

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра робототехніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО
ПРИСТРОЮ**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі
системи»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМ(МОРВС)-42
Була Анатолій Сергійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Придальний Борис Іванович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Придальний Борис Іванович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспортної та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Булі Анатолію Сергійовичу

Керівник роботи: Придальний Борис Іванович

затверджені наказом ЛНТУ від «31» грудня 2025 р. №962/01-07

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «1» червня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи: Розробка контактної координатно-вимірювального пристрою з робочою зоною 300 x 200 x 150мм.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити): Вступ. Аналіз конструкцій та досліджень характеристик функціонування координатно-вимірювальних пристроїв. Розробка методології побудови структури координатно вимірювального пристрою. Розрахунок та аналіз параметрів запропонованого координатно-вимірювального пристрою. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел.**

5. Перелік графічного матеріалу: Координатно-вимірювальний пристрій трьох осей, Щуп контактний для координатно-вимірювального пристрою, Схема контрольних точок та результати вимірювань, Аналіз похибок контактної вимірювального пристрою.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «4» лютого 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Обґрунтування теми</i>	3.03.2026р.	
2	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	6.03.2026р.	
3	<i>Аналіз конструкцій та досліджень характеристик функціонування координатно-вимірювальних пристроїв</i>	12.03.2026 р.	
4	<i>Розробка методології побудови структури координатно вимірювального пристрою</i>	28.03.2026 р.	
5	<i>Розрахунок та аналіз параметрів запропонованого координатно-вимірювального пристрою</i>	15.04.2026 р.	
6	<i>Охорона праці</i>	30.04.2026 р.	
7	<i>Висновки</i>	15.05.2026р.	
8	<i>Формування списку використаних джерел</i>	22.05.2026р.	
9	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	28.05.2026р.	
10	<i>Нормоконтроль</i>	2.06.2026р.	
11	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	2.06.2026р	
12	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	15.06.2026р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (Була А.С.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (Придальний Б.І.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Була А.С. Розробка структури координатно-вимірювального пристрою.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи» із спеціальності 131 – Прикладна механіка. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2026

Робота присвячена питанням розробки координатно-вимірювального пристрою. В роботі розроблено механічну структуру пристрою, виконано аналіз похибок. Було розглянуто основні види координатно-вимірювальних пристроїв, виконано аналіз контактних та безконтактних вимірювальних пристроїв.

Ключові слова: контактний щуп, інкрементальний енкодер, координати, похибка, координатно-вимірювальний пристрій.

ANNOTATION

Bula A.S. Development of the structure of a coordinate measuring device.

Qualification work of a bachelor of the OP "Metalworking equipment and robotic production systems" in the specialty 131 - Applied mechanics. - Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2026

The work is devoted to the issues of developing a coordinate measuring device. The work developed the mechanical structure of the device, performed an analysis of errors. The main types of coordinate measuring devices were considered, and an analysis of contact and non-contact measuring devices was performed.

Keywords: contact probe, incremental encoder, coordinates, error, coordinate measuring device.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНУВАННЯ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ.....	7
1.1 Загальне призначення координатно-вимірювальних пристроїв.....	7
1.2 Класифікація за способом вимірювання.....	9
1.3 Контактні координатно-вимірювальні пристрої.....	11
1.4 Безконтактні координатно-вимірювальні пристрої.....	12
1.5 Класифікація за конструктивним виконанням.....	14
1.6 Основні проблеми існуючих координатно-вимірювальних пристроїв.....	17
1.7 Висока вартість обладнання та обслуговування.....	17
1.8 Вплив вібрацій і нестабільності зовнішнього середовища.....	18
1.9 Похибки механічної конструкції.....	18
1.9.1 Похибки датчиків положення.....	19
1.9.2 Складність калібрування та перевірки точності.....	19
1.9.3 Складність програмного забезпечення та обробки даних.....	20
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ПОБУДОВИ СТРУКТУРИ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	21
2.1 Постановка задачі розробки пристрою.....	21
2.2 Формування вимог до координатно-вимірювального пристрою.....	22
2.3 Вибір методу вимірювання координат.....	24
2.4 Структурна схема пристрою.....	25
2.5 Обґрунтування вибору датчиків положення та вимірювального щупа.....	26
2.6 Методика визначення координатних точок.....	28
2.7 Методика розрахунку похибок вимірювання.....	30
2.8 Програмне забезпечення координатно-вимірювального пристрою.....	32

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЗАПРОПОНОВАНОГО КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО

ПРИСТРОЮ.....	36
3.1 Вихідні дані для розрахунку.....	36
3.2 Розрахунок похибки дискретизації датчиків положення.....	37
3.3 Розрахунок координат вимірюваних точок.....	38
3.4 Розрахунок відстані між точками.....	39
3.5 Розрахунок середнього значення координати.....	40
3.6 Розрахунок повторюваності вимірювання.....	41
3.7 Розрахунок абсолютної та відносної похибки.....	42
3.8 Розрахунок температурної похибки.....	43
3.9 Розрахунок механічної похибки пристрою.....	44
3.10 Розрахунок сумарної похибки пристрою.....	45
3.11 Оцінка відповідності пристрою заданим вимогам.....	47

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС РОБОТИ З КООРДИНАТНО- ВИМІРЮВАЛЬНИМ

ПРИСТРОЄМ.....	48
4.1 Організація робочого місця під час роботи з координатно-вимірювальним пристроєм.....	48
4.2 Вимоги безпеки праці та пожежної безпеки під час роботи з координатно-вимірювальним пристроєм.....	49
4.3 Загальні застереження та безпека життєдіяльності під час роботи з КВМ.....	50
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Координатно-вимірювальний пристрій є технічною системою, призначеною для визначення координат точок на поверхні деталі. На основі отриманих координат можна визначати розміри, форму, положення отворів, пазів, площин, виступів та інших елементів конструкції. Такі пристрої мають важливе значення у сучасному виробництві, оскільки дозволяють виконувати контроль геометричних параметрів деталей з більшою точністю та стабільністю порівняно зі звичайними ручними вимірювальними інструментами.

Об'єктом дослідження є процес координатного вимірювання геометричних параметрів деталей.

Предметом дослідження є структура координатно-вимірювального пристрою, його механічна частина, система переміщення, датчики положення, контактний щуп, контролер обробки даних та спосіб визначення координатних точок.

Задачею дослідження є розробка доступної структури координатно-вимірювального пристрою, яка дозволить виконувати контроль деталей у лабораторних умовах. Для цього необхідно проаналізувати координатно-вимірювальні машини, визначити їх переваги та недоліки, обґрунтувати вибір контактного методу вимірювання, розробити механічну структуру пристрою, підібрати датчики положення та контролер, а також описати принцип отримання координат і подальшого обчислення параметрів деталі.

Загальний стан розвитку координатно-вимірювальних пристроїв показує, що вони стали важливою частиною системи контролю якості у промисловості. Сучасні координатно-вимірювальні машини можуть працювати з контактними щупами, безконтактними оптичними або лазерними сенсорами, а також поєднувати декілька методів вимірювання. Завдяки цьому вони використовуються не лише для перевірки розмірів, а й для контролю поверхонь, порівняння деталі з CAD-моделлю, аналізу відхилень та створення цифрових копій виробів.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Користь координатно-вимірювальних пристроїв полягає в тому, що вони дозволяють підвищити точність контролю, зменшити кількість браку, скоротити час перевірки деталей і знизити вплив людського фактора. Без використання таких пристроїв контроль складних деталей виконується переважно штангенциркулями, мікрометрами, індикаторами та іншими ручними засобами.

При використанні координатно-вимірювального пристрою процес контролю стає більш автоматизованим. Деталь встановлюється на робочий стіл, вимірювальний щуп або сенсор проходить задані точки, а система фіксує координати. Це дає можливість виконати подальшу математичну обробку результатів. У результаті можна визначити габарити деталі, відстані між елементами, відхилення від заданої форми та відповідність кресленню або цифровій моделі.

Координатно-вимірювальні пристрої широко використовуються у машинобудуванні, автомобільній промисловості, авіаційній галузі, приладобудуванні, робототехніці, медичній техніці та електроніці. Вони особливо корисні там, де потрібно контролювати деталі складної форми, корпусні елементи, фланці, вали, втулки, кронштейни, отвори, посадкові поверхні та вироби, виготовлені методом 3D-друку. У навчальних лабораторіях такі пристрої також мають значення, оскільки дозволяють вивчати принципи координатних вимірювань, калібрування, обробки даних і оцінювання похибок.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

1.1. Загальне призначення координатно-вимірювальних пристроїв

Координатно-вимірювальні пристрої призначені для визначення просторового положення точок на поверхні деталі або виробу. На основі отриманих координат виконується контроль геометричних параметрів: довжини, ширини, висоти, діаметрів, отворів, пазів, площинності, паралельності, перпендикулярності, співвідносності та інших характеристик. У літературі координатно-вимірювальна машина визначається як вимірювальна система, що має засоби переміщення щупової системи та можливість визначати просторові координати на поверхні заготовки або деталі.

На відміну від звичайних вимірювальних засобів, таких як штангенциркуль, мікрометр або індикатор, координатно-вимірювальні пристрої дозволяють виконувати контроль у тривимірній системі координат. Це особливо важливо для деталей складної форми, де необхідно перевіряти не лише окремий розмір, а й взаємне розташування багатьох поверхонь. У джерелах з координатної метрології підкреслюється, що розвиток координатно-вимірювальних машин був пов'язаний із потребами високоточного виробництва та ускладненням геометрії деталей, зокрема у машинобудуванні та авіаційній галузі.[1]

Одним із головних призначень координатно-вимірювальних пристроїв є контроль якості виготовлених деталей. У виробничих умовах кожна деталь має певні відхилення від номінальної геометрії, заданої у кресленні або CAD-моделі. Завдання координатного контролю полягає у визначенні цих відхилень і прийнятті рішення щодо придатності виробу.

Координатно-вимірювальні пристрої використовуються не лише для остаточного контролю готової продукції, а й для проміжного контролю у процесі виробництва. Це дозволяє своєчасно виявити відхилення, скоригувати

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметри обробки та зменшити кількість браку. [2]

У стандартах ДСТУ ISO 10360 координатно-вимірювальні машини розглядаються з точки зору приймальних і періодичних випробувань. Це підтверджує, що КВМ є не лише вимірювальним пристроєм, а й важливою частиною системи забезпечення якості, де необхідно регулярно підтверджувати точність і придатність обладнання до використання.[1]

1.2. Класифікація за способом вимірювання

Однією з основних ознак класифікації координатно-вимірювальних пристроїв є спосіб отримання інформації про координати точок поверхні деталі. За цією ознакою координатно-вимірювальні пристрої поділяють на контактні, безконтактні та мультисенсорні. Кожна з цих груп має свої особливості, переваги, обмеження та сферу раціонального застосування.

Контактні координатно-вимірювальні пристрої працюють за принципом механічного дотику вимірювального щупа до поверхні деталі. У момент контакту система фіксує положення щупа по координатах X, Y та Z. Такий спосіб вимірювання забезпечує високу точність і добру повторюваність результатів. Контактні системи доцільно застосовувати для контролю жорстких деталей, отворів, пазів, площин, посадкових поверхонь та інших елементів, де важлива точність визначення геометричних параметрів.

Безконтактні координатно-вимірювальні пристрої визначають координати без фізичного дотику до поверхні. Для цього використовують лазерні, оптичні або відеовимірювальні сенсори. Основною перевагою таких систем є висока швидкість вимірювання та відсутність механічного впливу на деталь. Вони особливо ефективні при контролі тонких, м'яких, крихких або складних за формою виробів. Водночас точність безконтактного вимірювання може залежати від властивостей поверхні, зокрема її кольору, блиску, прозорості, шорсткості та умов освітлення.

Мультисенсорні координатно-вимірювальні пристрої поєднують контактний і безконтактний методи вимірювання. Вони дозволяють

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати переваги обох підходів: контактний щуп для точного контролю окремих геометричних елементів, а оптичний або лазерний сенсор для швидкого сканування складних поверхонь. Такі системи є найбільш універсальними, однак мають складнішу конструкцію, вищу вартість і потребують якісного калібрування.

Таким чином, вибір способу вимірювання залежить від поставленого завдання, матеріалу деталі, складності її форми, необхідної точності та умов експлуатації. Для високоточного контролю жорстких деталей доцільно застосовувати контактні системи, для швидкого сканування і вимірювання чутливих поверхонь безконтактні, а для універсальних вимірювальних задач мультисенсорні координатно-вимірювальні пристрої.

В таблиці 1.1 вказано класифікацію координатно-вимірювальних пристроїв за способом вимірювання.[1]

Таблиця 1.1- Класифікація координатно-вимірювальних пристроїв за способом вимірювання

Тип пристрою	Принцип роботи	Основні переваги	Основні недоліки	Приклади застосування
Контактні	Вимірювання виконується контактним. Щуп торкається поверхні деталі.	Висока точність повторювальності.	Менша швидкість. Присутність оператора контролю щупа.	Вали, корпуси, плоскі деталі
Безконтактні	Вимірювання виконується за допомогою оптичного лазера.	Висока швидкість, відсутність механічного впливу на деталь.	Підвищене енергоспоживання, залежність від середовища.	Плати, складні поверхні.
Мультисенсорні	Поєднання контактної і безконтактної вимірювання.	Універсальність, можливість вимірювати різні типи поверхонь.	Вища вартість та складніший ремонт.	Високоточне виробництво, авіаційні деталі, складні конструкції.

1.3. Контактні координатно-вимірювальні пристрої

Контактні координатно-вимірювальні пристрої зазвичай складаються з жорсткої механічної основи, робочого столу, системи переміщення по координатних осях, вимірювальної головки, контактного щупа, датчиків положення та системи обробки результатів. Основним робочим елементом такої системи є щуп, який може мати змінні наконечники різної форми та розміру залежно від типу контролюваної поверхні.

У практиці координатних вимірювань контактні пристрої можуть працювати у двох основних режимах: точковому та сканувальному. У точковому режимі фіксуються окремі контрольні точки на поверхні деталі. Такий режим застосовується для перевірки розмірів, положення отворів, відстаней між елементами та базових площин. У сканувальному режимі щуп переміщується вздовж поверхні й послідовно зчитує значну кількість точок, що дозволяє точніше оцінити форму профілю або складної поверхні.

Важливою особливістю контактних систем є необхідність калібрування щупа перед виконанням вимірювань. Під час калібрування визначають фактичний радіус наконечника, положення центра щупа та можливі відхилення його спрацювання. Без такого налаштування координати можуть бути визначені з систематичною похибкою, особливо при вимірюванні отворів, радіусів і криволінійних поверхонь.

Точність контактного вимірювання залежить не тільки від якості датчиків положення, але й від жорсткості конструкції, довжини стилуса, сили контакту, стану наконечника та правильності базування деталі. Якщо стилус занадто довгий або недостатньо жорсткий, під час контакту може виникати його прогин. Це призводить до зміщення вимірюної точки і збільшення похибки.

Ця система вимірювання є більш надійною та проста у використанні є можливість легкої розробки даного пристрою з мінімальною кількістю задіяних деталей. На рисунку 1.1 показано конструкцію контактно координатно-вимірювального пристрої який використовується в промисловому виробництві.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

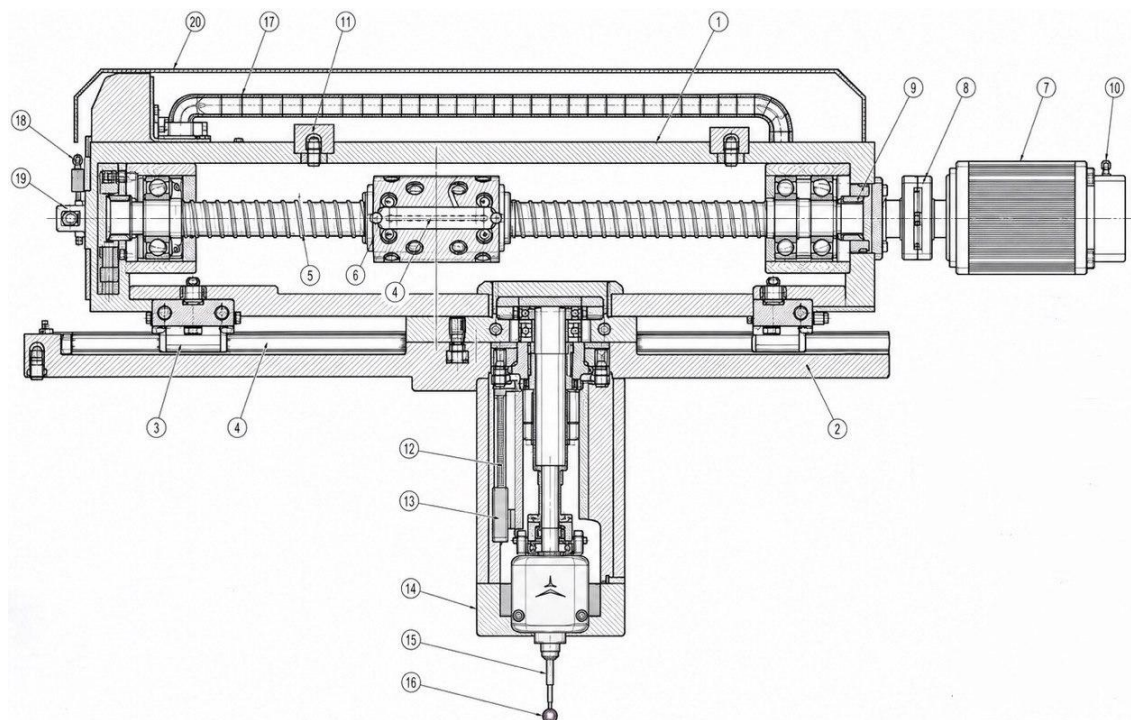


Рисунок 1.1. Конструкція рухомої частини контактної координатно-вимірювальної пристрою:

1. Корпус каретки; 2. Упорна плита; 3. Лінійна направляюча; 4. Каретка направляюча; 5. Вісь руху щупа; 6. Гайка кулькової пари; 7. Серводвигун приводу; 8. Еластична муфта; 9. Підшипниковий вузол; 10. Енкодер положення; 11. Кронштейн кріплення; 12. Піноль осі Z; 13. Лінійний датчик переміщення; 14. Вимірювальна головка; 15. Контактний щуп; 16. Наконечник щупа; 17. Кабель-канал; 18. Кінцевий вимикач; 19. Демфер; 20. Кришка захистна.

1.4. Безконтактні координатно-вимірювальні пристрої

Безконтактні координатно-вимірювальні пристрої конструктивно складаються з механічної основи, робочого столу, системи переміщення по осях X, Y, Z, безконтактної вимірювальної головки, датчиків положення та програмного модуля обробки даних. Основним робочим вузлом у таких пристроях є сенсор, який зчитує інформацію про поверхню деталі на певній відстані від неї.

Залежно від типу сенсора безконтактні системи можуть працювати за принципом лазерного сканування, відеовимірювання або аналізу відбитого

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

024-26.00.00.00.000 ПЗ

Арк.

13

світлового сигналу. Лазерний сенсор формує промінь або світлову лінію на поверхні деталі, а приймальний модуль визначає положення цієї лінії у просторі. Відеовимірювальні системи використовують камеру, яка фіксує контур, край, отвір або інший елемент деталі, після чого програмне забезпечення визначає його координати.

Під час роботи безконтактного пристрою вимірювальна головка переміщується над деталлю, а сенсор послідовно зчитує координати точок поверхні. У результаті може формуватися набір окремих точок або базу точок, яка описує форму об'єкта. Ці дані надалі використовуються для побудови профілю поверхні, контролю відхилень, порівняння з CAD-моделлю або створення цифрової копії деталі нижче на рисунку 1.2 наведено приклад цифрової моделі.

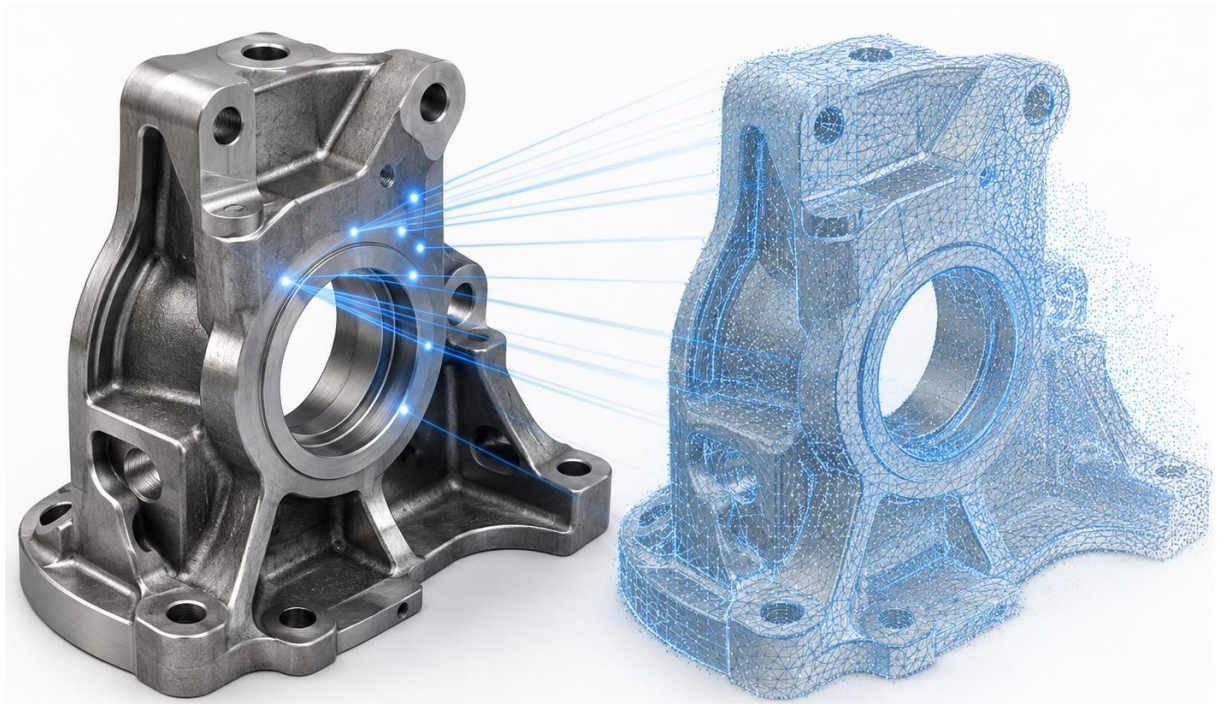


Рисунок 1.2. Цифрова CAD-модель:

Такі пристрої особливо зручні для контролю деталей зі складним рельєфом, дрібних елементів, тонких пластин, полімерних виробів, електронних плат, корпусних деталей та моделей, виготовлених методом 3D-друку. У цехах прототипування безконтактні координатно-вимірювальні пристрої дозволяють швидко перевірити форму виготовленого зразка без додаткового механічного навантаження на нього.

До основних вузлів безконтактної системи належать оптичний або лазерний сенсор, освітлювальний модуль, приймальна камера або фотоприймач, система фокусування, блок синхронізації переміщення та програмне забезпечення для обробки отриманих координат. Важливе значення має правильне налаштування відстані від сенсора до поверхні, оскільки при порушенні робочого діапазону точність вимірювання знижується.

Недоліком безконтактних систем є потреба у якісній програмній обробці даних. Після сканування необхідно відфільтрувати шум, видалити зайві точки, вирівняти базу точок відносно системи координат і правильно інтерпретувати результат. Тому точність такого пристрою залежить не тільки від сенсора, а й від алгоритмів обробки, калібрування та стабільності умов вимірювання.

Отже, безконтактні координатно-вимірювальні пристрої доцільно розглядати як ефективні системи швидкого просторового контролю, які дають змогу отримувати велику кількість координатних даних за короткий час. Вони є особливо корисними там, де потрібно оцінити форму поверхні, виконати 3D-сканування або порівняти реальну деталь із цифровою моделлю.[4]

1.5. Класифікація за конструктивним виконанням

Окрім принципу вимірювання, координатно-вимірювальні пристрої класифікують за конструктивним виконанням. Конструкція визначає робочу зону пристрою, жорсткість, точність, доступність до деталі та сферу застосування.

Найпоширенішими конструкціями є мостові, порталні, консольні, горизонтально-рукавні, рукавні портативні та настільні системи. Вибір конструкції залежить від розмірів деталі, необхідної точності, умов експлуатації та бюджету.

Одним із головних досягнень є перехід від простих контактних вимірювальних систем до високопродуктивних багатосенсорних координатно-вимірювальних комплексів. Сучасні КВМ можуть поєднувати контактні щупи, сканувальні головки, оптичні сенсори, лазерні датчики та відеовимірювальні

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи. Це дозволяє одному пристрою виконувати різні типи контролю залежно від форми, матеріалу та точності деталі. Наприклад, контактний щуп доцільно застосовувати для високоточного контролю отворів і базових поверхонь, а лазерний або оптичний сенсор для швидкого сканування складних поверхонь.

Важливим напрямом розвитку є впровадження 5-осьових вимірювальних систем зображено на рисунку 1.3 У традиційних координатно-вимірювальних машинах основне переміщення виконується по трьох координатах: X, Y та Z. Однак при вимірюванні складних деталей тривісна схема не завжди забезпечує достатню швидкість і зручний доступ до всіх поверхонь. 5-осьова система дозволяє додатково змінювати орієнтацію вимірювальної головки, завдяки чому щуп або сенсор може підходити до поверхні під різними кутами. Це зменшує необхідність переміщення всієї масивної конструкції машини і дозволяє підвищити швидкість контролю. У матеріалах Renishaw зазначається, що 5-осьова технологія поєднує головку, сенсор і керування для підвищення швидкості та гнучкості вимірювання, а також допомагає уникнути традиційного компромісу між швидкістю і точністю.[7][3]

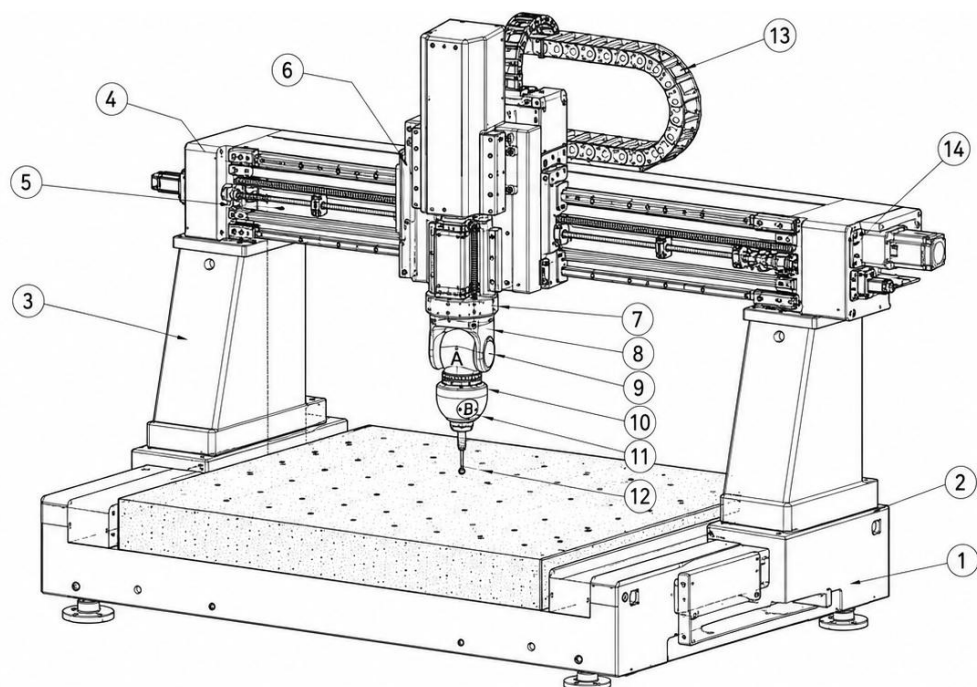


Рисунок 1.3. П'яти осьовий координатно-вимірювальний пристрій:

1. Основна машина; 2. Гранітно вимірювальний стіл; 3. Опорні стійки; 4. Міст; 5. Направляючі осі X; 6. Каретка осі Y; 7. Направляючі осі Z; 8. Піноль осі Z; 9. Поворотна вимірювальна головка; 10. Вісь А поворотної головки; 11. Вісь В поворотної головки; 12. Вимірювальний щуп; 13. Кабель-канал; 14. Привідні вузли та датчики положення осей.

Значний прогрес спостерігається у програмному забезпеченні для координатних вимірювань. Сучасні програми дозволяють створювати вимірювальні програми на основі CAD-моделей, автоматично планувати траєкторії руху щупа або сенсора, виконувати порівняння отриманих даних із номінальною геометрією та формувати звіди про відхилення. Завдяки цьому координатно-вимірювальна машина стає не просто пристроєм для зняття розмірів, а частиною цифрової системи контролю якості.

Такі можливості особливо важливі у серійному виробництві, де необхідно швидко перевіряти велику кількість деталей і зберігати результати вимірювань для подальшого аналізу.

Сучасні досягнення також пов'язані з підвищенням надійності оцінювання точності вимірювання. У координатній метрології важливо не тільки отримати числове значення розміру, але й оцінити достовірність цього результату. Тому велика увага приділяється поняттю невизначеності вимірювання. NIST у своїх матеріалах зазначає, що результат вимірювання на трикоординатній СММ залежить від взаємодії багатьох факторів, зокрема характеристик машини, умов вимірювання, деталі та методики контролю.[8]

Розвиток методів оцінки невизначеності є одним із найважливіших напрямів сучасної координатної метрології. Наукові дослідження підкреслюють, що невизначеність повинна оцінюватися не лише загально для машини, а й для конкретного вимірювального завдання. Такий підхід називають невизначеність для конкретної задачі вимірювання. Вона залежить від геометрії деталі, обраної стратегії вимірювання, кількості точок, типу щупа, температурних умов і способу математичної обробки.[9]

1.6. Основні проблеми існуючих координатно-вимірювальних пристроїв

Незважаючи на значний розвиток координатно-вимірювальних пристроїв, у цій сфері залишається низка проблем, які впливають на точність, стабільність, швидкість і вартість вимірювання. Сучасні координатно-вимірювальні машини здатні забезпечувати високоточний контроль складних деталей, однак їх ефективність залежить не лише від конструкції самого пристрою, а й від умов експлуатації, методики вимірювання, типу сенсора, програмної обробки та кваліфікації оператора.

Однією з головних особливостей координатних вимірювань є те, що результат формується під впливом багатьох факторів одночасно. Національний інститут стандартів і технологій США у матеріалах щодо невизначеності КВМ зазначає, що на результат вимірювання впливають характеристики машини, умови навколишнього середовища, властивості деталі, методика вимірювання та спосіб обробки отриманих даних. Тому навіть високоточна координатно-вимірювальна машина може давати різні результати залежно від конкретного вимірювального завдання.

1.7. Висока вартість обладнання та обслуговування

Однією з найпоширеніших проблем координатно-вимірювальних пристроїв є їх висока вартість. Промислові КВМ мають складну механічну конструкцію, високоточні напрямні, датчики переміщення, вимірювальні головки, систему керування та спеціалізоване програмне забезпечення. Усе це значно підвищує ціну обладнання.

Крім початкової вартості, значними є витрати на експлуатацію. Координатно-вимірювальні машини потребують регулярного технічного обслуговування, калібрування, перевірки точності, оновлення програмного забезпечення та навчання персоналу. Для високоточних лабораторних систем також потрібне спеціальне приміщення з контрольованою температурою, низьким рівнем вібрацій і захистом від пилу.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Через це використання промислових координатно-вимірювальних машин може бути економічно складним для малих підприємств, навчальних лабораторій або дослідних установ. Саме тому актуальним є розроблення більш доступних модульних координатно-вимірювальних пристроїв, які можуть забезпечувати достатню точність при нижчій вартості конструкції.

1.8. Вплив вібрацій і нестабільності зовнішнього середовища

Ще однією важливою проблемою є вплив вібрацій. Координатно-вимірювальні пристрої часто працюють із дуже малими допусками, тому навіть незначні коливання можуть впливати на точність фіксації координат. Джерелами вібрацій можуть бути металорізальні верстати, компресори, транспортне обладнання, робота сусідніх механізмів або навіть рух людей поблизу вимірювальної установки.

Лабораторні КВМ зазвичай встановлюються на масивних основах, часто з граніту, що дозволяє зменшити вплив вібрацій. Проте для цехових або портативних систем ця проблема залишається більш складною. У виробничих умовах важко повністю усунути вібрації, тому потрібно використовувати конструктивні та програмні методи компенсації.

До зовнішніх факторів також належать пил, вологість, забруднення напрямних, нестабільне освітлення для оптичних систем та електромагнітні завади для електронних компонентів. Усі ці фактори можуть погіршувати повторюваність і достовірність вимірювання.

1.9. Похибки механічної конструкції

Механічна частина координатно-вимірювального пристрою має забезпечувати точне переміщення вимірювального вузла по осях X, Y та Z. Проте на практиці будь-яка механічна система має певні недоліки: люфти, непаралельність напрямних, неперпендикулярність осей, прогин елементів конструкції, зношування напрямних і недостатню жорсткість.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці похибки можуть призводити до зміщення координат і спотворення результатів вимірювання. Наприклад, якщо осі переміщення не є строго перпендикулярними, то отримані координати точок будуть відрізнятися від реального положення поверхні. Якщо конструкція має недостатню жорсткість, то під час руху або контакту щупа з деталлю можуть виникати мікродеформації.

Особливо важливою ця проблема є для недорогих або саморобних координатно-вимірювальних пристроїв, де складно забезпечити високу точність напрямних, жорсткість рами та стабільність переміщення. Тому при розробці структури пристрою необхідно враховувати механічну точність, якість напрямних, вибір матеріалів і спосіб кріплення основних вузлів.

1.9.1. Похибки датчиків положення

Координатно-вимірювальні пристрої визначають положення вимірювальної головки за допомогою датчиків переміщення. Це можуть бути оптичні лінійки, інкрементальні або абсолютні енкодери, магнітні лінійки, лазерні інтерферометри або інші системи позиціонування.

Проблема полягає в тому, що кожен датчик має обмежену роздільну здатність, власну похибку, нелінійність, температурну залежність і можливу нестабільність сигналу. Якщо датчик має недостатню точність, то навіть механічно якісна конструкція не забезпечить потрібної точності вимірювання.

Крім того, важливим є правильне встановлення датчиків. Неправильне кріплення, перекіс або забруднення шкали можуть створювати додаткові похибки. У системах із кількома осями похибки кожного датчика накопичуються і впливають на кінцевий результат.

1.9.2. Складність калібрування та перевірки точност

Проблема полягає в тому, що калібрування КВМ потребує спеціального обладнання, еталонів, кваліфікованого персоналу та часу. Для багатосенсорних систем процес ще складніший, оскільки потрібно узгодити між собою

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

координатні системи різних сенсорів. Якщо калібрування виконано неточно, усі подальші вимірювання можуть мати систематичну похибку.

Координатно-вимірювальні пристрої потребують регулярного калібрування та перевірки точності. Це необхідно для підтвердження того, що машина відповідає заявленим характеристикам і може використовуватися для контролю відповідальних деталей.

1.9.3. Складність програмного забезпечення та обробки даних

Сучасні координатно-вимірювальні пристрої значною мірою залежать від програмного забезпечення. Програма виконує побудову траєкторії вимірювання, обробку координат, фільтрацію даних, апроксимацію геометричних елементів, порівняння з CAD-моделлю та формування звіту.

Проблема полягає в тому, що неправильний вибір алгоритму або параметрів обробки може суттєво вплинути на результат. Наприклад, різна кількість точок, різні методи апроксимації або різні способи фільтрації хмари точок можуть дати різні значення відхилень. Для оператора це створює додаткові вимоги до кваліфікації.

Особливо складною є обробка результатів безконтактного сканування, де утворюються великі масиви точок. Необхідно видаляти шум, вирівнювати хмару точок, порівнювати її з CAD-моделлю та правильно інтерпретувати відхилення. Це потребує потужного програмного забезпечення і досвіду роботи з цифровими моделями.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ПОБУДОВИ СТРУКТУРИ КООРДЕНАТНО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

2.1. Постановка задачі розробки пристрою

На основі проведеного в першому розділі огляду існуючих координатно-вимірювальних пристроїв встановлено, що сучасні системи координатного вимірювання мають широкі функціональні можливості, однак характеризуються складністю конструкції, високою вартістю, потребою у точному калібруванні та чутливістю до зовнішніх факторів. Особливо важливими проблемами залишаються забезпечення достатньої точності вимірювання, стабільності переміщення по координатах, зменшення впливу похибок датчиків, температури, вібрацій та людського фактора.

Задачею даного розділу є розробка методології побудови структури координатно-вимірювального пристрою, яка дозволить сформулювати загальний принцип роботи системи, визначити її основні функціональні вузли, обґрунтувати вибір методу вимірювання, датчиків положення, вимірювального щупа та способу обробки координатної інформації.

У межах розробки структури координатно-вимірювального пристрою необхідно вирішити такі задачі:

1. Визначити призначення майбутнього пристрою та область його застосування.
2. Сформулювати основні технічні вимоги до конституції.
3. Вибрати метод вимірювання координат.
4. Розробити структурну схему пристрою.
5. Визначити склад основних функціональних вузлів.
6. Обґрунтувати вибір датчиків положення та координатного щупа.
7. Розробити методику визначення координат точок.
8. Розробити методику оцінювання похибок вимірювання.
9. Сформулювати алгоритм роботи координатно-вимірювального пристрою.

У даній роботі доцільно розглядати координатно-вимірювальний пристрій як систему, що складається з механічної частини, вимірювального вузла, датчиків положення, електронного блоку керування та програмного забезпечення для обробки результатів.

Отже, основна задача полягає у створенні такої структури пристрою, яка забезпечить стабільне переміщення вимірювального вузла по координатах, надійну фіксацію положення точки та можливість подальшої математичної обробки отриманих координат.

2.2. Формування вимог до координатно-вимірювального пристрою

Перед розробкою структури пристрою необхідно сформулювати основні вимоги, які визначають його функціональність, точність, конструкцію та умови експлуатації. Ці вимоги впливають із призначення пристрою та з аналізу проблем існуючих координатно-вимірювальних систем.

Координатно-вимірювальний пристрій повинен забезпечувати можливість визначення координат точок у просторі. Для цього він має мати три координатні осі: X, Y та Z. Кожна вісь повинна забезпечувати переміщення вимірювального вузла або деталі у відповідному напрямку. Найчастіше у координатно-вимірювальних пристроях деталь залишається нерухомою на робочому столі, а вимірювальний вузол переміщується відносно неї.

До основних вимог належать:

- достатній робочий діапазон переміщення по трьох осях;
- жорсткість механічної конструкції;
- мінімальний люфт у напрямних;
- точність переміщення вимірювального вузла;
- стабільність положення робочого столу;
- можливість надійного встановлення деталі;
- наявність датчиків положення по кожній осі;
- можливість калібрування нульової точки;

Для розроблюваного пристрою можна прийняти такі початкові параметри які наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1-Початкові параметри розроблювального пристрою

Параметр	Прийняте значення
Робочий діапазон по осі X	300 мм
Робочий діапазон Y	200 мм
Робочий діапазон Z	150 мм
Метод вимірювання	Контактний
Бажана точність	До 0,05 мм

Прийнятий робочий діапазон дозволяє виконувати вимірювання деталей невеликих і середніх розмірів. Такий пристрій може застосовуватися для контролю простих корпусних деталей, пластин, отворів, пазів, виступів та інших елементів.

Жорсткість конструкції є однією з найважливіших вимог. Якщо рама, напрямні або каретки мають недостатню жорсткість, під час переміщення або контакту щупа з деталлю можуть виникати деформації, що призведе до похибок. Тому механічна основа пристрою повинна бути достатньо масивною, стабільною та стійкою до вібрацій.

Ще однією важливою вимогою є точність датчиків положення. Якщо датчики мають великий крок дискретизації або нестабільний сигнал, то навіть якісна механічна конструкція не забезпечить потрібної точності.

Для попереднього розрахунку приймемо, що датчик положення має роздільну здатність:

$$q=0,01 \text{ мм}$$

Похибка дискретизації датчика визначається як половина кроку:

$$\Delta_{\text{диск}} = \frac{q}{2}$$

$$\Delta_{\text{диск}} = \frac{0,01}{2} = 0,005 \text{ мм}$$

Отже, похибка дискретизації одного датчика становить:

$$\Delta_{\text{диск}} = 0,005 \text{ мм} = 5 \text{ мкм}$$

Це значення є прийнятним для лабораторного координатно-вимірювального пристрою з бажаною точністю до 0,05 мм.

Також необхідно враховувати вимоги до контактної щупа. Щуп повинен мати стабільну повторюваність спрацювання, невелику силу контакту та достатню жорсткість стилуса. Якщо щуп спрацьовує нестабільно, координати однієї і тієї ж точки при повторних вимірюваннях будуть відрізнятися. Для попереднього аналізу приймемо похибку щупа:

$$\Delta_{\text{щ}} = 0,01 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{щ}} = 10 \text{ мкм}$$

Вимоги до пристрою можна сформулювати таким чином: конструкція повинна забезпечувати сумарну похибку не більше 0,05 мм, а окремі складові похибки мають бути мінімізовані шляхом правильного вибору напрямних, датчиків, щупа та методики калібрування.

2.3. Вибір методу вимірювання координат

На основі аналізу першого розділу можна виділити три основні методи координатного вимірювання: контактний, безконтактний та комбінований. Для розробки структури пристрою необхідно вибрати метод, який найкраще відповідає поставленій задачі.

Контактний метод передбачає фізичне торкання щупа до поверхні деталі. У момент контакту система фіксує координати точки. Цей метод є відносно простим у реалізації, забезпечує добру повторюваність результатів і дозволяє контролювати отвори, пази, площини та базові поверхні.

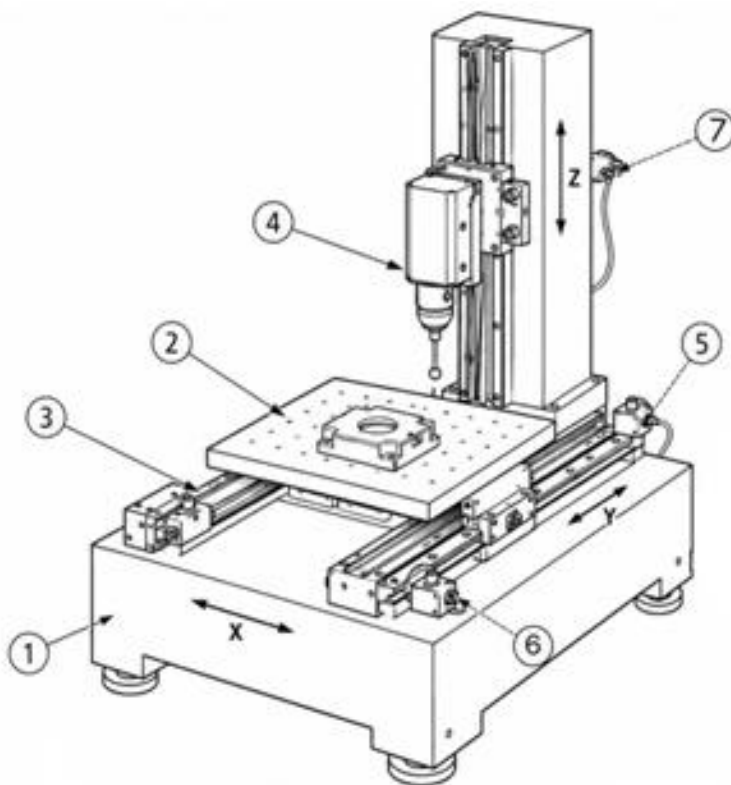
Безконтактний метод використовує оптичні, лазерні або відеосенсори. Його перевагою є висока швидкість вимірювання та відсутність механічного впливу на деталь. Однак він є складнішим у реалізації, потребує якісного програмного забезпечення та може бути чутливим до властивостей поверхні.

Комбінований метод поєднує контактне і безконтактне вимірювання. Він є найуніверсальнішим, але потребує складнішої структури, додаткового калібрування та вищих витрат.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Структурна схема пристрою

Структурна схема координатно-вимірювального пристрою повинна відображати основні функціональні вузли та зв'язки між ними. Пристрій доцільно будувати за модульним принципом, де кожен вузол виконує окрему функцію на рисунок (2.1) показано структуру пристрою



1. Механічна основа; 2. Робочий стіл; 3. Система направляючих по осі X,Y, Z; 4. Вимірювальна головка з контактним щупом; 5. Датчик положення по осі X; 6. Датчик положення по осі Y; 7. Датчик положення по осі Z.

2.5. Обґрунтування вибору датчиків положення та вимірювального щупа

Одним із ключових елементів координатно-вимірювального пристрою є система визначення положення. Вона забезпечує перетворення механічного

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

024-26.00.00.00.000 ПЗ

Арк.

26

переміщення вимірювального вузла у цифрові координати. Від точності датчиків положення залежить точність усього пристрою.

Для розроблюваної структури доцільно розглядати інкрементальні енкодери оскільки він дозволяє визначати переміщення по кожній осі з достатньою точністю на рисунок(2.2) зображено інкрементальний енкодер у розрізі .

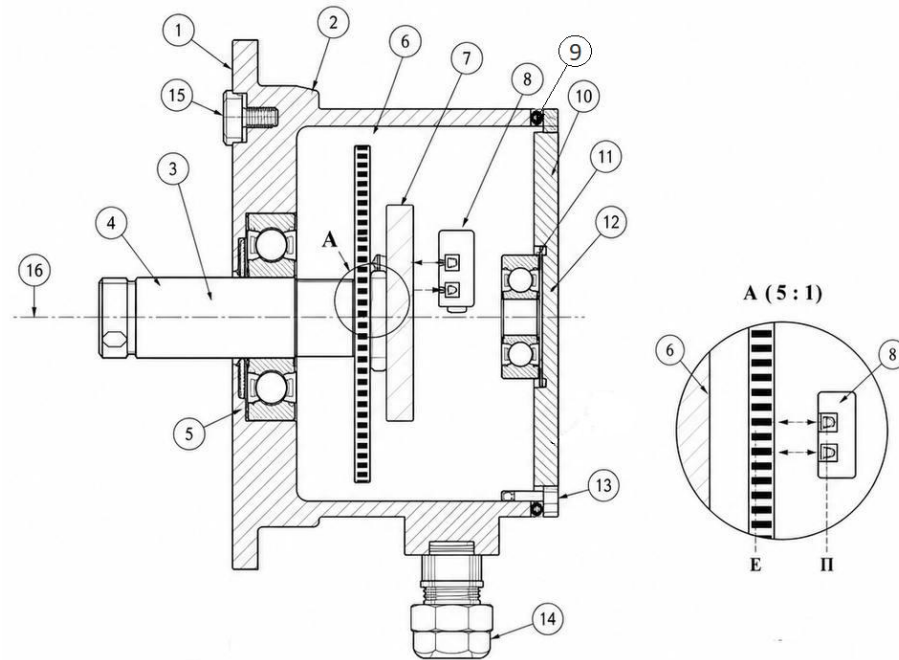


Рисунок 2.2. Інкрементальний енкодер в розрізі:

1. Монтажний фланець; 2. Корпус; 3. Підшипник передній; 4. Вал енкодера; 5. Стопорне кільце; 6. Кодовий диск з прорізами; 7. Маточина диска; 8. Оптична пара датчиків (приймач, випромінювач); 9. Розпірна втулка; 10. Задня кришка; 11. Стопорне кільце; 12. Підшипник; 13. Ущільнювальне кільце; 14. Кабельний ввід; 15. Кріпильний гвинт; 16. Центральна вісь обертання.

Для початкової структури пристрою доцільно використовувати датчики, які мають достатню роздільну здатність, прості в підключенні та забезпечують стабільне зчитування координат. Якщо пристрій орієнтований на навчальне або лабораторне застосування, доцільним є використання інкрементальних енкодерів. Якщо основний акцент робиться на точність, бажано застосовувати інкрементальний енкодер.

Вимірювальний щуп повинен виконувати функцію фіксації моменту контакту з поверхнею деталі. Для даної структури доцільно застосувати контактний щуп на рисунку 2.3 зображеноу розрізі. У момент торкання до поверхні щуп формує сигнал, після чого контролер зчитує координати по всіх осях з інкрементальних енкодерів.

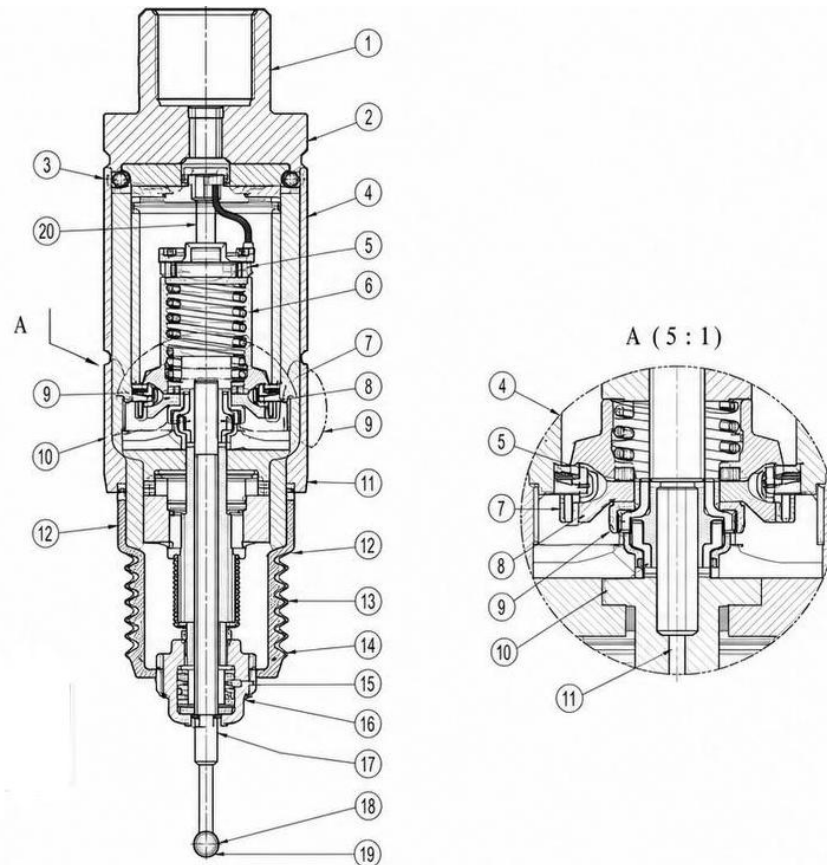


Рисунок 2.3. Щуп у розрізі, його будова:

1.Монтажний адаптер; 2. Корпус щупа; 3. Ущільнене кільце; 4. Зовнішня каретка; 5.Сигнальний провід; 6.Пружина попереньоо натягу; 7. Електричний контактний елемент; 8. Кіноматичний механізм спрацювання; 9. Контактні сидла; 10. Ізоляційний елемент; 11. Центральний шток; 12. Направляюча втулка; 13.Захисна гофра; 14. Нижня кришка; 15. Ущільнювальне кільце; 16. Затискна гайка; 17. Тримач щупа; 18. Щуп; 19. Рубінова сферична насадка; 20. Вісь.

Вибір контактного щупа пояснюється тим, що він є відносно простим, надійним і точним засобом фіксації координат поверхні деталі. Його можна використовувати для контролю площин, отворів, виступів, пазів і базових

поверхонь. Сам по собі щуп виконує функцію сигналу при контакті з деталлю та фіксації отриманих координат при певному переміщенні головки щупа.

2.6. Методика визначення координатних точок

Методика визначення координат точок полягає у послідовному переміщенні вимірювального щупа до поверхні деталі та фіксації положення у момент контакту. Кожна виміряна точка описується трьома координатами у системі X, Y, Z, які зчитуються з інкрементальних енкoderів.

Координата точки записується у вигляді:

$$P_i = (x_i; y_i; z_i)$$

де: P_i -та виміряна точка;

x_i, y_i, z_i - координати точки по осях X, Y та Z.

Послідовність визначення координатних точки така:

1. Деталь встановлюється на робочий стіл.
2. Виконується фіксація деталі.
3. Вимірювальний щуп переміщується до контрольної області.
4. Щуп торкається поверхні деталі.
5. У момент контакту формується сигнал спрацювання.
6. Контролер зчитує значення координат X, Y, Z.
7. Координати зберігаються у пам'яті або передаються на ПК.
8. Після зняття необхідної кількості точок виконується обробка.

Для визначення геометричних параметрів необхідно виміряти не одну, а декілька точок. В таблиці 2.2 зазначено скільки потребується точок для вимірювання геометричних елементів

Наприклад:

- для визначення площини потрібно не менше трьох точок;
- для визначення прямої потрібно не менше двох точок;
- для визначення кола або отвору потрібно не менше трьох точок;
- для аналізу складної поверхні потрібно більше п'яти точок.

Таблиця 2.2. Мінімальна кількість точок для визначення геометричних елементів

Геометричний елемент	Мінімальна кількість точок	Призначення
Коло	3	Визначення центра і діаметра
Точка	1	Фіксація координати
Циліндр	5 і більше	Визначення осі та діаметра
Пряма	2	Визначення напрямку
Площина	3	Визначення базової поверхні
Складна поверхня	Багато точок	Побудова профілю або хмари точок

Відстань між двома точками визначається за формулою:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Ця формула використовується для розрахунку міжосьових відстаней, висот, глибин та інших просторових розмірів. Розглянемо приклад нехай виміряно дві точки:

$$P_1 = (15; 25; 10)$$

$$P_2 = (95; 70; 35)$$

$$L = \sqrt{(95 - 15)^2 + (70 - 25)^2 + (35 - 10)^2}$$

$$L = \sqrt{80^2 + 45^2 + 25^2}$$

$$L = \sqrt{6400 + 2025 + 625}$$

$$L = \sqrt{9050}$$

$$L = 95,13 \text{ мм}$$

Для підвищення точності одну й ту саму точку або розмір можна вимірювати кілька разів, після чого визначати середнє значення:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

$$X_1 = 50,01 \text{ мм}$$

$$X_2 = 50,02 \text{ мм}$$

$$X_3 = 50,00 \text{ мм}$$

$$X_4 = 50,01 \text{ мм}$$

$$X_5 = 50,02 \text{ мм}$$

Тоді;

$$\overline{X} = \frac{50,01 + 50,02 + 50,00 + 50,01 + 50,02}{5}$$

$$\overline{X} = \frac{250,06}{5}$$

$$\overline{X} = 50,012 \text{ мм}$$

Таким чином, методика визначення координат базується на фіксації положення щупа в момент контакту з деталлю та подальшій математичній обробці отриманих координат.

2.7. Методика розрахунку похибок вимірювання

Оцінка похибок є важливою частиною методології розробки координатно-вимірювального пристрою. Похибка показує різницю між виміряним значенням і дійсним або еталонним значенням. Без оцінки похибок неможливо визначити, наскільки точним є пристрій.

Абсолютна похибка визначається як;

$$\Delta = |X_{\text{вим}} - X_{\text{ет}}|$$

де:

$X_{\text{вим}}$ виміряне значення;

$X_{\text{ет}}$ еталонне значення.

Відносна похибка визначається за формулою;

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{ет}}} \cdot 100\%$$

Наприклад;

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X_{\text{ет}} = 100 \text{ мм}$$

$$X_{\text{вим}} = 100,04 \text{ мм}$$

$$\Delta = |100,04 - 100|$$

$$\Delta = 0,04 \text{ мм}$$

$$\delta = \frac{0,04}{100} \cdot 100\%$$

$$\delta = 0,04\%$$

Сумарну похибку пристрою можна визначити за формулою;

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{мех}}^2 + \Delta_{\text{дат}}^2 + \Delta_{\text{щ}}^2 + \Delta_{\text{темп}}^2 + \Delta_{\text{к}}^2}$$

Приймемо орієнтовні значення;

$$\Delta_{\text{мех}} = 0,03 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{дат}} = 0,005 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{щ}} = 0,01 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{темп}} = 0,015 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{к}} = 0,01 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,03^2 + 0,005^2 + 0,01^2 + 0,015^2 + 0,01^2}$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,0009 + 0,000025 + 0,0001 + 0,000225 + 0,0001}$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,00135}$$

$$\Delta_{\Sigma} = 0,0367 \text{ мм}$$

Отже, орієнтовна сумарна похибка пристрою становить;

$$\Delta_{\Sigma} \approx 0,037 \text{ мм}$$

2.8. Програмне забезпечення координатно-вимірального пристрою

Програмне забезпечення є важливою частиною координатно-вимірального пристрою, оскільки саме воно забезпечує приймання, обробку, збереження та відображення результатів вимірювання. Якщо механічна частина пристрою відповідає за переміщення вимірального щупа, а датчики положення - за отримання координат, то програмне забезпечення перетворює ці дані у зручний для користувача результат.

Основним завданням програмного забезпечення є зчитування координат по осях X, Y та Z у момент спрацювання контактної щупа.

Після отримання сигналу від щупа програма повинна зафіксувати поточні значення координат, записати їх у пам'ять і відобразити оператору. Кожна вимірювана точка зберігається у вигляді:

$$P_i = (x_i; y_i; z_i)$$

де P_i - вимірювана точка;

x_i, y_i, z_i - координати точки по осях X, Y та Z.

Програмне забезпечення повинно виконувати такі основні функції;

1. зчитування сигналів від датчиків положення;
2. фіксацію координат у момент контакту щупа з деталлю;
3. встановлення нульової точки системи координат;
4. збереження координат вимірюваних точок;
5. розрахунок відстаней між точками;
6. розрахунок середнього значення при повторних вимірюваннях;
7. оцінку абсолютної та відносної похибки;
8. відображення результатів на екрані;
9. збереження результатів у файл;
10. формування простого звіту про вимірювання.

На першому етапі програма отримує дані від датчиків положення. Якщо використовуються інкрементальні датчики або енкодери, програма повинна підраховувати кількість імпульсів і переводити їх у значення переміщення. Для

цього використовується залежність:

$$X = N_x \cdot q$$

$$Y = N_y \cdot q$$

$$Z = N_z \cdot q$$

де X, Y, Z - координати по відповідних осях;

N_x, N_y, N_z - кількість імпульсів по осях X, Y, Z ;

Наприклад, якщо по осі X датчик зафіксував:

$$N_x = 1250$$

то координата X становитиме:

$$X = 1250 \cdot 0,01$$

$$X = 12,5 \text{ мм}$$

Аналогічно визначаються координати по осях Y та Z .

$$N_y = 850$$

$$Y = 850 \cdot 0,01 = 8,5 \text{ мм}$$

$$N_z = 430$$

$$Z = 430 \cdot 0,01 = 4,3 \text{ мм}$$

Отже, виміряна точка матиме координати:

$$P1 = (12,5; 8,5; 4,3)$$

Після визначення координат програма може виконувати розрахунок геометричних параметрів. Наприклад, відстань між двома точками визначається за формулою:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Це дозволяє використовувати програмне забезпечення не тільки для зчитування координат, але й для обчислення розмірів деталей.

Важливою функцією програми є встановлення нульової точки. Перед початком вимірювання оператор повинен задати початкове положення системи координат. Після цього всі подальші координати визначаються відносно цього

нуля. Це дозволяє прив'язати систему координат пристрою до конкретної деталі.

Програма також повинна мати можливість виконувати повторні вимірювання однієї точки або одного розміру. У такому випадку розраховується середнє значення:

$$\overline{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

Це дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і підвищити достовірність результату.

Для оцінки точності програмне забезпечення може розраховувати абсолютну похибку:

$$\Delta = |X_{\text{вим}} - X_{\text{ет}}|$$

та відносну похибку:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{ет}}} \cdot 100\%$$

де $X_{\text{вим}}$ виміряне значення;

$X_{\text{ет}}$ еталонне або задане значення.

Інтерфейс програмного забезпечення повинен бути простим і зрозумілим для оператора. На екрані доцільно відображати поточні координати, номер вимірюної точки, стан щупа, режим роботи, результати розрахунків і повідомлення про помилки.

Програмне забезпечення також повинно передбачати захист від помилок. Наприклад, якщо щуп виходить за межі робочої зони, програма повинна зупинити вимірювання або подати попередження. Для прийнятого пристрою межі робочої зони становлять:

$$X_{\text{max}} = 300\text{mm}$$

$$Y_{\text{max}} = 200\text{mm}$$

$$Z_{\text{max}} = 150\text{mm}$$

Тому програма повинна перевіряти умови:

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$0 \leq X \leq 300$$

$$0 \leq Y \leq 200$$

$$0 \leq Z \leq 150$$

Якщо координата виходить за ці межі, програма повинна повідомити оператора про помилку.

Програмне забезпечення може працювати у двох режимах: ручному та напівавтоматичному. У ручному режимі оператор сам переміщує щуп до потрібної точки, а програма лише фіксує координати. У напівавтоматичному режимі оператор задає послідовність точок, а система допомагає виконувати вимірювання за заданим алгоритмом.

Таким чином, програмне забезпечення є необхідною частиною координатно-вимірювального пристрою. Воно забезпечує перетворення сигналів датчиків у координати, фіксацію точок у момент контакту щупа з деталлю, математичну обробку результатів, оцінку похибок і виведення інформації оператору. Саме програмна частина робить пристрій не просто механічною системою, а повноцінним вимірювальним комплексом.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЗАПРОПОНОВАНОГО КООРДЕНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

3.1. Вихідні дані для розрахунку

У другому розділі було розроблено методологію побудови структури координатно-вимірювального пристрою. Як основний метод вимірювання було обрано контактний метод, при якому координати точки визначаються у момент дотику щупа до поверхні деталі. Такий підхід є доцільним для лабораторного або навчального пристрою, оскільки він має просту реалізацію, достатню точність і не потребує складних оптичних або лазерних систем.

Для подальших розрахунків приймаємо основні параметри пристрою, визначені в другому розділі, зазначені в таблиці 3.1 нижче.

Таблиця 3.1- Прийняті значення для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Діапазон переміщення осі X	X max	300 мм
Діапазон переміщення по осі Y	Y max	200 мм
Діапазон переміщення по осі Z	Z max	150 мм
Похибка щупа	$\Delta_{\text{щ}}$	0,01 мм
Орієнтовна механічна похибка	$\Delta_{\text{мех}}$	0,03 мм
Температурна похибка	$\Delta_{\text{тем}}$	0,015 мм
Похибка калібрування	$\Delta_{\text{к}}$	0,01 мм
Допустима похибка	$\Delta_{\text{доп}}$	0,05 мм
Роздільна здатність датчика	q	0,01 мм

Основною метою розрахункового розділу є перевірка того, чи забезпечує запропонована структура пристрою необхідну точність. Для цього потрібно визначити похибку датчиків, просторову похибку координатної системи, похибку контактної щупа, температурний вплив, сумарну похибку пристрою та виконати аналіз отриманих результатів.

3.2. Розрахунок похибки дискретизації датчиків положення

У запропонованому пристрої координати по осях X, Y та Z визначаються за допомогою датчиків положення. У другому розділі було прийнято, що роздільна здатність інкрементальних енкодерів становить:

$$q = 0,01 \text{ мм}$$

Похибка дискретизації визначається як половина ціни поділки датчика:

$$\Delta_{\text{диск}} = \frac{q}{2}$$

Підставимо значення:

$$\Delta_{\text{диск}} = \frac{0,01}{2}$$

$$\Delta_{\text{диск}} = 0,005 \text{ мм}$$

Отже, максимальна похибка дискретизації одного датчика становить:

$$\Delta_{\text{диск}} = 0,005 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{диск}} = 5 \text{ мкм}$$

Оскільки пристрій має три координатні осі, похибка дискретизації виникає по кожній з них. Приймаємо:

$$\Delta_X = 0,005 \text{ мм}$$

$$\Delta_Y = 0,005 \text{ мм}$$

$$\Delta_Z = 0,005 \text{ мм}$$

Просторова похибка датчиків визначається за формулою:

$$\Delta_{\text{дат}} = \sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2 + \Delta_Z^2}$$

Підставимо значення:

$$\Delta_{\text{дат}} = \sqrt{0,005^2 + 0,005^2 + 0,005^2}$$

$$\Delta_{\text{дат}} = \sqrt{0,000025 + 0,000025 + 0,000025}$$

$$\Delta_{\text{дат}} = \sqrt{0,000075}$$

$$\Delta_{\text{дат}} = 0,00866 \text{ мм}$$

Отже, просторова похибка трьох датчиків становить приблизно:

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta_{\text{дат}} \approx 0,009 \text{ мм}$$

Це значення є достатньо малим порівняно з допустимою похибкою 0,05 мм. Отже, інкрементальні енкодери з роздільною здатністю 0,01 мм можуть бути використані у запропонованій структурі пристрою.

3.3. Розрахунок координат вимірюваних точок

Кожна виміряна точка у координатно-вимірювальному пристрої описується трьома координатами:

$$P_i = (x_i; y_i; z_i) \text{ де } x_i; y_i; z_i \text{ координати точки по осях } X, Y \text{ та } Z.$$

Для прикладу візьмемо деталь, на якій необхідно визначити положення кількох контрольних точок зазначено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2- Прийняті контрольні точки деталі для розрахунку

Точка	X мм	Y мм	Z мм
P1	20	30	10
P2	120	80	40
P3	180	120	35
P4	250	160	60

Усі координати знаходяться в межах робочої зони пристрою:

$$X \leq 300 \text{ мм}$$

$$Y \leq 200 \text{ мм}$$

$$Z \leq 150 \text{ мм}$$

Отже, запропонована робоча зона пристрою дозволяє виконувати вимірювання вказаних точок.

3.4. Розрахунок відстані між точками

Одним із базових завдань координатно-вимірювального пристрою є визначення відстані між двома точками у просторі. Для цього використовується формула:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Розрахуємо відстань між точками P1 і P2

$$P_1 = (20; 30; 10)$$

$$P_2 = (120; 80; 40)$$

Підставимо координати у формулу:

$$L_{12} = \sqrt{(120 - 20)^2 + (80 - 30)^2 + (40 - 10)^2}$$

$$L_{12} = \sqrt{100^2 + 50^2 + 30^2}$$

$$L_{12} = \sqrt{10000 + 2500 + 900}$$

$$L_{12} = \sqrt{13400}$$

$$L_{12} = 115,76 \text{ мм}$$

Отже, відстань між точками P_1 і P_2 становить:

$$L_{12} = 115,76 \text{ мм}$$

Розрахуємо також відстань між точками P_2 і P_3

$$P_2 = (120; 80; 40)$$

$$P_3 = (180; 120; 35)$$

$$L_{23} = \sqrt{(180 - 120)^2 + (120 - 80)^2 + (35 - 40)^2}$$

$$L_{23} = \sqrt{60^2 + 40^2 + (-5)^2}$$

$$L_{23} = \sqrt{3600 + 1600 + 25}$$

$$L_{23} = \sqrt{5225}$$

$$L_{23} = 72,28 \text{ мм}$$

Розрахуємо відстань між точками P_3 і P_4 ;

Отримані результати можна подати у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3- Отримані значення

Вимірювана відстань	Значення, мм
L34	84,41
L23	72,28
L12	115,76

3.5. Розрахунок середнього значення координати

Для зменшення впливу випадкових похибок одну і ту саму координату доцільно вимірювати кілька разів. Після цього визначається середнє значення.

Середнє значення координати визначається за формулою:

$$\overline{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

Нехай було виконано п'ять вимірювань однієї координати X:

$$X_1 = 50,01 \text{ мм}$$

$$X_2 = 50,02 \text{ мм}$$

$$X_3 = 50,00 \text{ мм}$$

$$X_4 = 50,01 \text{ мм}$$

$$X_5 = 50,02 \text{ мм}$$

Тоді:

$$\overline{X} = \frac{50,01 + 50,02 + 50,00 + 50,01 + 50,02}{5}$$

$$\overline{X} = \frac{250,06}{5}$$

$$\overline{X} = 50,012 \text{ мм}$$

Отже, середнє значення координати X становить:

$$\overline{X} = 50,012 \text{ мм}$$

Це значення доцільно приймати як уточнений результат вимірювання, оскільки воно враховує розкид окремих вимірювань.

3.6. Розрахунок повторюваності вимірювання

Для оцінки стабільності результатів використовується середньоквадратичне відхилення:

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Спочатку визначимо відхилення кожного вимірювання від середнього значення:

$$\Delta X_1 = 50,01 - 50,012 = -0,002 \text{ мм}$$

$$\Delta X_2 = 50,02 - 50,012 = 0,008 \text{ мм}$$

$$\Delta X_3 = 50,00 - 50,012 = -0,012 \text{ мм}$$

$$\Delta X_4 = 50,01 - 50,012 = -0,002 \text{ мм}$$

$$\Delta X_5 = 50,02 - 50,012 = 0,008 \text{ мм}$$

Квадрати відхилень;

$$(-0,002)^2 = 0,000004$$

$$0,008^2 = 0,000064$$

$$(-0,012)^2 = 0,000144$$

$$(-0,002)^2 = 0,000004$$

$$0,008^2 = 0,000064$$

Сума квадратів відхилень;

$$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 0,000004 + 0,000064 + 0,000144 + 0,000004 + 0,000064$$

$$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 0,00028$$

Тоді;

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,00028}{5 - 1}}$$

$$\sigma = \sqrt{0,00007}$$

$$\sigma = 0,00837 \text{ мм}$$

Отже, повторюваність вимірювання становить;

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$\sigma \approx 0,0084 \text{ мм}$$

Отримане значення показує, що розкид повторних вимірювань є невеликим і не перевищує допустиму похибку пристрою.

3.7. Розрахунок абсолютної та відносної похибки

Абсолютна похибка визначається як різниця між виміряним і еталонним значенням:

$$\Delta = |X_{\text{вим}} - X_{\text{ет}}|$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{ет}}} \cdot 100\%$$

Нехай еталонне значення контрольованого розміру становить:

$$X_{\text{ет}} = 100 \text{ мм}$$

А виміряне значення:

$$X_{\text{вим}} = 100,04 \text{ мм}$$

Тоді абсолютна похибка:

$$\Delta = |100,04 - 100|$$

$$\Delta = 0,04 \text{ мм}$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{0,04}{100} \cdot 100\%$$

$$\delta = 0,04\%$$

Отже:

$$\Delta = 0,04 \text{ мм}$$

$$\delta = 0,04\%$$

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки допустима похибка пристрою прийнята:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0,05 \text{ мм}$$

А отримана похибка:

$$\Delta = 0,04 \text{ мм}$$

То виконується умова:

$$\Delta < \Delta_{\text{доп}}$$

Отже, результат вимірювання відповідає заданим вимогам точності.

3.8. Розрахунок температурної похибки

Температурна похибка є однією з важливих складових загальної похибки координатно-вимірювального пристрою. Вона виникає через теплове розширення деталі або елементів конструкції.

Температурне видовження визначається за формулою:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

Для сталеві деталі приймаємо:

$$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$$

Нехай довжина деталі:

$$L_0 = 300 \text{ мм}$$

А зміна температури:

$$\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$$

Тоді:

$$\Delta L = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 3$$

$$\Delta L = 0,0108 \text{ мм}$$

$$\Delta L = 10,8 \text{ мкм}$$

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, при зміні температури на 3°C сталева деталь довжиною 300 мм може змінити свій розмір на 10,8 мкм.

Якщо температура зміниться на 5°C, то:

$$\Delta L = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 5$$

$$\Delta L = 0,018 \text{ мм}$$

$$\Delta L = 18 \text{ мкм}$$

Результати можна подати у таблиці 3.4

Таблиця 3.4- Похибка при зміні температури

Зміна температури °C	Температурне розширення, мм	Температурне розширення, мкм
1	0,0036	3,6
2	0,0072	7,2
3	0,0108	10,8
4	0,0144	14,4
5	0,0180	18,0

З аналізу видно, що температурна похибка може бути суттєвою. При точності пристрою до 0,05 мм навіть видовження 0,018 мм складає значну частину допустимої похибки. Тому під час вимірювання бажано забезпечувати стабільну температуру, а деталь перед контролем повинна деякий час перебувати в умовах вимірювального приміщення.

3.9. Розрахунок механічної похибки пристрою

Механічна похибка виникає через неточність напрямних, люфти, перекоси осей, прогини елементів конструкції та недостатню жорсткість рами. У другому розділі було прийнято орієнтовне значення механічної похибки:

$$\Delta_{\text{мех}} = 0,03 \text{ мм}$$

Розглянемо її як результат похибок по трьох координатах. Прийmemo:

$$\Delta_X = 0,02 \text{ мм}$$

$$\Delta_Y = 0,02 \text{ мм}$$

$$\Delta_Z = 0,015 \text{ мм}$$

Тоді загальна механічна похибка:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{мех}} &= \sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2 + \Delta_Z^2} \\ \Delta_{\text{мех}} &= \sqrt{0,02^2 + 0,02^2 + 0,015^2} \\ \Delta_{\text{мех}} &= \sqrt{0,0004 + 0,0004 + 0,000225} \\ \Delta_{\text{мех}} &= \sqrt{0,001025} \\ \Delta_{\text{мех}} &= 0,032 \text{ мм}\end{aligned}$$

Отримане значення близьке до прийнятого у другому розділі:

$$0,032 \text{ мм} \approx 0,03 \text{ мм}$$

Це підтверджує, що механічна похибка є однією з найбільших складових загальної похибки пристрою. Для її зменшення необхідно використовувати жорстку основу, якісні напрямні, точне складання та мінімізацію люфтів у рухомих вузлах.

3.10. Розрахунок сумарної похибки пристрою

Сумарна похибка координатно-вимірювального пристрою визначається з урахуванням основних складових:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{мех}}^2 + \Delta_{\text{дат}}^2 + \Delta_{\text{щ}}^2 + \Delta_{\text{темп}}^2 + \Delta_{\text{к}}^2}$$

Приймемо значення, отримані або задані раніше:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{мех}} &= 0,03 \text{ мм} \\ \Delta_{\text{дат}} &= 0,009 \text{ мм} \\ \Delta_{\text{щ}} &= 0,01 \text{ мм} \\ \Delta_{\text{темп}} &= 0,015 \text{ мм} \\ \Delta_{\text{к}} &= 0,01 \text{ мм}\end{aligned}$$

Підставимо у формулу:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,03^2 + 0,009^2 + 0,01^2 + 0,015^2 + 0,01^2}$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,0009 + 0,000081 + 0,0001 + 0,000225 + 0,0001}$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,001406}$$

$$\Delta_{\Sigma} = 0,0375 \text{ мм}$$

Отже, сумарна похибка пристрою становить:

$$\Delta_{\Sigma} \approx 0,038 \text{ мм}$$

або:

$$\Delta_{\Sigma} \approx 38 \text{ мкм}$$

Порівняємо отримане значення з допустимою похибкою:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0,05 \text{ мм}$$

$$0,038 < 0,05$$

Отже, запропонована структура координатно-вимірювального пристрою забезпечує необхідну точність.

Для кращого розуміння точності пристрою необхідно визначити, які складові найбільше впливають на сумарну похибку зазначено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5- Похибки

Складова похибки	Значення в мм
Механічна похибка	0,030
Похибка калібрування	0,010
Похибка щупа	0,010
Похибка датчиків	0,009
Температурна похибка	0,015

З таблиці видно, що найбільший вплив має механічна похибка. Вона майже вдвічі більша за температурну і приблизно у три рази більша за похибку датчиків.

Аналіз показує, що для підвищення точності пристрою насамперед необхідно зменшувати механічну похибку.

Другим важливим фактором є температура. Її вплив можна зменшити шляхом проведення вимірювань у стабільних умовах або введення температурної

3.11. Оцінка відповідності пристрою заданим вимогам

У другому розділі було задано вимогу до точності:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0,05 \text{ мм}$$

У результаті розрахунків отримано:

$$\Delta_{\Sigma} = 0,038 \text{ мм}$$

Оскільки:

$$\Delta_{\Sigma} < \Delta_{\text{доп}}$$

То запропонована структура відповідає заданим вимогам.

Запас за точністю можна визначити як різницю між допустимою і розрахованою похибкою:

$$\Delta_{\text{зап}} = \Delta_{\text{доп}} - \Delta_{\Sigma}$$

$$\Delta_{\text{зап}} = 0,05 - 0,038$$

$$\Delta_{\text{зап}} = 0,012 \text{ мм}$$

Отже, запас за точністю становить:

$$\Delta_{\text{зап}} = 0,012 \text{ мм}$$

або:

$$\Delta_{\text{зап}} = 12 \text{ мкм}$$

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС РОБОТИ З КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ

4.1. Організація робочого місця під час роботи з координатно-вимірювальним пристроєм

Координатно-вимірювальний пристрій повинен встановлюватися у спеціально відведений зоні, де забезпечені безпечні умови для роботи оператора та стабільність вимірювального процесу. Робоче місце має бути достатньо освітленим, чистим і вільним від сторонніх предметів, які можуть заважати переміщенню рухомих частин пристрою або створювати небезпеку для працівника.

Пристрій необхідно встановлювати на рівній та жорсткій поверхні. Основа повинна бути стійкою, без хитання та перекосів, оскільки навіть незначні вібрації можуть впливати на точність вимірювання. У разі встановлення КВМ у цеху прототипування її бажано розміщувати окремо від верстатів, компресорів, шліфувального обладнання та інших джерел вібрацій, пилу й шуму.

Робочий стіл координатно-вимірювального пристрою повинен бути чистим. Перед початком роботи з нього необхідно прибрати інструменти, стружку, пил, залишки мастила та інші сторонні предмети. Деталь, яка підлягає вимірюванню, повинна бути надійно встановлена й зафіксована, щоб під час контакту зі щупом або переміщення вимірювальної головки вона не зміщувалася. Кабелі живлення, сигнальні проводи від енкодерів, контролера та інших електронних вузлів потрібно розміщувати так, щоб вони не потрапляли у зону руху механічних частин і не створювали перешкод для оператора. Проводи не повинні бути натягнутими, пошкодженими або прокладеними через проходи.

Робоче місце оператора має забезпечувати зручний доступ до пристрою, органів керування, кнопки аварійного вимкнення, комп'ютера або дисплея

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

відображення результатів. Оператор повинен мати можливість вільно спостерігати за переміщенням вимірювальної головки та положенням контактної щупа відносно деталі.

4.2. Вимоги безпеки праці та пожежної безпеки під час роботи з координатно-вимірювальним пристроєм

Перед початком роботи необхідно перевірити справність координатно-вимірювального пристрою, стан механічних вузлів, надійність кріплення контактної щупа, справність датчиків положення, контролера та кабельних з'єднань. Забороняється працювати з пристроєм у разі пошкодження кабелів, нестабільної роботи електроніки, люфтів у рухомих вузлах або несправності вимірювального щупа.

Під час роботи забороняється торкатися рухомих частин пристрою, напрямних, кареток, енкодерів і вимірювальної головки. Не допускається змінювати положення деталі під час виконання вимірювання. Якщо потрібно поправити або замінити деталь, пристрій необхідно зупинити.

Особливу увагу слід приділяти роботі контактної щупа. Не можна допускати різкого удару щупа об поверхню деталі, оскільки це може призвести до пошкодження наконечника, деформації стилуса або появи похибок у вимірюванні. Переміщення щупа повинно бути плавним і контрольованим.

Електрична частина пристрою повинна бути підключена до справної електромережі. Блок живлення, контролер, датчики положення та інші електронні компоненти повинні мати надійні з'єднання. Забороняється виконувати ремонт або перепідключення електричних елементів при ввімкненому живленні. Не допускається робота з обладнанням мокрими руками або у вологому середовищі.

Пожежна безпека під час роботи з КВМ полягає у правильній експлуатації електронних вузлів і недопущенні перевантаження електромережі. Забороняється використовувати пошкоджені подовжувачі, несправні блоки живлення, кабелі з пошкодженою ізоляцією або обладнання з ознаками

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перегріву. Біля пристрою не слід зберігати легкозаймисті матеріали, мастила, розчинники, папір або пластикові відходи.

У разі появи запаху гару, диму, іскріння, перегріву електронного блоку або неконтрольованого руху пристрою роботу необхідно негайно припинити, вимкнути живлення та повідомити відповідальну особу. Повторне ввімкнення обладнання дозволяється лише після виявлення та усунення причини несправності.

4.3. Загальні застереження та безпека життєдіяльності під час роботи з КВМ

Під час роботи з координатно-вимірювальним пристроєм оператор повинен дотримуватися загальних правил безпеки, уважно стежити за станом обладнання та не виконувати дій, які можуть призвести до травмування або пошкодження пристрою. До роботи допускаються лише особи, які ознайомлені з принципом роботи КВМ, правилами її експлуатації та вимогами охорони праці.

Оператор повинен працювати у справному спецодязі, який не має звисаючих частин. Волосся, шнурки, рукави або інші елементи одягу не повинні потрапляти в зону руху механічних вузлів. Під час встановлення металевих деталей із гострими кромками необхідно користуватися захисними рукавицями, а у цеху прототипування захисними окулярами, якщо поряд працюють верстати або існує ризик потрапляння стружки.

Не допускається залишати ввімкнений пристрій без нагляду, особливо під час автоматичного або напіваавтоматичного переміщення вимірювальної головки. Забороняється використовувати КВМ не за призначенням, ставити на робочий стіл надмірно важкі деталі, застосовувати пристрій як підставку або виконувати на ньому механічну обробку.

Після завершення роботи необхідно вимкнути живлення пристрою, зберегти результати вимірювань, прибрати деталь із робочого столу та очистити робочу зону. Контактний щуп, напрямні та датчики положення

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

потрібно оглянути на наявність пошкоджень або забруднень. У разі виявлення несправностей необхідно повідомити відповідальну особу та не використовувати пристрій до усунення проблеми.

Дотримання вимог охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та загальних правил безпечної експлуатації забезпечує захист оператора, збереження працездатності координатно-вимірювального пристрою та стабільність результатів вимірювання.

У разі аварійної ситуації, неконтрольованого руху, збою програми, появи стороннього шуму, перегріву електронних елементів або запаху гару необхідно негайно припинити роботу, вимкнути живлення та повідомити відповідальну особу. Самостійне усунення несправностей без відповідної підготовки не допускається, особливо якщо вони пов'язані з електричною частиною або блоком керування.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі розроблено структуру координатно-вимірювального пристрою, призначеного для визначення координат точок на поверхні деталей у лабораторних або навчально-виробничих умовах. За результатами виконаної роботи можна сформулювати такі висновки.

1. Розроблено структуру координатно-вимірювального пристрою з робочою зоною $300 \times 200 \times 150$ мм. До складу пристрою входять механічна основа, координатні осі X, Y, Z, контактний щуп, інкрементальні датчики положення, блок керування та програмний модуль обробки координат.

2. Прийнято контактний метод вимірювання координат із використанням інкрементальних енкoderів з роздільною здатністю 0,01 мм. Похибка дискретизації одного датчика становить 0,005 мм, просторова похибка трьох координатних осей приблизно 0,009 мм.

3. Виконано розрахунок координат контрольних точок, відстаней між ними та повторюваності вимірювань. Отримано відстані $L_{12} = 115,76$ мм, $L_{23} = 72,28$ мм, $L_{34} = 84,41$ мм. Для серії вимірювань координати X середнє значення становить 50,012 мм, середньоквадратичне відхилення 0,0084 мм.

4. Розраховано основні складові похибки пристрою. Механічна похибка становить приблизно 0,032 мм, температурна похибка для сталеві деталі довжиною 300 мм при зміні температури на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 0,0108 мм, сумарна похибка пристрою приблизно 0,038 мм. Отримане значення не перевищує допустиму похибку 0,05 мм.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань. Київ: Знання, 20016. 180 с
2. Hocken R. J., Pereira P. H. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 592 p.
3. Bosch J. A. Coordinate Measuring Machines and Systems. New York: Marcel Dekker, 2008. 448 p.
4. Weckenmann A., Knauer M., Kunzmann H. The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements. CIRP Annals Manufacturing Technology. 2013. Vol. 47, No. 1. P. 451–454.
5. Phillips S. D., Borchardt B., Caskey G. Measurement Uncertainty Considerations for Coordinate Measuring Machines. NISTIR 5170. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2014. 45 p.
6. Flack D. CMM Verification. Measurement Good Practice Guide No. 42. Teddington: National Physical Laboratory, 2017. 40 p.
7. Flack D. CMM Measurement Strategies. Measurement Good Practice Guide. Teddington: National Physical Laboratory, 2017.
8. Боженко Л. І. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація. Львів: Афіша, 2009. 324 с
9. Weckenmann A., Knauer M., Kunzmann H. The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements. CIRP Annals Manufacturing Technology. 2008. Vol. 47, No. 1. P. 451–454.
10. Christoph R., Neumann H. J. Multisensor Coordinate Metrology. München: Süddeutscher Verlag onpact, 2019. 352 p.
11. Moroni G., Petro S. Coordinate Measuring Machine Measurement Planning. In: Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring. London: Springer, 2011. P. 111–158.
12. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf.

(дата звернення: 06.03.2026)

13. Hexagon Manufacturing Intelligence. About ISO 10360 standards for CMMs.:URL: <https://hexagon.com/resources/resource-library/about-iso-10360-standards-cmms> (дата звернення: 14.03.2026).

14. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual:URL:https://w.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата звернення: 14.03.2026).

15. Espressif Systems. Technical Documents:
URL:<https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>(дата звернення: 05.05.2026).

16. Omron Corporation. Rotary Encoders Technical Guide:
URL:https://edata.omron.com.au/eData/Encoders/Rotary_TG.pdf(дата звернення: 04.05.26).

17. 14.09.2009 SICK AG. Incremental encoders: SICK. URL: <https://www.sick.com/br/en/products/motion-control-sensors/incremental-encoders/c/g244396>(дата звернення: 06.05.2026)

					024-26.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		