Інтерферометр Твісса

Правильна відповідь: б

32. Для чого використовують лазери в медицині?

а) Для діагностики захворювань

б) Для лікування захворювань шкіри

с) Для хірургічних операцій

д) Всі вищезазначені

Правильна відповідь: д

33. Який із наведених лазерів є невидимим для людського ока?

- a) Інфрачервоний лазер
- b) Зелений лазер
- c) Червоний лазер
- d) Синій лазер

Правильна відповідь: a

34. В якому розділі фізики вивчається інтерференція світла?

- a) Термодинаміка
- b) Електродинаміка
- c) Механіка
- d) Оптика

Правильна відповідь: d

35. Що таке когерентне світло?

- a) Світло, яке має різні фази
- b) Світло, що має одну площину поляризації
- c) Світло, яке має різну частоту
- d) Світло, яке поширюється в різних напрямках

Правильна відповідь: b

36. Яке явище відбувається, коли дві або більше хвиль перекриваються, створюючи новий розподіл інтенсивності світла?

- a) Дифракція
- b) Поляризація
- c) Іонізація
- d) Інтерференція

Правильна відповідь: d

37. Для якого лазера характерна дуже коротка довжина хвилі та висока енергія?

- a) СЕМ лазер

- b) Гелій-неоновий лазер
- c) Інфрачервоний лазер
- d) Рентгенівський лазер

Правильна відповідь: d

38.Що таке фазова швидкість хвилі в контексті інтерферометрії?

- a) Швидкість поширення енергії в хвилі
- b) Швидкість зміни амплітуди хвилі
- c) Швидкість зміни частоти хвилі
- d) Швидкість руху фронту хвилі

Правильна відповідь: d

39.Яке з наступних визначень відповідає терміну "метрологія"?

- a) Вивчення вимірювань і приладів для них
- b) Вивчення металів і їх властивостей
- c) Вивчення метеорологічних явищ
- d) Вивчення методів наукового дослідження

Правильна відповідь: a

40.В чому полягає основна відмінність між лазером і звичайним джерелом світла?

- a) Лазер використовує електричний струм
- b) Лазер випромінює світло в одному напрямку
- c) Лазер випромінює світло в багатьох напрямках
- d) Лазер використовує термічний струм

Правильна відповідь: b

41.Який матеріал часто використовується для виготовлення джерела світла у лазері?

- a) Неон
- b) Кристал кремнію
- c) Рубін

d) Діамант

Правильна відповідь: с

42.Що означає термін "лазер"?

a) Легкий автомат для звукових емісій

b) Світлове посилення шляхом стимульованого випромінювання радіації

c) Лінійна активація звукової емісії резонансу

d) Лінійна апроксимація звукових ефектів

Правильна відповідь: b

43.Який компонент в інтерферометрі дозволяє розділити та комбінувати два або більше пучки світла?

a) Лінза

b) Фільтр

c) Дзеркало

d) Бімспліттер (роздільник пучків)

Правильна відповідь: d

У підсумку, використання ігрових методів у навчальному процесі може суттєво підвищити якість та ефективність освіти, якщо у додаток залучати штучний інтелект [78-82]. Ці методи дозволяють студентам активно брати участь у процесі навчання, розуміти та застосовувати знання на практиці, а також розвивати важливі життєві навички, такі як критичне мислення, проблемне рішення та співпраця.

Висновки до розділу 4

Застосування ігрових методів навчання у вивченні інтерферометрії є достатньо ефективним, надаючи студентам змогу глибше розуміти і відчувати матеріал. Мобільний застосунок, розроблений на основі ігрових принципів, не тільки спрощує процес навчання, але і робить його більш захоплюючим і інтерактивним [83].

Незважаючи на деякі недоліки, такі як складність розуміння термінології та обмежена кількість користувачів, такий підхід до вивчення відкриває нові горизонти для освітньої сфери та наукових досліджень. Ігрова візуалізація, динамічні тести та інтерактивні завдання стають містком між теорією і практикою, дозволяючи глибше зануритися в світ вимірювань і досліджень.

Таким чином, інтеграція сучасних технологій інтерактивного та віддаленого навчання з допомогою мобільних застосунків у процес вивчення у даному випадку інтерферометрії та високоточного обладнання на її основі може слугувати ключем до підвищення ефективності впровадження найновіших технологій у виробництво, стимулювання інтересу та розвитку наукової, технічної та технологічної думки, а мобільні застосунки можуть стати незамінними у вивченні інших складних дисциплін, відкриваючи двері до нових методологій навчання та дослідницьких підходів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розглянуто та вивчено особливості вимірювання та перенесення одиниці довжини, а також метрологічного забезпечення вимірювань у діапазоні від 0,1 мм до 100 мм з використанням лазерного інтерферометра, як робочого еталону 2-го розряду, для калібрування ультразвукового смарт-сенсора, як промислового засобу вимірювання. Отримано наступні результати, виражені нижче.

1. Проаналізовані методи і засоби вимірювальної техніки у галузі вимірювання лінійних розмірів, вивчено їх основні метрологічні характеристики та значення для забезпечення метрологічної єдності передавання розміру одиниці довжини.

2. Уточнено метрологічні характеристики лазерного інтерферометра, як робочого еталону 2-го розряду для перевірки та калібрування ультразвукових сенсорів, де виняткового значення набуває методологія здійснення перевірки та особливості передачі розміру одиниці. Для цього на базі оптичної лави розроблено устаткування, проведені дослідження, встановлено чинники впливу, зокрема для мінімізації дрейфу показів інтерферометра. Показано, що при чутливості інтерферометра порядку 0,1 нМ та сумарній абсолютній похибці визначення відстані – 1 нМ, а також при дрейфі показів – до 10 нМ, похибка передавання розміру одиниці довжини становить близько 20 нМ, що суттєво перевищує значення дрейфу показів робочого ЗВТ, що підлягає калібруванню, тобто інтерферометр може служити робочим еталоном стосовно даного ЗВТ. Визначено фактори впливу, що можуть збільшити похибку передавання розміру одиниці довжини та запропоновано заходи для її зменшення, до прикладу термостатування приміщення, де здійснюється калібрування ЗВТ.

3. Описано конструкцію та будову ультразвукових сенсорів, досліджено їхні метрологічні характеристики та придатність до використання їх, як сенсорів відстані для потреб робототехніки. Враховуючи специфіку робочого еталону, для калібрування *in situ* запропоновано використовувати прямий метод калібрування. Для цього апробовано метод одночасного кріплення лазерного

інтерферометра та ультразвукового сенсора на рейці оптичної лави, коли на екран, встановлений між двома засобами, положення якого приймається за умовний нуль, одночасно діє оптичне випромінювання лазера та звуковий сигнал сенсора. Тоді похибка вимірювання, що складається із систематичної та випадкової компонентів, може мінімізуватися при аналізі результатів аж до усунення систематичного компоненту, а при передаванні розміру одиниці довжини випадковий компонент служить для визначення середньоквадратичних відхилень результатів вимірювання, що характеризують їх якість вимірювань.

4. За результатами калібрування, визначене граничне значення абсолютної похибки каліброваного робочого ЗВТ, що становить 0,68 мм, згідно пунктом 4.2.2. ДСТУ 3741:2015 (де вказано діапазон значень 0,05 мкм – 20,2 мм), потрапляє у зазначені межі. Точність калібрування ультразвукового сенсора зросла на 25 %, оскільки СКВ результатів вимірювання зменшилось від 4,4 % (дані фірми-виробника) до 3,3 % (експериментальні результати). Це підкреслює коректність обраного методу та підбору метрологічних інструментів для перенесення розміру одиниці довжини.

5. Застосовано СКВ-метрологічний підхід для оцінювання якості калібрування ультразвукових сенсорів, який відповідає положенням ISO/IEC Guide 98-4:2018 «Невизначеність вимірювань. Частина 4. Роль невизначеності вимірювань під час оцінювання відповідності», що ефективно впроваджується у світі для оцінювання якості поверхонь, в тому числі поверхні води.

6. Для навчання інтерферометричній метрології фахівців та отримання навичок роботи з унікальною вимірювальною технікою на основі ігрових принципів розроблено програмне забезпечення - мобільний застосунок-аналог ПЗ Duolingo, який не тільки спрощує процес навчання, але і робить його захоплюючим і інтерактивним. Для цього сформовано словник термінів, що підлягають вивченню. Зважаючи на складність розуміння термінології та обмежену кількість користувачів, такий підхід до вивчення відкриває нові горизонти для освітньої сфери та наукових досліджень.

Список використаної літератури

- [1]. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 5 червня 2014 року № 1314 – VII, <https://www.rrt.ua/govsupport/index/lawsone/lang/uk?id=94>.
- [2]. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення. З Поправкою (ІПС № 8-96), Держстандарт України, 1994.
- [3]. Метрологія та вимірювальна техніка. За ред. Є. Поліщука, Львів, вид-во «Бескид Біт», 2003.
- [4]. ДСТУ 3741:2015. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання довжини, 2015.
- [5]. В. О. Яцук, Т. З. Бубела, М. М. Микійчук, Є. В. Походило, Забезпечення метрологічної надійності в розпорощених вимірювальних системах // Вимірювальна техніка та метрологія . - 2018. - Т. 79, Вип. 3. - С. 71-82.
- [6]. S.Yurish, Sensors: Smart vs Intelligent, Sensors & Transducers Journal, vol. 114, iss. 3/10, pp. 1-6, 2010.
- [7]. S. Yatsyshyn, B. Stadnyk et all. Cyber-Physical Systems. Metrological Issues, 2016, IFSA Publishing. <https://www.amazon.com/Cyber-Physical-Systems-Metrological-Svyatoslav-Yatsyshyn/dp/8460899624>
- [8]. М. Дорожовець та ін. Метрологія та вимірювання. Навчальний посібник. Львів, вид-во Львівської політехніки, 2012.
- [9]. Норми PN-EN 60501:1-2017-06. Електричні засоби вимірювань, версія англ. <https://sklep.pkn.pl/pn-en-60051-1-2017-06e.html>
- [10]. В. Гудим, С. Яцишин, Вимірювання фізичних величин у галузі безпеки життєдіяльності, Навчальний посібник, Київ: Вид-во «Знання», 2015.
- [11]. Моделі та міри у вимірюваннях. За ред. В. П. Бабака, Київ, Наукова думка, 2019.
- [12]. H. Zhang, J. Wang, C. Guo, Tool Frame Calibration for Robot-Assisted Ultrasonic Testing, Sensors, 2023, 23, 8820. <https://doi.org/10.3390/s23218820>
<https://www.mdpi.com/journal/sensors>.
- [13]. С.П. Яцишин, Б.П.Яцишин. Пожежні сповіщувачі як засоби інформаційно-вимірювальної техніки, Вісник ЛДУБЖД. № 4. - 2010. - С.70 –74.

- [14]. The International System of Units, Bureau International, 2019.
- [15]. A.-V. Midyk, V. Semerak et al., Chapter 4. Metrology 4.0 and Standardization for Agricultural Cyber-Physical Systems / in Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0. / S. Yatsyshyn and B. Stadnyk, *Editors*, IFSA Publishing, Barcelona, Spain, 2021, pp. 159-234.
- [16]. M/ Boween, G. Smith, Considerations for the design of smart sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 47, Issues 1–3, March–April 1995, pp.516-520, [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(94\)00953-F](https://doi.org/10.1016/0924-4247(94)00953-F)
- [17]. Prospect. What is Smart Sensor : Working & Its Applications. <https://www.elprocus.com/smart-sensor/>
- [18]. K. Mašková, O. Ryshkovskyy, I. Petrovska, "IFM Electronic" Company - the new partner of the Department "Information-measuring technologies", vol.78.2017, pp. 108-117. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2017.78.108>
- [19]. А. М. Кирик, С.В.Бреусова, Переваги і недоліки рідинних медичних термометрів, Мат-ли 4-ї науково-практичної конф-ї, Харків, 2019, с.25 <https://tovaroved.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2019/03/Materiali-konferentsiyi-MEDICAL-DEVICES-2019.pdf>
- [20]. M. Nadi, C. Marco, M. Kouider, J. Prado, and D. Kourtiche, Embedded system design and implementation of standard auto-calibrated measurement chain, *Int. Journ. on Smart Sensing & Intel. Systems*, vol.1, No.1, March 2008, pp.21-33.
- [21]. F. M. Mirzaei. Extrinsic and Intrinsic Sensor Calibration. A Diss-n Submit. to Faculty of Grad. School of Un-ty of Minnesota, 2013 <https://core.ac.uk/download/pdf/76345447.pdf>
- [22]. The Quantum Hall Effect, M.E. Cage, K. Klitzing, A.M. Chang, F. Duncan, [M Haldane](#)... - 2012 - books.google.com
- [23]. Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0. Co-editors S. Yatsyshyn, B.Stadnyk, 2021, IFSA Publishing.
- [24]. W. Nawrocky, Quantum Voltage Standard, in [Introduction to Quantum Metrology](#), pp 85–118, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-19677-6_4

- [25]. Nat. Phys. Lab., Time and Frequency, <https://www.npl.co.uk/products-services/time-frequency>
- [26]. U. Blumröder, R. Füßl, T. Fröhlich, E. Manske, R. Mastlyo, Frequency Comb-coupled Metrology Lasers for Nanopositioning & Nano Measuring Machines, Meas. Equipment and Metrology, vol.82, Is.4, 2021, pp.36-42. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2021.04.036>
- [27]. Köchert, "Ultrastable metrology laser at 633 nm using an optical frequency comb". In: Optical Micro-and Nanometrology VII. International Society for Optics and Photonics, p. 106780S, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2306907>
- [28]. Types of Robot Sensors. <https://www.javatpoint.com/types-of-robot-sensors>.
- [29]. Arduino Uno. <https://arduinokit.com.ua/ua/>
- [30]. IFM products prospect <https://www.ifm.com/ua/uk/product/UGT593?tab=details>
- [31]. SIOS, Precision in Measurement <https://www.sios-precision.com/>
- [32]. Проспект фірми ПЕ-КО <https://peko.com.ua/distance-sensors/ultrasonic-distance-sensors>
- [33]. Проспект фірми Бош. <https://www.automaster.net.ua/artykuly/ultrazvukovi-datchiki-bosch-6-pokolinnya-vzhe-dostupni-v-ukrayini,55525>
- [34]. G. Ganzhi, C. Xu, J. Hao, D. Xiao Ultrasonic Non-Destructive Testing System of Semi-Enclosed Workpiece with Dual-Robot Testing System, July 2019, Sensors 19(15):3359, DOI:[10.3390/s19153359](https://doi.org/10.3390/s19153359)
- [35]. Y. Guo, B. Song, X. Tang, X. Zhou, Y. Xie, J. Jin, Calibration for kinematic parameters of industrial robot by a laser displacement sensor. In Proceedings of the International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Singapore, 18–21 November 2018.
- [36]. Y. Liu, Z. Zhuang, Y. Li, Closed-Loop Kinematic calibration of robots using a six-point measuring device. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2022, 71, 1–12.
- [37]. L.L. Beranek, "Acoustical measurements," AIP, Woodbury, NY, 1988.
- [38]. V. Magori, "Ultrasonic sensors in air," IEEE Ultrasonic symposium, Proceedings, pp. 471-481 (1994).

- [39]. D. Caicedo and A. Pandharipande, "Ultrasonic array sensor for indoor presence detection", 20th European Signal Processing Conference, 2012. pp. 175-179.
- [40]. A. M. Zungeru, "Design and development of ultrasonic motion detector", School of Electrical and Electronic Engineering, 2016, 13 p.
- [41]. Yo. Na, The design of ultrasonic range finder, AIP Conf. Proc., 1820, 060024 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4977339>, Publ. Online: 13 March 2017.
- [42]. Ultrasound sensor. Robotics tutorials, tagged Hokuyo, lego mindstorms, SICK, TeraRanger, TOF, Ultrasound sensor on 21 Mar 2017 by V. Mazzari, <https://blog.generationrobots.com/en/ultrasound-sensor-high-quality-ultrasound-sensors-available-now/>
- [43]. S. Yatsyshyn, I. Nazarkevych, R. Mastylo, Calibration of the Ultrasonic Sensor-Range Finder by the Laser Interferometer, Measuring Equipment and Metrology, Volume 80, Number 4, pp.10-17, 2020, <https://doi.org/10.23939/istcmtm2020.04.010>
- [44]. Р. В. Бичківський, П. Г. Столярчук, П. Р. Гамула, Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація, Львів, вид-во Нац. Ук-ту «Львівська політехніка», 2004.
- [45]. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT).
- [46]. Вимірювання в нанотехнологіях: методи і засоби: навч. посібник / Гамула П.Р ... І., Стадник Б.І.. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2016.
- [47]. В. Stadnyk, S. Yatsyshyn, I. Hrytsyn, K. Levytska / Development of noise measurements / Part 6. Opposing method in stepless shifting regulation/ Sensors and Transducers/ 2013/155(8), с. 300-304
- [48]. E. Manske, G. Jager, R. Mastylo, D. Dontsov, Nanopositioning & Nanomeasuring Machine for Multi-Sensor Application, Measuring Equipment and Metrology, Iss.1, Vol.81, pp.17-24, 2020.
- [49]. М. Дорожовець, Опрацювання результатів вимірювань, Львів, Україна, Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2007.
- [50]. Вимірювання температури: теорія і практика / [Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І.]. - Львів : Бескид Біт, 2006.

- [51]. K. Aparna1, B. Umesh, Overview Of Sensors For Robotics, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 2 Issue 3, 2013, pp.1-5.
<https://www.ijert.org/research/overview-of-sensors-for-robotics-IJERTV2IS3450.pdf>
- [52]. А.-В.В.Мідик, О.В. Лиса. Дослідження точності визначення температурно-вологісних характеристик системи температурно-вологісного контролю теплиці/ Мідик А.-В.В., Лиса О.В./ Міжвідомчий науково-технічний збірник “Вимірювальна техніка та метрологія”, 2020. Львів: том.81 (2), сс.7-12.
<https://doi.org/10.23939/istcmtm2020.02.007>
- [53]. O. Sehed, I. Nazarkevych, Series termination of single-ended LVCMOS signals, Measuring Equipment and Metrology, Volume 84, Number 4, pp.5-9, 2023,
<https://doi.org/10.23939/istcmtm2023.04.005>.
- [54]. А. Дуднік, Розробка мікропроцесорного частотоміра для комп’ютеризованих систем вимірювання відстані // Вісник Інженерної академії України, 2018, вип. № 1, сс.162 -167.
- [55]. А. Дуднік, Аналіз методів вимірювання відстаней між об’єктами за допомогою сенсорних мереж // Молодий вчений, 2018, вип.3, сс. 213 -216.
- [56]. М. Микийчук, Метрологічне забезпечення виробництва, Львів, Україна, Вид-во Львівської політехніки, 2017.
- [57]. Trends in quality in the analytical laboratory. I. Traceability and measurement uncertainty of analytical results, July 2004, TrAC Trends in Analytical Chemistry 23(7):480-490, DOI: [10.1016/S0165-9936\(04\)00733-2](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(04)00733-2), Authors: [Isabel VJ Taverniers](#), [Marc De Loose](#), [Erik Van Bockstaele](#)
- [58]. [Jung-Hwan Kim](#), Advanced measurement and diagnosis of the effect on the underlayer roughness for industrial standard metrologym, *Scientific Reports*, vol. 9, Article number: 1018, 2019.
- [59]. COOMET R/GM/32:2017. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределённости.
- [60]. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology. – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – JCGM. – 2008. – 90 p.
- [61]. Publication Reference EA-4/02 M:2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, 4th April 2022.

- [62]. I. Nazarkevych, O. Seheda, Features of transferring size of unit of length from working standard to measuring device, *Measuring Equipment and Metrology*, Volume 85, Number 1, 2024, pp.16-24, 2024, <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.01.016>
- [63]. Керівництво з виразу невизначеності вимірювань Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Part 6: Developing and using measurement models, 2020.
- [64]. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-4:2018 Невизначеність вимірювань. Частина 4. Роль невизначеності вимірювань під час оцінювання відповідності.
- [65]. M. Uddin, S. Nash, A. Rahman, A. Olbert, A novel approach for estimating and predicting uncertainty in water quality index model using machine learning approaches, *Water Research*, Volume 229, 1 February 2023, 119422.
- [66]. RMS Metrology Solutions, <https://rotatingmachinery.com/rms-metrology-solutions/by Rotating Machinery | Jan 16, 2023 | Metrology |>
- [67]. Онлайн-курс “Unity Game Developer” від robot_dreams (подія в архіві) <https://dou.ua/calendar/47212/>
- [68]. L. Dalenogare, G. Benitez, N. Ayala, A. Frank, The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance, *International Journal of Production Economics*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- [69]. A. Gilchrist, *Industry 4.0. The Industrial Internet of Things*, 2016 <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4842-2047-4>
- [70]. M. Wiczorowski, J. Trojanowska, O. Sokolov, Digital and Information Technologies in Metrology 4.0, *DSMIE 2023: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI*, pp 81–90, 23.05.2023. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-32767-4_8
- [71]. M. Csele. *Fundamentals of Light Sources and Lasers*. Wiley. 2004, ISBN 0-471-47660-9. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/0471675210.fmatter>
- [72]. В. Бондаренко, Мобільні застосунки як інструмент самоосвіти в середовищі покоління Z, *Український журнал з бібліотекознавства та інформаційних наук*, (1), 86–98. <https://doi.org/10.31866/2616-7654.1.2018.146298>
- [73]. S. Yatsyshyn, I. Nazarkevych, Learning interferometric equipment through integration of game methods into mobile application, *Energy Engineering and Control*

Systems, Volume 9, Number 2, pp.131-135, 2023.

<https://doi.org/10.23939/jeecs2023.02.131>

[74] F. Millour, Interferometry Concepts, 2015, HAL Id: hal-01183452, <https://hal.science/hal-01183452>, Submit. 11 Aug 2015.

[75]. S. Ucus, Elementary School Teachers' Views on Game-based Learning as a Teaching Method, Procedia - Social and Behavioral Sciences 186, 2015, pp.401–409. <https://pdf.sciencedirectassets.com/277811/1->

[76]. S. Ennouamani, Z. Mahani, An overview of adaptive e-learning systems, Proc. 8th IEEE Internat. Conf. on Intel. Comp. & Inf. Systems (ICICIS 2017), 2017, pp.342-347. https://www.researchgate.net/profile/Soukaina-Ennouamani/publication/322586183_An_overview_of_adaptive_e-learning_systems/links/5a79962645851541ce5ce990/An-overview-of-adaptive-e-learning-systems.pdf

[77]. I. F. Harahap, Duolingo Application in English Teaching Practice: Teacher's Perception, Knowledge E, DOI: [10.18502/kss.v8i8.13289](https://doi.org/10.18502/kss.v8i8.13289), <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Social/article/view/13289/21470>

[78]. Alex J. Champandar Artificial intelligence in computer games // M.: ID Viljams, 2007.

[79]. M.Z.Tohsmatov, Sh.U.Janadilov, Artificial intelligence algorithm of computer game "Tojmot", Har. Edu.a.sci.rev. 0362-8027, Vol.2. Issue 1 Pages 7-13. [10.5281/zenodo.5841675](https://zenodo.org/record/5841675)

[80]. H. Polasios Unity 5.x. Programming artificial intelligence in games, DMK Press, 2017.

[81]. G. Luger, "Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving," 6th Edition, Addison-Wesley, Boston, 2009, pp. 200-201.

[82]. D. Ozkiziltan, A. Hassel, Artificial Intelligence at Work: An Overview of the Literature, January 2021, SSRN Electronic Journal, DOI:10.2139/ssrn.3796746

[83]. W. Goldstone, Unity Game Development Essentials, 2009, pp. 9-115.

Додатки

Додаток 1.

ДСТУ 3741:2015 Метрологія. 2915, Державна повірочна схема для засобів вимірювання довжини

Цей стандарт поширюється на державну повірочну схему для засобів вимірювання довжини в діапазоні від $1 \cdot 10^9$ м до $1 \cdot 10^5$ м і довжин хвиль у діапазоні від 0,2 мкм до 50 мкм (додатки А, Б, В, Г, Д) і встановлює призначення державного первинного еталона одиниці довжини, комплекс основних засобів вимірювальної техніки, які входять до його складу, основні метрологічні характеристики еталона та порядок передавання розміру одиниці довжини від державного еталона за допомогою вторинних та робочих еталонів робочим засобам вимірювальної техніки з зазначенням похибок та основних методів повірки (калібрування).

Повірочна схема складається з таких п'яти частин:

- Частина 1. Джерела випромінювання та засоби вимірювання довжини хвиль (додаток А);
- Частина 2. Штрихові міри довжини та вимірювачі переміщень (додаток Б);
- Частина 3. Плоскопаралельні кінцеві міри довжини та вимірювальні кільця (додаток В);
- Частина 4. Віддалеміри та приймачі супутникових навігаційних систем (додаток Г);
- Частина 5. Засоби мікроскопії, вимірювачі нанопереміщень та міри розмірних параметрів наноструктур (додаток Д).

Додаток 2.

Лістинг програми підключення ультразвукового сенсора до рідкокристалічного дисплею

```
#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

const int sampleWindow = 50;

unsigned int sample;

LiquidCrystal_I2C lcd ( 0x27 , 16 , 2 ) ;

void setup ()

{

    Serial.begin (9600);

}

void loop ()

{

    unsigned long startMillis = millis ();

    unsigned int peakToPeak = 0; // розмах коливань

    unsigned int signalMax = 0;

    unsigned int signalMin = 1024;

    while (millis () - startMillis <sampleWindow)

    {

        sample = analogRead (0);

        if (sample <1024)    {
```

```
if (sample > signalMax)    {  
  
    signalMax = sample; // збереження максимального значення  
  
}  
  
else if (sample < signalMin)    {  
  
    signalMin = sample; // збереження мінімального значення  
  
}  
  
}  
  
}  
  
peakToPeak = signalMax - signalMin; // max - min = розмах коливань  
  
if (peakToPeak > 75 {  
  
    lcd. print ( "Current level of sound is dangerous for health. Current level is " +  
peakToPeak + " dB" );  
  
    } else {  
  
        lcd.print("");  
  
    }  
  
}
```

Додаток 3.

Текст програми забезпечення параметрів оточуючого середовища по температурі та вологості при проведенні калібрування

(для контролю використовується додатково підключення через Wi-Fi модуль)

```
#include "DHT.h" //Підключаємо бібліотеку для модуля DHT
#include<SoftwareSerial.h> //Підключаємо бібліотеку для wifi модулю
#include <LiquidCrystal_PCF8574.h>//Підключаємо бібліотеку для LCD

LiquidCrystal_PCF8574 lcd(0x3F);// Оголошення дисплею, передача адреси дисплею

DHT dht(10, DHT11); //Призначаємо пін для нашого DHT модуля, Вказуємо тип модуля DHT 11

SoftwareSerial client(2,3); //RX, TX
String webpage="";
int i=0,k=0;
String readString;
int x=0;
boolean No_IP=false;
String IP="";
char temp1='0';
String name="<p>Roman Voityk!</p>"; //22
String temperatureStart="<p>Temperature: "; //21
String temperatureEnd=" C</p>";
String humidityStart="<p>Humidity: ";
String humidityEnd=" %</p>";
void check4IP(int t1)
{
  int t2=millis();
  while(t2+t1>millis())
  {
    while(client.available(>0)
    {
      if(client.find("WIFI GOT IP"))
      {
        No_IP=true;
      }
    }
  }
}
```

```

    }
}
void get_ip()
{
    IP="";
    char ch=0;
    while(1)
    {
        client.println("AT+CIFSR");
        while(client.available()>0)
        {
            if(client.find("STAIP,"))
            {
                delay(1000);
                Serial.print("IP Address:");
                while(client.available()>0)
                {
                    ch=client.read();
                    if(ch=='+')
                    break;
                    IP+=ch;
                }
            }
            if(ch=='+')
            break;
        }
        if(ch=='+')
        break;
        delay(1000);
    }
    Serial.print(IP);
    Serial.print("Port:");
    Serial.println(80);
}
void connect_wifi(String cmd, int t)
{
    int temp=0,i=0;
    while(1)
    {
        Serial.println(cmd);
        client.println(cmd);
        while(client.available())
        {
            if(client.find("OK"))
            i=8;
        }
        delay(t);
    }
}

```

```

    if(i>5)
    break;
    i++;
}
if(i==8)
Serial.println("OK");
else
Serial.println("Error");
}
void wifi_init()
{
    connect_wifi("AT",100);
    connect_wifi("AT+CWMODE=3",100);
    connect_wifi("AT+CWQAP",100);
    connect_wifi("AT+RST",5000);
    check4IP(5000);
    if(!No_IP)
    {
        Serial.println("Connecting Wifi....");
        connect_wifi("AT+CWJAP=\"1st floor\", \"muda1884\",7000);    //provide
your WiFi username and password here
// connect_wifi("AT+CWJAP=\"vpn address\", \"wireless network\",7000);
    }
    else
    {
    }
    Serial.println("Wifi Connected");
    get_ip();
    connect_wifi("AT+CIPMUX=1",100);
    connect_wifi("AT+CIPSERVER=1,80",100);
}
void sendwebdata(String webPage)
{
    int ii=0;
    while(1)
    {
        unsigned int l=webPage.length();
        Serial.print("AT+CIPSEND=0,");
        client.print("AT+CIPSEND=0,");
        Serial.println(l+2);
        client.println(l+2);
        delay(100);
        Serial.println(webPage);
        client.println(webPage);
        while(client.available())
        {
            //Serial.print(Serial.read());

```

```

        if(client.find("OK"))
        {
            ii=11;
            break;
        }
    }
    if(ii==11)
    break;
    delay(100);
}
}
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    client.begin(9600);
    wifi_init();
    Serial.println("System Ready..");
}
void loop()
{
    k=0;
    Serial.println("Please Refresh your Page");
    while(k<1000)
    {
        k++;
        while(client.available())
        {
            if(client.find("0,CONNECT"))
            {
                Serial.println("Start Printing");
                Send();
                Serial.println("Done Printing");
                delay(1000);
            }
        }
        delay(1);
    }
}
void Send()
{
    webpage=name;
    webpage+=temperatureStart;
    webpage+=dht.readTemperature();
    webpage+=temperatureEnd;
    webpage+=humidityStart;
    webpage+=dht.readHumidity();
    webpage+=humidityEnd;
}

```

```
sendwebdata(webpage);  
delay(1000);  
sendwebdata(webpage);  
client.println("AT+CIPCLOSE=0"); }
```

```
void setup() {
```

```
  lcd.begin(16,2);// запалення дисплею через модуль I2C  
  lcd.setBacklight(255); // запалення підсвітки дисплею  
  Serial.begin(9600);  
  dht.begin();//починаємо зчитування з модуля DHT
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  lcd.setCursor(0, 0);//Задаємо положення тексту на LCD  
  lcd.print("Temp: ");//Виводимо текст на LCD  
  lcd.print(dht.readTemperature());//Виводимо температуру на LCD  
  lcd.print("C");//Виводимо одиниці вимірювання температури на LCD  
  lcd.setCursor(0,1);//Задаємо положення тексту на LCD  
  lcd.print("Humidity: ");//Виводимо текст на LCD  
  lcd.print(dht.readHumidity());//Виводимо вологість на LCD  
  lcd.print("%");  
  delay(500);//Затримка
```

```
}
```

Додаток 4.

«Затверджую»
Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., проф. _____ Іван ДЕМИДОВ
« » _____ 2024 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
на здобуття вченого ступеню доктора філософії
Назаркевичем Ігорем Богдановичем
в Національному університеті «Львівська політехніка», Україна

Даним актом підтверджується, що Національний університет «Львівська політехніка» використав результати дисертаційної роботи аспіранта Львівської політехніки Назаркевича Ігоря Богдановича за темою «Калібрування УЗ сенсорів лінійного переміщення з допомогою лазерного інтерферометра», у навчальному процесі на кафедрі «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології», в тому числі магістрів при викладанні дисципліни «Робототехніка, системи та комплекси», та аспірантів при викладанні дисциплін «Вибрані питання опрацювання результатів вимірювань та вимірювальних сигналів», «Аналітичні та чисельні методи досліджень».

Завідувачка кафедри ІВТ,

д.т.н., професор _____

Тетяна БУБЕЛА