

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Юрій КИРИЧУК**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та  
технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»**

**на тему: «Удосконалення координатно-вимірювальної системи та  
координатно-вимірювальної машини»**

Виконав:

студент 2-го курсу, групи ПМ-31мп

Гришин Данііл Олегович \_\_\_\_\_

Керівник:

Асистент, каф. АСНК

к.т.н. Ткаченко Світлана Сергіївна \_\_\_\_\_

Консультант з розробки стартап-проектів:

д.е.н., професор, завідувач кафедри

економічної кібернетики

Бояринова Катерина Олександрівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент, каф. КІТВП

к.т.н., доцент Шевченко Вадим Володимирович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент Гришин Данііл \_\_\_\_\_

Київ – 2024 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет  
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій Киричук

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Гришину Данілу Олеговичу**

1. Тема дисертації «Удосконалення координатно-вимірювальної системи та координатно-вимірювальної машини», керівник проекту Ткаченко Світлана Сергіївна, к.т.н.,

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р. №

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: Вимірювальна система на координатно-вимірювальній машині;

4. Предмет дослідження: Координатно-вимірювальна машина

5. Вихідні дані до проекту: вид обладнання – координатно-вимірювальна машина, вид системи вимірювання - контактно-вимірювальна система, застосування – вимірювання геометричних параметрів виробів, чутливий елемент – контактний щуп, умови застосування – всередині приміщення, температура 15-30°C, відносна вологість 40-80%. Кут повороту головки по горизонталі: 360° і кут повороту щупа від 0 до 90°

6. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) вступ, геометричні параметри виробів, аналітичний огляд типів КВМ, принципів роботи датчиків, проєктний розділ, розробка моторизованої сервоприводної голівки для КВМ, розрахунок передаточного відношення для редуктора черв'ячної передачі, схеми, розробка стартап-проєкту, висновки, список використаних джерел.

7. Перелік (ілюстративного) графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, тощо): принципова схема ФА1 – 1 шт., сервопривід ФА1 – 1 шт., функціонально-структурна схема ФА1 – 1 шт., розрахункова схема та епюри моментів ФА1 – 1 шт., черв'ячний вал ФА3 – 1 шт., черв'ячне колесо ФА3 – 1 шт.

8. Орієнтовний перелік публікацій

9. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проєкту “Удосконалення координатно-вимірювальної системи та координатно-вимірювальної машини”	д.е.н, професор, завідувач кафедри економічної кібернетики, Бояринова Катерина Олександрівна		

10. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Ознайомлення з завданням МД	05.09.2024	
	Проведення огляду літературних джерел	06.09-15.09.2024	
	Проведення огляду та аналізу аналогів	21.09-27.09.2024	
	Огляд сервоприводів та датчиків, що застосовуються в контактних-вимірювальних машинах	27.09-30.09.2024	
	Виконання проєктно-конструкторського розділу	01.10-25.10.2024	
	Підготовка графічних матеріалів	26.10-15.11.2024	
	Підготовка пояснювальної записки	16.11-07.12.2024	
	Подання МД для перевірки та отримання відгуку від дипломного керівника	07.12.2024	
	Подання МД на рецензію	08.12.2024	
	Захист МД	16.12.2024	

Студент  
Керівник

Данііл ГРИШИН  
Світлана Ткаченко

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить в собі вступ, три розділи, висновки та перелік посилань. Магістерська включає в себе 116 сторінок, в тому числі 20 рисунків, список посилань та 30 таблиць.

Мета магістерської дисертації – удосконалення вимірювальної системи та координатно-вимірювальної машини (КВМ), зокрема, розробка моторизованої сервоприводної голівки для КВМ, що забезпечить точність вимірювань при змінних навантаженнях і кутових положеннях.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання: розробка моделі моторизованої сервоприводної головки для КВМ, що включає серводвигуни, редуктор черв'ячної передачі. Розрахунок передаточного відношення редуктора для забезпечення необхідної точності вимірювань.

Ключові слова: координатно-вимірювальна машина, датчик, геометричні редуктор, вимірювальна голівка, передаточне відношення

## ABSTRACT

The master's thesis contains an introduction, three chapters, conclusions and a list of references. The master's thesis includes 116 pages, including 20 figures, a list of references and 30 table.

The purpose of the master's thesis is to improve the measuring system and coordinate measuring machine (CMM), in particular, the development of a motorized servo head for CMM, which will ensure the accuracy of measurements under variable loads and angular positions.

To achieve the goal, the following tasks were performed: development of a model of a motorized servo head for CMM, which includes servo motors, a worm gear reducer. Calculation of the gear ratio of the reducer to ensure the required accuracy of measurements.

Keywords: coordinate measuring machine, sensor, geometric reducer, measuring head, gear ratio

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ</b> .....	8
<b>ВСТУП</b> .....	9
<b>1 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТА ПРОЕКТУВАННЯ</b> .....	11
<b>1.1 Геометричні параметри виробів</b> .....	11
<b>1.2 Огляд систем контролю геометричних параметрів виробів</b> .....	14
<b>1.3 Опис принципів вимірювання, якими датчиками, на яких принципах роботи</b> .....	19
<b>1.4 Координатно-вимірювальні машини</b> .....	24
<b>1.5 Поширені типи КВМ</b> .....	31
<b>1.6 Голівки координатно вимірювальної машини</b> .....	35
<b>1.7 Датчики вимірювальних голівок КВМ</b> .....	38
<b>1.8 Огляд та типи сервоприводів, які використовуються у вимірювальних системах.</b> .....	42
<b>1.9 Принципи роботи та особливості застосування сервоприводів</b> .....	47
<b>1.10 Класифікація поворотних голівок КВМ</b> .....	48
<b>1.11 Особливості конструкцій для двовісних і тривісних поворотів</b> .....	50
<b>ВИСНОВКИ ТЕОРЕТИЧНОГО РОЗДІЛУ</b> .....	52
<b>2. ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ</b> .....	54
<b>2.1 Сервопривід</b> .....	54
<b>2.2 Кінематичний розрахунок приводу для горизонтального повороту голівки КВМ</b> .....	58
<b>2.3 Кінематичний розрахунок приводу для вертикального повороту голівки КВМ</b> .....	70
<b>2.4 Автоматизація налаштування положення голівки під час вимірювання геометричних параметрів виробів</b> .....	75
<b>ВИСНОВКИ ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКОГО РОЗДІЛУ</b> .....	79
<b>3. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «УДОСКОНАЛЕННЯ КООРДИНАТНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ»</b> .....	80
<b>3.1 Опис ідеї проекту</b> .....	80
<b>3.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту</b> .....	83
<b>3.3 Розроблення ринкової стратегії проекту</b> .....	95

<b>3.4 Розробка маркетингової програми та планування стартап-проекту .....</b>	<b>99</b>
<b>ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....</b>	<b>111</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>112</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>114</b>

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КВМ - Координатно-вимірювальна машина.

CAD - Система автоматизованого проектування (від англ. Computer-aided design).

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач.

$P$  – тиск, [Па].

$m$  – маса, [кг].

$g$  – прискорення вільного падіння, [ $m/s^2$ ].

$F$  – навантажена зосереджена сила, [Н].

$U$  – напруга, [В].

$S$  – площа, [ $m^2$ ].

$\sigma$  – нормальне напруження, [Па].

$t$  – час, [с].

$L, l$  – довжина, [м].

$G$  – модуль зсуву, [Па].

$D, d$  – діаметр, [м].

$A$  – площа поперечного перерізу, [ $m^2$ ].

$V$  – об'єм, [ $m^3$ ].

$\rho$  – густина, [ $kg/m^3$ ].



## ВСТУП

У сучасному промисловому виробництві ключовими факторами є точність і якість виготовлення виробів. Жорсткі вимоги до розмірів, форми та взаємного положення деталей змушують виробників впроваджувати нові технології та методи контролю, які гарантують відповідність продукції специфікаціям. Координатно-вимірювальні машини (КВМ) відіграють центральну роль у забезпеченні цього контролю, дозволяючи здійснювати високоточні вимірювання геометричних параметрів виробів.

Координатно-вимірювальна машина є високотехнологічним пристроєм, що поєднує механічні, електронні та програмні компоненти. Вона використовується для контролю розмірів, форми, положення, шорсткості поверхні та інших характеристик деталей, забезпечуючи відповідність їхнім конструктивним вимогам. Важливим компонентом КВМ є вимірювальна голівка, яка забезпечує контакт із деталлю та зчитування параметрів.

Ефективність КВМ багато в чому залежить від її вимірювальної системи, яка включає датчики, механічні та електромеханічні приводи, програмне забезпечення та алгоритми обробки даних. Особливе місце займають вимірювальні голівки, які можуть бути як нерухомими, так і моторизованими. Використання моторизованих сервоприводних голівок із можливістю обертання навколо декількох осей відкриває нові можливості для підвищення гнучкості, точності та швидкості вимірювань.

Науково-технічний прогрес у сфері КВМ зумовив суттєві зміни в підходах до вимірювання та обробки інформації. Роботи багатьох дослідників присвячені вдосконаленню датчиків, які є основою вимірювальної системи. У сучасній літературі висвітлюються питання підвищення чутливості, зменшення похибок вимірювання та розширення функціональних можливостей контактних і безконтактних вимірювальних систем. Значну увагу приділено також алгоритмам обробки даних і автоматизації процесів.

Завдання вдосконалення КВМ є актуальним через зростаючі потреби в автоматизації, інтеграції з цифровими виробничими процесами та впровадженні

інноваційних рішень у сфері вимірювальної техніки. Розвиток сервоприводних механізмів і датчиків дозволяє реалізовувати більш складні функції, такі як автоматична зміна зондів, вимірювання деталей складної геометрії та підтримка адаптивного управління вимірювальним процесом.

Метою даної магістерської дисертації є вдосконалення вимірювальної системи КВМ шляхом розробки моторизованої сервоприводної голівки з можливістю обертання навколо двох осей. Це передбачає аналіз конструкцій сучасних голівок, розробку моделей механічних і електромеханічних приводів, розрахунок передаточного відношення та оцінку їхньої точності. У результаті планується створення технічного рішення, яке забезпечить підвищення точності, надійності та продуктивності КВМ.

Очікується, що впровадження результатів дослідження дозволить значно розширити функціональні можливості КВМ, підвищити ефективність контролю виробництва та забезпечити конкурентоспроможність сучасних виробничих підприємств. Крім того, отримані результати матимуть перспективу для подальших досліджень у сфері автоматизованого вимірювального обладнання.

# 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТА ПРОЕКТУВАННЯ

## 1.1 Геометричні параметри виробів

Сучасні технології відкривають широкий спектр методів і засобів для контролю геометричних параметрів, які забезпечують високу точність вимірювань та підтримання належного рівня якості продукції. Геометричні параметри визначають форму і розміри виробів, тому їх контроль є критично важливим для досягнення високої точності та якості виробництва.

До геометричних параметрів належать такі характеристики, як:

- довжини, ширини та висоти виробів;
- діаметри й радіуси деталей;
- кутові величини, включно з кутом нахилу та іншими кутовими розмірами;
- показники плоскості та прямокутності поверхонь;
- відхилення від заданих форм і розмірів.

У цьому розділі буде проведено аналіз різноманітних методів і засобів контролю геометричних параметрів, їхніх переваг та недоліків. Окрім того, розглядатимуться вимоги до точності та повторюваності вимірювань, а також вплив навколишнього середовища та умов вимірювань на результати контролю.

Геометричні параметри виробів можуть бути визначені за різними стандартами та нормативами, такими як ДСТУ, ISO, DIN та інші. Важливо дотримуватися цих стандартів при контролі геометричних параметрів, оскільки вони визначають вимоги до точності та якості виробів.[1]

Для досягнення високої точності під час контролю геометричних параметрів виробів необхідно враховувати низку факторів, таких як температура, вологість,

вібрації та інші зовнішні впливи, що можуть негативно позначатися на результатах вимірювань. Ці чинники особливо важливі у виробничих умовах, де навіть найменші неточності можуть призвести до серйозних наслідків. Наприклад, невідповідність розмірів може зробити деталь непридатною для інтеграції з іншими елементами системи або знизити ефективність її функціонування.

У галузях, таких як авіаційна, медична чи оборонна промисловість, точність вимірювань має критичне значення. Будь-яка неточність у цих сферах може стати причиною серйозних небезпек для людей, матеріальних збитків або навіть аварій. Тому контроль геометричних параметрів виробів є важливою складовою технологічного процесу, яка забезпечує високу якість і надійність продукції.

Сучасні технології та обладнання дозволяють проводити детальний аналіз та точні вимірювання, що сприяє виявленню навіть найменших дефектів і відхилень. Контроль здійснюється за допомогою спеціалізованих інструментів, таких як координатно-вимірювальні машини (КВМ), оптичні сканери, та інші контрольно-вимірювальні засоби.

Серед методів контролю основними є:

Контактний метод – базується на використанні таких інструментів, як мікрометри, штангенциркулі, вимірювальні пробки тощо. Цей метод забезпечує високу точність, однак вимагає кваліфікованого персоналу, оскільки помилки у використанні можуть призводити до похибок.

Неконтактний метод – передбачає застосування оптичних, лазерних і ультразвукових технологій. Цей підхід дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та знизити ймовірність пошкодження виробів, однак має свої обмеження, пов'язані з умовами вимірювань і властивостями матеріалів.

Завдяки поєднанню цих методів і сучасного обладнання можна забезпечити точний контроль геометричних параметрів, що є ключовим чинником для підтримання високої якості продукції.

У процесі контролю геометричних параметрів виробів широко застосовуються сучасні програмні засоби, такі як тривимірне моделювання, комп'ютерна томографія, спектральний аналіз тощо. Вони забезпечують не лише високу точність вимірювань,

але й полегшують аналіз отриманих даних, що сприяє виявленню найменших дефектів.

Одними з найважливіших характеристик контролю є точність і повторюваність вимірювань. Точність відображає ступінь близькості вимірюваного значення до фактичного параметра виробу, тоді як повторюваність характеризує стабільність результатів під час повторних вимірювань одного й того самого параметра. Ці показники є критично важливими для забезпечення відповідності виробів стандартам та технічним вимогам.

Вимоги до точності та повторюваності залежать від призначення виробу, специфіки його виготовлення та галузевих стандартів. Наприклад, у точному машинобудуванні чи медичному обладнанні можуть вимагатися вимірювання з точністю до мікрметрів або навіть нанометрів. Для цього використовуються високоякісні вимірювальні інструменти, які регулярно проходять калібрування та налаштування.

Фактори, що впливають на точність і повторюваність: високоточні прилади з мінімальним рівнем похибок забезпечують стабільність результатів. Температура, вологість і вібрації можуть спричиняти зміни у фізичних параметрах як інструмента, так і самого виробу, що впливає на результати. Досвід та професіоналізм персоналу знижують ймовірність помилок під час проведення вимірювань.

Для підтримання високої точності контролю важливо забезпечити оптимальні умови вимірювання. Наприклад, зміни температури можуть викликати теплове розширення або стискання як вимірювального інструмента, так і самого виробу, що впливає на результати. Тому вимірювання часто проводяться у контрольованих умовах – у спеціалізованих лабораторіях чи приміщеннях із регульованим мікрокліматом.

Повторюваність вимірювань залежить не лише від характеристик приладу, але й від таких зовнішніх факторів, як стабільність навколишнього середовища, рівень шуму, та від дотримання процедури вимірювань. Для досягнення необхідного рівня стабільності використовують спеціальні стандарти, інструменти та методи, які зменшують вплив зовнішніх чинників на кінцевий результат.

Забезпечення високої точності та повторюваності вимірювань є важливим завданням для виробничих і контрольних процесів, що дозволяє мінімізувати ризики дефектів та гарантувати відповідність виробів технічним вимогам.

Серед важливих аспектів контролю геометричних параметрів виробів слід виділити умови проведення вимірювань. До них належать такі фактори, як наявність вібрацій, акустичного шуму, джерел електромагнітного випромінювання, а також інших електричних та механічних перешкод. Усі ці фактори можуть спричиняти спотворення отриманих даних, що негативно впливає на точність і повторюваність результатів вимірювань.

Вплив зовнішніх умов на точність можна мінімізувати шляхом проведення вимірювань у контрольованому середовищі. Наприклад, ізоляція від вібраційних джерел, екранування від електромагнітних полів або використання антивібраційних платформ здатні суттєво покращити якість вимірювань. Умови вимірювання мають бути строго регламентовані та відповідати стандартам, які враховують вплив навколишнього середовища.

Таким чином, забезпечення надійного та точного контролю геометричних параметрів можливе за умови врахування вимог до точності та повторюваності, а також правильного врахування зовнішніх впливів. Оптимізація процесів контролю дозволяє досягти високих результатів у виготовленні виробів із заданими геометричними характеристиками.

## **1.2 Огляд систем контролю геометричних параметрів виробів**

У сучасному виробничому процесі, коли якість продукції виходить на перший план, контроль геометричних параметрів відіграє вирішальну роль. Для реалізації цього завдання застосовуються спеціалізовані системи контролю, що дозволяють точно вимірювати та аналізувати різні характеристики виробів.

Система контролю геометричних параметрів являє собою комплекс технічних засобів та програмного забезпечення, який забезпечує моніторинг геометричних характеристик продукції. Основна її функція полягає в тому, щоб гарантувати

відповідність виготовлених виробів встановленим стандартам якості або специфікаціям замовника.

Такі системи знаходять широке застосування в промисловості, де точність виготовлення є критично важливою. До складу цих систем можуть входити лазерні сканери, оптичні системи, ультразвукові датчики та інші вимірювальні пристрої. Вони дозволяють отримувати дані про ключові параметри, такі як розміри, форма, відхилення від геометричних норм та інші характеристики.

Впровадження систем контролю геометричних параметрів сприяє забезпеченню високої якості продукції. Це особливо важливо для галузей, де продукція має виконувати високоточні функції або забезпечувати безпеку експлуатації, наприклад, у машинобудуванні, авіації чи медицині.[3]

Вибір конкретної системи контролю визначається рядом факторів, серед яких: тип продукції, її розміри та геометрія, необхідна точність вимірювань, масштаб виробництва та фінансові ресурси підприємства. Наприклад, для контролю складних форм або дрібних деталей оптимальними можуть бути лазерні або ультразвукові сканери, що забезпечують високу точність та деталізацію. У випадках, коли точність не є критичною, можна використовувати оптичні системи, що пропонують зручність і достатню ефективність, хоча й мають певні обмеження, такі як вимоги до освітлення.

Загалом, правильний вибір та інтеграція систем контролю геометричних параметрів дозволяє суттєво підвищити якість продукції, зменшити кількість дефектів і забезпечити відповідність найвищим стандартам виробництва.

Оптичні системи контролю геометричних параметрів використовують світлові сигнали для вимірювання розмірів та форми виробів. Основою їхньої роботи є різноманітні оптичні датчики та камери, які збирають інформацію про об'єкт.

Одним із прикладів таких систем є проекторні установки, що застосовуються для визначення розмірів та форми плоских деталей. Вони складаються з проектора, який спрямовує світловий шаблон на об'єкт, та камери, що фіксує зображення. На основі отриманих даних програмне забезпечення аналізує параметри виробу.

Контурні вимірювальні машини — це інший тип оптичних систем, який використовується для роботи з деталями складної геометрії. Завдяки камері, що захоплює інформацію з різних ракурсів, та програмному забезпеченню, ці системи забезпечують точні вимірювання розмірів і форми.

Лазерні сканери також широко застосовуються для створення тривимірних моделей об'єктів. Лазерний промінь сканує поверхню виробу, а програма обробляє дані для формування 3D-моделі, що дозволяє виконувати детальні вимірювання.

Вимірювальні мікроскопи, які використовують оптичні лінзи для збільшення зображення, теж є ефективним інструментом. Дані, отримані такими мікроскопами, аналізуються спеціальними програмами, що забезпечує високу точність визначення параметрів деталей.

Основними перевагами оптичних систем є висока точність, швидкість роботи та безконтактність, яка зменшує ризик пошкодження виробів. Крім того, вони дозволяють досліджувати об'єкти, які складно виміряти іншими методами. Однак їх недоліками є висока вартість, складність налаштування та залежність точності від умов довкілля й якості обладнання.

Щодо ультразвукових систем контролю, вони використовуються переважно для визначення товщини матеріалів та виявлення дефектів. Ці системи добре працюють з металевими та іншими матеріалами, здатними пропускати ультразвукові хвилі. Хоча такі методи можуть бути технічно складнішими та затратнішими за часом, вони відзначаються високою ефективністю та надійністю.

Ультразвукові системи контролю є ефективними інструментами для виявлення дефектів і деформацій виробів. Вони використовують високочастотні звукові хвилі для ідентифікації дефектів, таких як тріщини, включення або нерівності. Такі системи оснащені спеціалізованим обладнанням, що генерує, приймає та аналізує ультразвукові сигнали, дозволяючи отримувати точні дані про стан матеріалу.

Однією з основних переваг ультразвукових систем є їх висока чутливість, яка забезпечує виявлення навіть найдрібніших дефектів. Вони безпечні для оператора і не впливають на цілісність виробу, що робить їх незамінними в багатьох галузях



промисловості. Крім того, такі системи дозволяють швидко проводити перевірку, знижуючи час контролю якості.

Проте ультразвукові системи мають і певні обмеження. Наприклад, вони не підходять для всіх типів матеріалів і можуть бути малоефективними для виробів зі складною структурою. Висока вартість обладнання та складність експлуатації також можуть стати бар'єрами для їх застосування в деяких виробничих умовах.

Радіальні системи контролю широко використовуються для вимірювання геометричних параметрів, таких як діаметри, товщина стінок труб чи отворів. Ці системи базуються на датчиках, які змінюють своє положення відповідно до форми виробу, що дозволяє проводити точні вимірювання. Вони застосовуються в машинобудуванні, електроніці, авіації та інших галузях.

Серед переваг радіальних систем виділяють високу точність і повторюваність, здатність виявляти найменші відхилення від заданих розмірів і швидке проведення контролю. Однак вони можуть бути малоефективними для деталей зі складною формою або змінним радіусом. Також їх висока вартість і необхідність спеціальної підготовки персоналу можуть обмежувати використання в певних виробництвах.

Загалом, радіальні системи контролю є потужними інструментами для забезпечення якості продукції. Вони успішно використовуються в автомобільній, аерокосмічній, машинобудівній та інших галузях, де точність вимірювань має критичне значення.

Вимірювальні машини, що використовують комп'ютерну томографію, стають все більш популярними для точного вимірювання внутрішньої та зовнішньої геометрії виробів. Така система складається з джерела рентгенівського випромінювання, детектора та комп'ютера, який обробляє дані. Під час вимірювання виріб розміщується в рентгенівській камері, де він обертається, а рентгенівський промінь проходить через деталь. Детектор зафіксує промені, що пройшли через виріб, і передає цю інформацію комп'ютеру, який створює тривимірну модель на основі отриманих даних.

Такі машини особливо корисні для вимірювання складних виробів, таких як внутрішні елементи двигунів, турбіни або збірні механізми. Вони також здатні

вимірювати вироби з різних матеріалів, таких як метали, пластмаси та композити, що робить їх універсальними в різних галузях промисловості.

У нашій роботі ми зосереджуємося на контактних системах контролю. Контактні системи вимірюють геометричні параметри виробів за допомогою безпосереднього контакту з вимірювальними елементами, такими як кільцеві датчики, мікрометри або вимірювальні головки. Одним з найбільш поширених типів таких систем є координатно-вимірювальні машини (КВМ). Ці машини складаються з міцного каркаса, на якому встановлені датчики та система керування. КВМ здатні вимірювати геометричні параметри з високою точністю, включаючи прямолінійність, площину, кут нахилу, круглість та інші важливі характеристики.

Для виробництва великих і складних виробів найкраще використовувати КВМ, які оснащені програмним забезпеченням для вимірювання точних координат на численних точках виробу. Ці системи є надійними, точними і дозволяють визначати не лише форму і розмір, а й відхилення від заданих параметрів, що допомагає забезпечити високу якість продукції.

Ще одним типом контактних систем контролю є прості вимірювальні пристрої, такі як мікрометри, калібри, глибокоміри та інші. Ці пристрої використовуються для вимірювання конкретних геометричних параметрів, таких як діаметри отворів, товщина стінок та інші характеристики деталей.

Також існують контактні оптичні системи, такі як контуроміри, які працюють за допомогою оптичного датчика, що зчитує форму поверхні деталі та дозволяє вимірювати її параметри без прямого контакту.

Перевагою контактних систем є висока точність і повторюваність вимірювань. Однак їх недолік полягає в необхідності прямого контакту з деталлю, що може призвести до зношування частин інструмента та забруднення вимірювальних елементів.

Основними технічними характеристиками контактних-вимірювальних систем є точність, повторюваність вимірювань, швидкість вимірювання, довжина ходу, максимальне навантаження на прилад, роздільна здатність, а також можливість автоматизованого управління і обробки даних.

Точність і повторюваність вимірювань є основними показниками, оскільки вони визначають здатність системи точно вимірювати геометричні параметри. Швидкість вимірювань особливо важлива в умовах серійного виробництва, де економія часу є критичною. Довжина ходу, максимальне навантаження і роздільна здатність визначають обсяг робіт, що може виконувати система, а також її здатність вимірювати різні типи виробів і деталей.

Можливість автоматизованого управління та обробки даних підвищує точність вимірювань, знижує ризик помилок через людський фактор і підвищує продуктивність. Такі системи часто мають зв'язок з персональними комп'ютерами для аналізу та передачі даних, що дозволяє зберігати результати і полегшує процес перевірки якості.

Контактно-вимірювальна система повинна мати достатнє навантаження для вимірювання різних виробів, а також можливість зв'язку з комп'ютером для передачі даних. У багатьох випадках така система має функцію автоматичного вимірювання, що значно економить час і зменшує кількість людських помилок. Для мобільності і зручності деякі системи працюють від акумулятора, що забезпечує їх автономність.

### **1.3 Опис принципів вимірювання, якими датчиками, на яких принципах роботи**

Контроль геометричних параметрів виробів є важливою складовою забезпечення їх якості та відповідності вимогам замовника. Для цього використовують різноманітні методи і системи контролю, які базуються на застосуванні датчиків. Ці датчики вимірюють параметри виробу і перетворюють результати вимірювань у сигнали для подальшої обробки.

Контактні системи вимірювання працюють завдяки взаємодії датчиків з поверхнею деталі. В основі таких систем лежать два основних принципи: вимірювання відстані та вимірювання кутів.

Для вимірювання відстаней використовуються різні пристрої:

- Мікрометри, які вимірюють точні відстані між точками на поверхні виробу через вимірювальні наконечники.
- Компаратори, що засновані на використанні важільних механізмів та мікрометричних гвинтів для визначення відстані між двома точками.
- Мікроскопи, які допомагають вимірювати різні геометричні параметри, наприклад, діаметри або радіуси за допомогою оптичних зображень.

Для вимірювання кутів використовують:

- Гоніометри, що визначають кути між лініями або площинами на поверхні деталі за допомогою механічної системи.
- Протектори, які вимірюють кути між поверхнями за допомогою спеціальних шаблонів.

У контактних системах основним принципом є дотичне взаємодії датчиків з вимірювальною поверхнею виробу. Для точніших вимірювань використовують спеціалізовані вимірювальні головки з певними формами та матеріалами.

Сучасні системи контролю часто поєднують контактні та безконтактні методи, що дозволяє мінімізувати ризик пошкодження виробу. Безконтактні методи включають: лазерне сканування, оптичне відбиття, фотограмметрія, комп'ютерна томографія та інші.

У контактних системах також застосовують різноманітні датчики, включаючи датчики переміщення, сили, тиску, а також механічні та пневматичні датчики для високоточних вимірювань геометричних характеристик виробів.

Серед сучасних методів контролю геометричних параметрів можна виділити три основні категорії: 3D координатно-вимірювальні машини, оптичні вимірювальні системи та сканери. Кожен з цих методів має свої переваги в залежності від типу виробу та вимог до точності вимірювань.

3D координатно-вимірювальні машини (КВМ) застосовують контактні методи для вимірювання, що дозволяє досягти високої точності і повторюваності вимірювань. Вони вимірюють координати точок на поверхні деталі та дозволяють контролювати такі параметри, як форма, розміри та положення частини в просторі.

Оптичні вимірювальні системи є безконтактними, що дає змогу проводити вимірювання з високою швидкістю без ризику пошкодження виробу. Вони використовують лазери або інші оптичні технології для визначення геометрії деталей, часто застосовуються для оцінки форми поверхні або товщини деталей.

Сканери застосовуються для вимірювання складних поверхонь та об'єктів, які важко або неможливо виміряти за допомогою традиційних контактних методів. Це дає змогу створювати точні тривимірні моделі складних геометрій.

Багато сучасних систем також оснащені автоматизованими функціями, такими як автоматичне вимірювання, збереження даних в електронному вигляді та зв'язок з комп'ютерними системами для обробки даних. Крім того, вони можуть мати можливості для автоматичного коригування помилок вимірювань та аналізу отриманих результатів.

Координатний метод вимірювання, що використовується в координатно-вимірювальних машинах (КВМ), є одним із найбільш поширених для визначення геометричних параметрів. Цей метод полягає в вимірюванні координат точок на поверхні деталі, що дозволяє точно визначити розміри, форму і положення виробу. КВМ можуть бути оснащені різними типами датчиків, включаючи механічні, оптичні, лазерні, а також з різними способами зв'язку з верстатом — від дротових до бездротових.

Результати вимірювань обробляються за допомогою програмного забезпечення, яке дозволяє проводити порівняння з еталонними значеннями та визначати відхилення. Такі дані використовуються для контролю якості виробів і налагодження технологічних процесів.

Переваги контактних систем включають високу точність та можливість вимірювати широкий спектр геометричних параметрів виробів. Однак є і обмеження, зокрема потреба в контакті датчика з поверхнею деталі, що може призвести до її пошкодження або зносу. Також для забезпечення точності часто необхідна попередня підготовка поверхні виробу і більш складне калібрування порівняно з безконтактними системами.

Датчики вимірювання є важливими компонентами будь-якої системи контролю геометричних параметрів виробів. Їх основна функція полягає в перетворенні фізичних величин (наприклад, деформації, тиску, температури тощо) у електричні сигнали, які можуть бути оброблені та використані для подальшого аналізу і контролю.

До основних типів датчиків, що використовуються в таких системах, належать:

- Датчики деформації, які вимірюють механічні деформації виробу при його навантаженні.
- Датчики положення, які вимірюють відстань між двома точками на виробі.
- Датчики тиску, які вимірюють тиск рідини або газу в системі.
- Датчики температури, які вимірюють температуру в окремих точках виробу.

Вибір типу датчика залежить від конкретних вимог до точності, швидкості вимірювань та умов експлуатації. Важливо, щоб датчики були здатні забезпечити точність і надійність вимірювань, що критично для забезпечення якості та відповідності виробів до заданих параметрів.

Датчики деформації виконують важливу роль у вимірюванні механічних деформацій виробів під час їх навантаження. Зазвичай ці датчики виготовляються у вигляді тонких пластинок або проволочок, які прикріплюються до поверхні виробу. Коли виріб піддається навантаженню, ці датчики зазнають деформації, що дозволяє вимірювати зміни, які відбуваються у механічних характеристиках матеріалу, таких як напруження, деформація, або модуль Юнга. Такі датчики використовуються у різних галузях, зокрема в авіаційній та автомобільній промисловості, машинобудуванні та інших технічних сферах, де критично важливо контролювати механічні властивості матеріалів.

Датчики положення використовуються для вимірювання відстані між двома точками на виробі і можуть працювати на основі різних фізичних принципів, що визначають точність і застосування таких датчиків. Зокрема:

Оптичні датчики положення використовують фотодетектори для вимірювання відстані між об'єктами, використовуючи зміни в інтенсивності світла або зміщення світлового променя.

Магнітні датчики положення базуються на магнітних полях, де відстань між датчиком і об'єктом вимірюється через зміни в магнітному полі.

Потенціометричні датчики положення вимірюють зміни електричного опору, що залежать від переміщення рухомого елемента в механічній системі.

Ємнісні датчики положення вимірюють зміни ємності між двома електродами, що змінюється залежно від відстані між ними, і часто використовуються для точних вимірювань на мікрорівні.

Кожен тип датчика має свої специфічні переваги й обмеження. Наприклад, оптичні датчики можуть забезпечити високу точність, але чутливі до умов освітлення, тоді як магнітні датчики менш чутливі до таких умов. Потенціометричні та ємнісні датчики можуть працювати в складних умовах, де інші методи можуть бути менш ефективними. Вибір типу датчика залежить від вимог до точності, швидкості вимірювань, а також від середовища і специфіки процесу вимірювання.

Датчики тиску є важливим елементом у системах контролю геометричних параметрів виробів, оскільки вони дозволяють вимірювати тиск рідин чи газів у різноманітних системах. Зазвичай, такі датчики містять п'єзореzystивні елементи, що генерують електричний сигнал при зміні тиску. Ці датчики можуть бути використані, наприклад, для контролю тиску газу в вентиляційних системах або тиску рідини в охолоджувальних системах двигунів. В залежності від специфікацій застосування та вимог до точності, датчики тиску можуть бути виготовлені з різних матеріалів і мати різні робочі діапазони тиску.

Датчики температури вимірюють температуру на різних етапах процесу за допомогою термометрів або термопар. Термометри вимірюють температуру через зміну довжини термометричного матеріалу з температурою, а термопари вимірюють температуру через генеровану електричну напругу на контакті двох різних металів, коли їх температура змінюється. Такі датчики часто використовуються в різних сферах, таких як автомобілебудування, електроніка, металургія та інші промислові

галузі, де точне вимірювання температури необхідне для коректної роботи технологічних процесів та пристроїв.

Датчики можуть працювати за різними принципами, залежно від того, яку фізичну величину вони вимірюють. Наприклад, датчики тиску можуть бути побудовані на основі напівпровідникових технологій, мембран або ртутних наповнень. Датчики деформації можуть використовувати тензорезистивний ефект або працювати на основі оптичних волокон (фіброоптичних датчиків). Датчики положення можуть вимірювати відстань за допомогою магнітних, оптичних або ультразвукових сигналів. Датчики температури можуть працювати на основі термістрів, термопар або змін оптичних властивостей матеріалів в залежності від температури. Кожен тип датчика вибирається на основі вимог до точності, швидкості вимірювання і умов роботи.

#### **1.4 Координатно-вимірювальні машини**

У сучасному промисловому виробництві забезпечення точності та високої якості деталей є одним із ключових аспектів. Для досягнення цих цілей широко застосовуються координатно-вимірювальні машини (КВМ) з гнучкими автоматизованими системами.

Координатно-вимірювальні машини забезпечують надзвичайно високу точність і повторюваність результатів, що робить їх незамінними у процесах прецизійного виготовлення та контролю якості. Завдяки високій роздільній здатності КВМ можуть швидко і точно вимірювати розміри об'єктів та їх геометричні параметри. Машини здатні виконувати значну кількість вимірювань за короткий час, що підвищує ефективність промислових процесів.

Однією з переваг КВМ є можливість автоматичного виконання вимірювань за задалегідь запрограмованим алгоритмом, що мінімізує необхідність постійної участі оператора. Машини дозволяють вимірювати складні геометричні форми, які можуть бути недоступними для інших методів контролю. Крім того, КВМ оснащуються



різними типами датчиків, такими як контактні, оптичні чи лазерні, що забезпечує універсальність при роботі з різними поверхнями та матеріалами.

Сучасні КВМ інтегруються з програмним забезпеченням, яке дозволяє візуалізувати отримані дані, проводити їх порівняння зі стандартами, здійснювати статистичний аналіз та формувати звіти. Це значно спрощує аналіз результатів вимірювань і сприяє прийняттю оперативних рішень на виробництві.

Координатно-вимірювальні машини знаходять широке застосування в таких галузях, як автомобілебудування, авіаційна промисловість, медицина, електроніка, машинобудування та аерокосмічна індустрія. Вони здатні вимірювати нестандартні, складні або асиметричні деталі, працювати з криволінійними та контурними поверхнями, а також визначати координати спеціальних елементів відносно базових поверхонь.

Таким чином, КВМ забезпечують необхідну точність та якість продукції, сприяючи підвищенню рівня технологічності виробничих процесів та конкурентоспроможності продукції в різних галузях економіки.[10]

Сучасні координатно-вимірювальні машини здатні інтегруватися з системами автоматизованого проектування, що забезпечує можливість співставлення реальних вимірів із заданими параметрами. Такий підхід спрощує виявлення невідповідностей та оптимізує процес розробки, даючи змогу фахівцям знаходити та усувати конструктивні недоліки ще на етапі проектування, що суттєво економить ресурси та час.

Функціонування вимірювальної системи ґрунтується на застосуванні точкового методу вимірювань у просторовій системі координат. Головне завдання такого обладнання полягає у точному визначенні розташування та геометричних характеристик досліджуваного об'єкта. Методика роботи передбачає обчислення параметрів поверхонь на основі вимірювання координат окремих точок, використовуючи фіксовану систему координат відносно об'єкта дослідження.

Габарити робочої зони визначають максимально допустимі розміри об'єктів для вимірювання. Діапазон розмірів може істотно відрізнятися залежно від конкретної моделі обладнання – від декількох сантиметрів до багатьох метрів по кожній осі.

Надійне закріплення об'єкта вимірювання є критично важливим для забезпечення стабільності процесу. Використовуються спеціальні кріпильні елементи та механізми для надійної фіксації. Правильне закріплення запобігає виникненню вібрацій та зміщень, які можуть спотворити результати вимірювань.

Система кріплення повинна забезпечувати фіксацію без деформації геометрії об'єкта. Ключовими факторами є жорсткість кріпильних елементів та їхній вплив на цілісність досліджуваного зразка. Оптимальне закріплення гарантує незмінність положення при збереженні початкових параметрів об'єкта.

Вимірювальні датчики становлять основу функціонування координатно-вимірювальних систем. Вони забезпечують збір точкових даних про геометричні характеристики досліджуваних об'єктів. Розрізняють такі основні типи сенсорів:

Контактні датчики здійснюють безпосередній контакт з поверхнею для вимірювання. Використовуються наконечники різної форми для визначення розмірів, профілю, заглиблень та отворів. При контакті з поверхнею відбувається реєстрація змін параметрів з передачею даних до системи обробки.

Фотооптичні датчики використовують світлове випромінювання для вимірювань. Застосовуються лазерні сканери та проекційні системи для визначення відстаней, форм та контурів. Принцип роботи базується на аналізі відбитого або пропущеного світла.

Безконтактні датчики працюють без прямої взаємодії з об'єктом, використовуючи відбите або випромінене електромагнітне випромінювання. Це можуть бути акустичні датчики, що вимірюють відстань за допомогою відбитих звукових хвиль, або інфрачервоні сенсори, що використовують відбиття ІЧ-променів.

Ємнісні датчики визначають розміри та форму об'єктів на основі змін електричної ємності. Вони містять провідні елементи, що реагують на зміну відстані до об'єкта. Аналіз змін ємності дозволяє визначити геометричні параметри.

Різноманітність вимірювальних датчиків розширює функціональні можливості координатно-вимірювальних систем. Підбір конкретного датчика здійснюється з урахуванням специфіки вимірювань, характеристик досліджуваних об'єктів та вимог до точності й швидкодії. Так, тактильні датчики застосовують для прецизійних

вимірювань, тоді як безконтактні варіанти доцільні при роботі з габаритними об'єктами або за неможливості прямого контакту.

При виборі датчиків враховують їх метрологічні характеристики: діапазон вимірювань, чутливість, стабільність показань та відтворюваність результатів. Існують спеціалізовані датчики для конкретних задач – вимірювання глибини канавок чи оцінки шорсткості поверхонь. Конструктивно датчики можуть бути вбудованими в вимірювальну головку або виконані як змінні модулі, що підвищує адаптивність системи.

Коректний підбір вимірювальних датчиків визначає ефективність всієї координатно-вимірювальної системи, безпосередньо впливаючи на достовірність результатів. Раціональне комбінування різних типів датчиків та їх оптимальне розміщення забезпечує досягнення необхідної точності та продуктивності вимірювань.

Координатна система є фундаментальним елементом вимірювальної машини, що забезпечує просторову прив'язку для визначення положення та розмірів об'єктів.

Ключові аспекти координатної системи охоплюють: варіант системи координат, розташування початку відліку, просторову орієнтацію та узгодженість системи.

У вимірювальних машинах переважно застосовують декартову та полярну системи координат. Декартова система використовує ортогональні осі ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) для вимірювання переміщень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Полярна система оперує радіальною ( $\rho$ ) та кутовою ( $\theta$ ) координатами для визначення відстані та кута відносно базової точки.

Точка початку відліку координат зазвичай визначається перетином осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  у декартовій системі. Вона може бути фіксованою або рухомою в межах робочого простору відповідно до завдань вимірювання.

Орієнтація координатної системи може варіюватися відносно вимірюваних об'єктів. Розрізняють абсолютну орієнтацію, прив'язану до глобальних напрямків, та відносну – пов'язану з конкретним об'єктом чи простором вимірювання.

Єдність координатної системи у всіх компонентах вимірювального комплексу – машині, програмному забезпеченні та сенсорах – є критично важливою. Це гарантує цілісність вимірювань, оскільки всі дані співвідносяться з єдиною системою відліку. Зазвичай координатна система прив'язується до фіксованих точок обладнання або стандартизованих базових елементів, що забезпечує порівнянність результатів між різними пристроями та в різні моменти часу.

Коректна настройка та застосування координатної системи є ключовим етапом підготовки вимірювального обладнання. Це створює основу для досягнення високої точності, стабільності результатів та спрощує подальшу обробку отриманих даних.

Система приводів є невід'ємною складовою вимірювальної машини, що забезпечує прецизійне переміщення сенсорів та об'єктів у робочому просторі. Основні компоненти системи приводів включають різні типи:

Електромеханічні системи перетворюють електричну енергію в механічний рух. До них належать крокові двигуни та лінійні приводи. Такі системи відрізняються високою точністю позиціонування, можливістю регулювання швидкості та програмування складних траєкторій руху.

Пневматичні системи використовують енергію стисненого повітря. Вони найкраще підходять для швидкого переміщення легких компонентів. Характеризуються швидкою реакцією та простотою конструкції, проте мають дещо нижчу точність порівняно з електромеханічними аналогами.

Гідравлічні системи функціонують на основі рідин під тиском. Вони застосовуються у випадках, де потрібні значні зусилля для переміщення масивних об'єктів або забезпечення надточних рухів. Відрізняються високою точністю та широким діапазоном робочих навантажень.

Лінійні механізми забезпечують переміщення вздовж координатних осей. Вони можуть базуватися на різних технологіях: кулькових гвинтах, приводних ременях, напрямних або гідросистемах. Такі механізми гарантують плавність руху та високу точність позиціонування при вимірюваннях.

Система приводів також включає керуючі компоненти: контролери двигунів, датчики положення, енкодери та спеціалізоване програмне забезпечення. Їх взаємодія

забезпечує точність переміщень, контроль швидкості та надійність роботи. Програмне забезпечення дозволяє налаштовувати параметри руху, визначати точки зупинки та програмувати траєкторії сканування.

Надійне функціонування рушійної системи є визначальним фактором для забезпечення точності вимірювань. Вона гарантує стабільність переміщень, прецизійний контроль положення та швидкості, що необхідно для виконання складних вимірювальних операцій.

Програмний комплекс виступає центральним елементом керування вимірювальною системою, забезпечуючи взаємодію з користувачем, налаштування процесу вимірювань та аналіз отриманих результатів. Розглянемо основні функціональні можливості:

Керування переміщеннями реалізується через спеціалізоване програмне забезпечення, яке контролює параметри руху: швидкість, прискорення, позиціонування та повторюваність. Застосовуються різні алгоритми керування, зокрема PID-регулювання, що забезпечують оптимальну траєкторію руху.

Вбудований набір інструментів дозволяє проводити різнопланові вимірювання та аналізувати дані. Функціонал охоплює визначення лінійних розмірів, діаметрів, кутів, форми та профілю об'єктів. Передбачена візуалізація результатів, статистична обробка та формування звітної документації.

Програмне забезпечення підтримує калібрування вимірювальної системи для компенсації систематичних похибок. Користувач може створювати та зберігати програми вимірювань, що визначають послідовність операцій для об'єктів різної конфігурації. Інтерфейс спрощує введення параметрів та налаштування процесу вимірювань.

Важливою особливістю є можливість інтеграції з іншими системами. Підтримується взаємодія з CAD-програмами для імпорту моделей та системами керування виробництвом для обміну даними, що оптимізує процеси проектування та контролю якості.

Програмний комплекс забезпечує комплексну обробку отриманих даних. Після збору інформації виконується її фільтрація, калібрування та компенсація похибок для

підвищення точності результатів. Реалізовані функції статистичного аналізу, порівняння зі специфікаціями та виявлення відхилень.

Для наочного представлення результатів передбачені різноманітні засоби візуалізації: графіки, діаграми, тривимірні моделі. Це спрощує інтерпретацію даних та прийняття рішень щодо якості контрольованих об'єктів.

Така комплексна обробка вимірювальної інформації є необхідною для отримання достовірних результатів та забезпечення належного контролю якості виробів.

Метрологічні характеристики вимірювальної системи визначають її спроможність забезпечувати необхідний рівень точності. Оцінювання здійснюється за комплексом параметрів: діапазоном розсіювання результатів, величиною похибки, стабільністю показань та роздільною здатністю. Ключовим завданням є досягнення відповідності системи встановленим вимогам точності.

Валідація вимірювальної системи передбачає комплексну оцінку її відповідності нормативним вимогам та стандартам. Процедура охоплює контроль точності, перевірку робочого діапазону, калібрування вимірювальних каналів та тестування функціональності приводів і сенсорів. Такий контроль гарантує надійність вимірювань та їх відповідність стандартам.

Система може здійснювати самодіагностику через вбудовані алгоритми, включаючи автоматичне тестування та оцінку повторюваності результатів. Додатково проводиться зовнішній контроль із застосуванням еталонних засобів вимірювання або через незалежні метрологічні лабораторії, що забезпечує об'єктивне підтвердження характеристик системи.

Забезпечення високої точності та регулярна перевірка є основою достовірності вимірювань координатної машини. Належна точність гарантує якість контролю та відповідність продукції технічним вимогам. Періодична верифікація включає калібрування, звірення з еталонами та аналіз контрольних вимірювань. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення та вживати коригувальні заходи для підтримання стабільності метрологічних характеристик.

## 1.5 Поширені типи КВМ

Процес вимірювання на координатно-вимірювальних машинах ґрунтується на взаємному переміщенні об'єкта контролю та вимірювального сенсора. Конструктивні рішення різних моделей передбачають різні варіанти реалізації цих переміщень - від повністю рухомого сенсора до комбінованого руху деталі та датчика.

У більшості випадків, особливо при контролі масивних та габаритних виробів, застосовується схема з нерухомим об'єктом та рухомих вимірювальним датчиком. При роботі з компактними деталями часто використовується варіант з переміщенням вимірювального столу по одній, рідше по двох координатах.

Орієнтація координатних осей визначається умовно - зазвичай вісь з найбільшим діапазоном вимірювання позначається як X, а вертикальна вісь, перпендикулярна до основи машини, визначається як Z.[5]

Такі конструктивні особливості забезпечують можливість прецизійного вимірювання геометричних параметрів об'єктів у тривимірному просторі, що дозволяє ефективно вирішувати різноманітні задачі метрологічного контролю у промисловому виробництві.

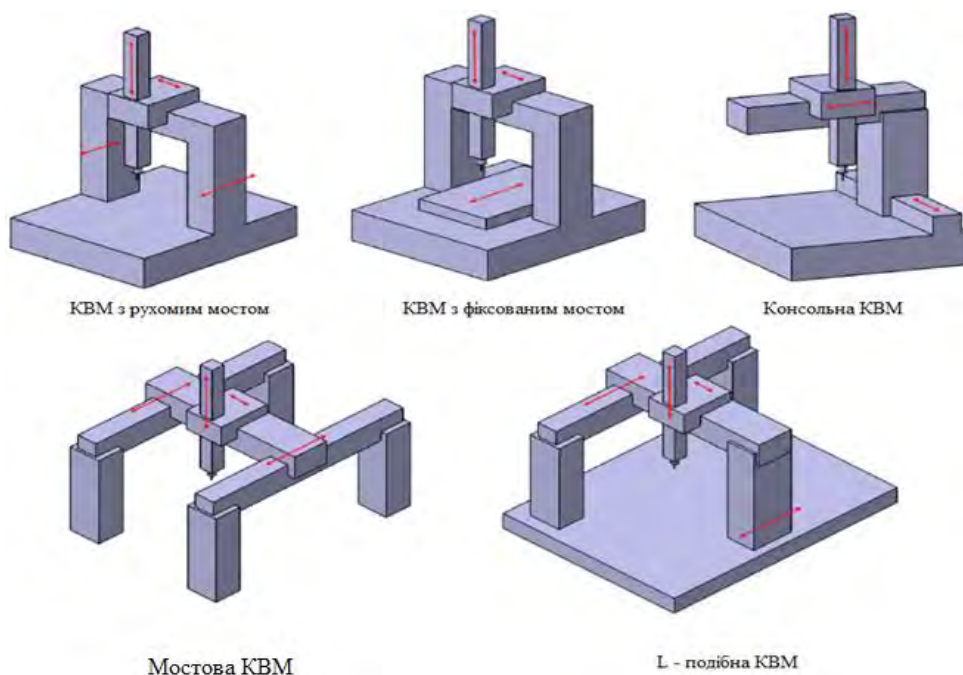


Рисунок 1.1 – Поширені типи КВМ

Портальна координатно-вимірювальна машина (рис 1.2) являє собою спеціалізований комплекс, що використовує конструкцію порталного типу для контролю геометричних параметрів. Її відмінними рисами є значні габарити та висока точність, що дозволяє працювати з масивними деталями.

Конструктивно машина складається з порталу на вертикальних опорах із поперечною балкою. Така архітектура забезпечує стабільність переміщення вимірювальної платформи з датчиком. Платформа має можливість руху за трьома координатними осями для здійснення просторових вимірювань.

Система оснащується різноманітними вимірювальними засобами: контактними щупами, лазерними сенсорами, оптичними сканерами та камерами. Це забезпечує прецизійний контроль геометричних характеристик об'єктів.



Рисунок 1.2 – Портальна КВМ

Відмінними особливостями порталних машин є висока точність та повторюваність вимірювань, що досягається жорсткістю конструкції та застосуванням прецизійних приводів і датчиків. Такі характеристики дозволяють контролювати навіть мініатюрні деталі з високою достовірністю.

Сучасні порталні системи оснащуються засобами автоматизації та спеціалізованим програмним забезпеченням. Це мінімізує участь оператора, забезпечуючи автоматичне виконання вимірювань, обробку даних та аналіз



результатів. Деякі моделі підтримують режим сканування поверхонь для отримання повної тривимірної моделі об'єкта, що особливо важливо при контролі складних форм.

Портальні координатно-вимірювальні машини знаходять широке застосування в галузях, де критична висока точність вимірювань: автомобілебудуванні, аерокосмічній промисловості, металообробці, виробництві медичного обладнання та електроніки.

Такі системи є ефективним інструментом метрологічного забезпечення виробництва. Їх характеристики точності, автоматизації та функціональні можливості роблять їх незамінними для сучасного промислового виробництва, де пріоритетними є якість, точність та ефективність.

Консольний тип координатно-вимірювальної машини (рис. 1.3) характеризується специфічною конструкцією з опорною консоллю, на якій монтується вимірювальний датчик, та нерухомим робочим столом. Сенсорний блок має можливість переміщення за трьома координатними напрямками (X, Y, Z), в той час як стіл залишається фіксованим. Обладнання може комплектуватися різними типами сенсорів - контактними щупами, оптичними та лазерними сканерами. Керування здійснюється за допомогою комп'ютерної системи, що забезпечує автоматизацію вимірювань з високою точністю та продуктивністю.

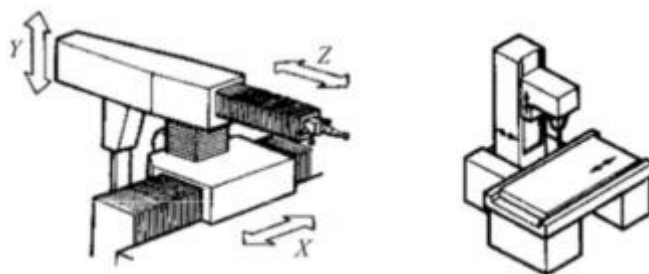


Рисунок 1.3 – Консольна КВМ

Функціональні можливості консольних машин дозволяють контролювати широкий спектр параметрів: лінійні розміри, геометричну форму, прямолінійність, паралельність та перпендикулярність поверхонь. Це робить їх універсальним інструментом для різноманітних задач метрологічного контролю. Значний робочий простір цих машин забезпечує можливість вимірювання об'єктів різної конфігурації та габаритів, що особливо важливо при контролі великогабаритних та складнопрофільних деталей у промисловому виробництві.

Мостова координатно-вимірювальна (рис. 1.4) машина відрізняється характерною конструкцією у вигляді мостової системи з горизонтальними балками, по яких переміщуються вимірювальний датчик та робоча платформа.



Рисунок 1.4 – Мостова КВМ

Ключовими характеристиками таких машин є можливість горизонтального переміщення вимірювального модуля та робочого столу вздовж балок, що дозволяє контролювати габаритні деталі та здійснювати вимірювання на значній площі. Жорстка мостова конструкція забезпечує високу точність вимірювань, а багатоосьова система переміщень розширює функціональні можливості контролю різноманітних параметрів. Хоча мостові системи мають просторий робочий об'єм, їхнім суттєвим недоліком є обмежений доступ до об'єкта вимірювання через особливості конструктивного виконання.

## 1.6 Голівки координатно вимірювальної машини

Вимірювальна головка (рис. 1.5) є ключовим функціональним елементом координатно-вимірювальної машини, що забезпечує контроль геометричних параметрів виробів. Конструктивно вона об'єднує сенсорні елементи, механізми переміщення та керуючі пристрої, які спільно забезпечують точність та відтворюваність вимірювань.



Рисунок 1.5 – Голівки КВМ

Головним призначенням вимірювальної головки є визначення розмірів, форми та просторового положення деталей. Для цього вона оснащується різними типами сенсорів – оптичними, контактними або лазерними системами, які здатні фіксувати різноманітні параметри: лінійні розміри, діаметри, кути, висотні параметри.

Система переміщення головки забезпечує її рух у трьох і більше координатних напрямках, залежно від конструкції машини. Використовуються різні механізми: лінійні приводи, кулькові гвинтові передачі, зубчасті рейки, що забезпечують прецизійне позиціонування в робочому просторі.

Керуючий блок відповідає за координацію рухів головки та обробку вимірювальних даних. Він опрацьовує сигнали сенсорів, аналізує геометричні параметри та може налаштовувати режими вимірювання, обробляти інформацію та формувати звітну документацію.

Основними функціями вимірювальної головки є:

1. Зняття геометричних характеристик виробів за допомогою сенсорних систем
2. Реалізація просторових переміщень для вимірювання різних точок деталі
3. Керування рухами та реєстрація вимірювальної інформації
4. Обробка даних та оцінка відповідності параметрів заданим вимогам
5. Підготовка звітів та візуалізація результатів контролю

Вимірювальна головка є виконавчим органом координатно-вимірювальної машини, що реалізує контроль геометричних характеристик об'єктів. Її оснащують різноманітними сенсорними системами - оптичними, контактними та лазерними вимірювальними модулями.

Конструкція передбачає можливість просторового переміщення по трьох і більше координатах за допомогою спеціальних механізмів: лінійних приводів, кулькових гвинтових передач або зубчастих рейок. Керування рухом та обробка вимірювальної інформації здійснюється контролером, який аналізує розмірні параметри та форму деталей. Залежно від специфіки вимірювальних задач використовуються різні типи головок: тактильні для контактних вимірювань, оптичні для безконтактного контролю, лазерні для високоточних вимірювань, скануючі для отримання масиву даних про поверхню

Тактильні вимірювальні головки використовують контактні сенсори для прецизійного визначення розмірів та геометрії деталей. Конструкція передбачає застосування різних типів датчиків відповідно до вимірювальних задач. Характерним прикладом є щупи зі сферичними наконечниками для точкових вимірювань, де контакт наконечника з поверхнею забезпечує фіксацію параметрів. Модулі

контактних датчиків різняться за формою та габаритами і підбираються згідно з особливостями контрольованих характеристик.

Оптичні головки реалізують безконтактний метод вимірювання з використанням оптичних сенсорів. Вони застосовують різноманітні технології отримання інформації про форму, контури та структуру поверхонь без механічної взаємодії з деталлю.

Оптичні голівки можуть використовувати проекційну стереоскопію, що формує подвійне зображення об'єкта з різних ракурсів для визначення геометричних параметрів на основі аналізу розбіжностей.

Також лазерне сканування поверхні з реєстрацією відбитого випромінювання за допомогою фотодетекторів, що дозволяє визначати висотні параметри, профіль та текстуру поверхні

Технологія дифузного відбиття, що застосовується в оптичних вимірювальних головках, забезпечує визначення рельєфу поверхні об'єкта. Принцип дії базується на аналізі параметрів світла, розсіяного від контрольованої поверхні, за допомогою спеціалізованих оптичних сенсорів.

Лазерні вимірювальні головки застосовуються для визначення просторових параметрів об'єктів - відстаней, висотних характеристик та інших розмірів. Система використовує різні методи вимірювання, включаючи триангуляцію та фазові вимірювання. Принцип роботи базується на аналізі часу проходження лазерного променя та його відхилення за допомогою фотодетекторів, що дозволяє визначати відстань до об'єкта та його висотні параметри.

Метод триангуляції передбачає спрямування лазерного променя на поверхню досліджуваного об'єкта з подальшою реєстрацією відбитого випромінювання фотодетектором. Визначення відстані до об'єкта здійснюється шляхом математичної обробки геометричних співвідношень між елементами вимірювальної системи.

Принцип дії фазового детектора базується на реєстрації фазових змін лазерного випромінювання при взаємодії з поверхнею об'єкта. Аналіз цих фазових зміщень забезпечує можливість вимірювання мікроскопічних переміщень для визначення висотних параметрів та профілю поверхні.

Окремим класом вимірювальних пристроїв є скануючі головки, що функціонально подібні до лазерних систем. Їх призначення полягає у формуванні масиву точкових даних про поверхню об'єкта для детального аналізу геометрії, форми та структури.

Існують різновиди скануючих головок, що використовують альтернативні фізичні принципи - акустичні або електромагнітні хвилі. Вони створюють цифровий образ поверхні на основі аналізу відбитих сигналів.

Особливістю скануючих систем є можливість отримання комплексної інформації про поверхню об'єкта через збір великого масиву точкових даних. Така інформація використовується для різноманітних завдань: оцінки геометричних параметрів, пошуку дефектів, технологічного контролю та інших видів аналізу.

## **1.7 Датчики вимірювальних голівок КВМ**

Вимірювальні пристрої (датчики) відіграють ключову роль у процесі збору та обробки інформації про різноманітні фізичні параметри та характеристики об'єктів. Їх фундаментальне призначення полягає у перетворенні різних фізичних величин в електричні сигнали, що дозволяє проводити подальшу обробку та аналіз отриманих даних.

Функціональне призначення таких пристроїв зосереджене на забезпеченні високоточного та достовірного збору інформації про навколишнє середовище, різноманітні об'єкти та процеси. Зібрані дані створюють основу для здійснення контролю параметрів, проведення вимірювань, постійного моніторингу, виявлення відхилень та діагностики несправностей у багатьох сферах - від інженерних систем до промислових комплексів.

Сфера впровадження вимірювальних пристроїв характеризується значною різноманітністю. Вони ефективно застосовуються для визначення багатьох фізичних

параметрів: тиску, деформацій, вібраційних коливань, переміщень, позиціонування, кутових швидкостей, характеристик магнітних полів та інших важливих показників.

Таким чином, основне призначення вимірювальних пристроїв полягає у забезпеченні високоточного та надійного визначення фізичних параметрів, що дозволяє отримувати об'єктивні дані для ефективного контролю та управління різноманітними об'єктами та процесами.

Контактні сенсори тригерного типу являють собою специфічний різновид вимірювальних пристроїв, призначених для реєстрації фізичного контакту з об'єктами. В основі їх функціонування лежить принцип фіксації замикання або розмикання електричного ланцюга при взаємодії з об'єктом дослідження.

Конструктивно такі сенсорні пристрої формуються з системи електродних елементів чи контактних вузлів, розміщених у спосіб, що забезпечує утворення розімкненого або замкненого електричного контуру. Взаємодія об'єкта з сенсорною поверхнею викликає зміни електропровідності між контактними елементами, що призводить до модифікації стану електричного ланцюга.

При досягненні певного порогового рівня контактного тиску або електропровідності відбуваються зміни електричного опору чи струму, які використовуються системою для ідентифікації моменту дотику. Зафіксовані зміни трансформуються в електричний сигнал або активують тригерний механізм, сигналізуючи про встановлення контакту з об'єктом.

Сфера практичного застосування контактних сенсорів тригерного типу охоплює різноманітні галузі: від метрологічних вимірювань та досліджень фізико-механічних характеристик матеріалів до інтеграції в автоматизовані системи контролю технологічних процесів.

Тензометричні сенсори дотику функціонують на основі спеціальних чутливих елементів, які модифікують свої електричні характеристики під впливом механічної деформації. Їх робочий механізм ґрунтується на реєстрації змін, що виникають при контактній взаємодії з поверхнею пристрою, викликаючи деформацію вбудованих тензоелементів. Ці елементи являють собою високочутливі компоненти, здатні трансформувати механічні деформації у зміни опору, ємності чи індуктивності.

Механічна взаємодія з поверхнею призводить до деформації тензоелементів, що відображається у варіаціях їх електричних параметрів. Ці зміни перетворюються на вимірювальний сигнал, який відображає інтенсивність контактної взаємодії.

У сфері сенсорних технологій особливе місце займають скануючі пристрої контактного типу. Їх визначальною характеристикою є здатність здійснювати просторове сканування поверхні для виявлення точок взаємодії з об'єктами. Архітектура таких пристроїв базується на матричному розташуванні сенсорних елементів, що забезпечує комплексний моніторинг контактної взаємодії по всій робочій поверхні.

Механізм функціонування скануючих пристроїв ґрунтується на реєстрації змін електрофізичних параметрів у точках контакту. Фізична взаємодія з сенсорною поверхнею викликає локальні зміни електричних характеристик, які фіксуються матричною структурою та обробляються для визначення координат взаємодії.

Індукційні лінійні перетворювачі представляють окрему категорію вимірювальних пристроїв, що використовують електромагнітну індукцію для визначення лінійних переміщень. Ці пристрої знаходять широке застосування в задачах прецизійного позиціонування та вимірювання відстаней.

Принцип роботи індукційних перетворювачів базується на реєстрації змін магнітного поля при переміщенні. Конструктивно вони складаються з магнітопроводу та індукційної обмотки, пов'язаної з рухомим елементом. Переміщення об'єкта викликає модуляцію магнітного потоку через обмотку, що генерує електричний сигнал. Аналіз цього сигналу дозволяє визначити параметри переміщення об'єкта.

Індукційні лінійні перетворювачі характеризуються високою точністю вимірювань, тривалим експлуатаційним періодом та стійкістю до температурних впливів. Їх надійність та швидкодія забезпечують ефективне застосування в промислових системах автоматизації.[20]

Інкrementні позиційні перетворювачі представляють собою вимірювальні пристрої, призначені для визначення параметрів руху - позиції, швидкісних характеристик та напрямку обертання рухомих механічних елементів. Їх особливістю



є надання інформації про зміну положення в покроковому форматі через генерацію сигналів, що корелюють з механічним переміщенням.

Конструктивно такий перетворювач містить оптичний сенсор, що продукує електричні сигнали при проходженні спеціальних міток на вимірювальній шкалі, закріпленій на валу. Шкала має систему оптичних маркерів у вигляді прорізів, розташованих по периметру. Обертальний рух валу викликає зміни у відбитті або проходженні світлового потоку через маркери, що трансформується в електричні сигнали.

Вихідна інформація таких перетворювачів включає високоточний кодований та тактовий сигнали. Кодована складова представляється у цифровому форматі, де кожна мітка має унікальне значення. Тактова складова генерується при проходженні кожного маркера, відображаючи динаміку руху.

Абсолютні позиційні перетворювачі відрізняються здатністю безперервно надавати дані про точне положення об'єкта без необхідності повторного встановлення початкової позиції. Їх функціонування базується на зчитуванні унікальних позиційних кодів з оптичних маркерів на диску. При обертанні оптична система зчитує розташування маркерів, формуючи сигнал, що відповідає абсолютній позиції.[20]

Суттєвою перевагою абсолютних перетворювачів є збереження точної позиційної інформації при відключенні живлення чи зупинці системи. Це робить їх незамінними в системах, де критичними параметрами є точність та надійність вимірювань. Значне застосування такі пристрої знаходять у високоточних вимірювальних комплексах, забезпечуючи стабільні показники без потреби в повторному калібруванні.

## 1.8 Огляд та типи сервоприводів, які використовуються у вимірювальних системах.

Сервопривод – це система приводу, яка в широкому діапазоні регулювання швидкості забезпечує динамічні, високоточні процеси руху і реалізує їх хорошу повторюваність [22].

Вони є ключовим компонентом багатьох вимірювальних систем, забезпечуючи точний контроль положення, швидкості й зусилля. Залежно від конструктивних особливостей і сфери застосування, можна виділити кілька основних типів сервоприводів: електромеханічні гідравлічні та пневматичні сервоприводи, крокові двигуни, п'єзоелектричні приводи, комбіновані серводвигуни.



Рисунок 1.6 – Аналоговий та цифровий сервоприводи

Електромеханічні сервоприводи є основними компонентами сучасних вимірювальних систем, включаючи координатно-вимірювальні машини (КВМ). Їхнє основне завдання – перетворювати електричну енергію в механічний рух для точного позиціонування вимірювальної голівки або інших компонентів системи. У цій сфері вони використовуються через свою високу точність, надійність і можливість налаштування під конкретні вимоги.

Серед електромеханічних сервоприводів найбільш поширеними є приводи постійного і змінного струму. Приводи постійного струму характеризуються плавністю руху та високою точністю. Їхня конструкція включає двигун із щітковим або безщітковим виконанням, який працює у поєднанні з енкодерами для забезпечення зворотного зв'язку. Проте щіткові двигуни мають недоліки у вигляді зносу щіток, що потребує регулярного технічного обслуговування. Безщіткові моделі позбавлені цього недоліку, забезпечуючи довший термін служби й ефективнішу роботу, хоча вони й дорожчі.

Приводи змінного струму дедалі частіше використовуються в сучасних КВМ завдяки їхній універсальності та можливості роботи при високих навантаженнях. Вони можуть забезпечувати точне керування навіть на високих швидкостях. Серед них найчастіше використовують синхронні двигуни, що мають стабільну роботу та тривалий термін експлуатації. Хоча такі системи складніші у керуванні й дорожчі, вони повністю компенсують ці недоліки своєю продуктивністю.

Дослідження безщіткових двигунів, які можуть бути використані в сервоприводах, були розпочаті з середини 70-х років. На противагу звичайної компоновки двигуна постійного струму розробники прийшли до перспективного нового рішення: якір на статорі, поле збудження на роторі. Так з'явилися безщіткові двигуни постійного струму, або двигуни з електронною комутацією [22]. Безщіткові серводвигуни є інноваційним рішенням у сфері вимірювальної техніки. Завдяки електронному комутуванню вони працюють плавно та ефективно, що робить їх ідеальним вибором для високоточних КВМ. Такі двигуни забезпечують стабільність роботи без необхідності технічного обслуговування, що дозволяє використовувати їх у тривалих автоматизованих процесах.

Електромеханічні серводвигуни мають кілька ключових переваг, які роблять їх оптимальним вибором для КВМ. Вони дозволяють точно позиціонувати вимірювальні голівки, забезпечують високу швидкість вимірювань і легко інтегруються з програмним забезпеченням для автоматизації процесів. До того ж ці приводи забезпечують стабільність роботи навіть за умов високих навантажень, що робить їх незамінними в сучасному виробництві.

Вибір між різними типами електромеханічних приводів залежить від конкретних вимог системи. Якщо потрібна максимальна точність за мінімальних витрат, зазвичай використовують DC-сервоприводи. Для завдань із високими навантаженнями або вимогами до швидкості кращими є AC-приводи або безщіткові моделі.

Таким чином, електромеханічні серводвигуни є основою високоточної роботи КВМ. Вони забезпечують гнучкість, надійність і можливість адаптації системи до потреб конкретного виробничого процесу. Це робить їх незамінними для задач, де важливі точність і швидкість вимірювань.

Крокові двигуни широко використовуються в координатно-вимірювальних машинах через їхню здатність забезпечувати точне позиціонування без потреби в складній системі зворотного зв'язку. Вони функціонують на основі принципу поетапного обертання ротора: кожен поданий імпульс живлення переміщує ротор на певний фіксований кут. Завдяки цій властивості такі двигуни чудово підходять для задач, де потрібно контролювати рух із високою точністю.



Рисунок 1.7 – Кроковий двигун

Основною перевагою крокових двигунів є їхня здатність виконувати рух без сенсорного зворотного зв'язку, що спрощує конструкцію вимірювальної системи. Крокові двигуни працюють у відкритому контурі управління, де положення обчислюється шляхом підрахунку імпульсів, а кожен імпульс відповідає точному куту повороту. Ця особливість робить їх особливо ефективними в умовах, коли навантаження стабільне, а система потребує надійного позиціонування.

Типи крокових двигунів включають:

- Біполярні двигуни, які мають дві фази й забезпечують більшу потужність завдяки повному використанню обмоток. Вони є популярним вибором для більшості сучасних КВМ завдяки їх високій ефективності.
- Уніполярні двигуни, які відрізняються простотою керування, проте мають нижчу продуктивність порівняно з біполярними.

Крокові двигуни забезпечують високу точність позиціонування, яка може досягати мікронного рівня, залежно від конструкції двигуна та використаного механічного редуктора. Швидкість обертання регулюється частотою подачі імпульсів, що дозволяє налаштовувати системи для роботи з різними вимогами до швидкості й точності. Основними перевагами крокових двигунів у вимірювальних системах є: простота управління, тобто немає потреби в складному зворотному зв'язку також це точність, вони забезпечують фіксовану кількість кроків на оберт, що гарантує стабільне позиціонування, і надійність в них відсутні складні електронні компоненти зворотного зв'язку, що зменшує ризик несправностей.

Недоліком є обмеження крутного моменту на високих швидкостях і ризик втрати кроків у разі перевантаження. Для уникнення цих проблем у сучасних КВМ часто застосовують механізми компенсації або поєднують крокові двигуни з сенсорами для забезпечення точнішого контролю.

У сучасних координатно-вимірювальних машинах крокові двигуни зазвичай використовуються в бюджетних системах або в додаткових механізмах, таких як

регулювання допоміжних вузлів. Вони є оптимальним вибором для задач із середніми вимогами до швидкості й високими вимогами до позиціонування.

Таким чином, крокові двигуни залишаються важливим компонентом вимірювальних систем завдяки їхній простоті, доступності та надійності. Їх використання в КВМ сприяє створенню систем із передбачуваними характеристиками та високою точністю, що є критично важливим для забезпечення якості виробництва.

П'єзоелектричні приводи це високоточні механізми, які використовуються у спеціалізованих системах, де потрібна нанометрична точність. Наприклад, вони застосовуються в оптичних приладах і мікроскопах. Основною перевагою є надзвичайна точність і стабільність, але такі приводи мають високу вартість і обмежену зону дії.

Гідравлічні та пневматичні сервоприводи забезпечують високу потужність і використовуються здебільшого у важкому машинобудуванні. У вимірювальних системах вони менш поширені через складність у забезпеченні точності та стабільності руху.

Комбіновані серводвигуни поєднують властивості крокових двигунів і датчиків зворотного зв'язку, що дозволяє досягати більшої точності. Вони ефективні для завдань, де важливе поєднання високої точності й помірної вартості.

При розробці сервоприводної голівки для координатно-вимірювальної машини варто зосередитися на електромеханічних приводах змінного струму або крокових двигунах. Перші підходять для високопродуктивних систем із великим робочим діапазоном, а другі — для більш компактних пристроїв із помірними вимогами до швидкості.

У вимірювальних системах вибір типу сервопривода залежить від таких факторів, як:

- точність позиціонування;
- швидкість обертання;
- вантажопідйомність конструкції;

- умови експлуатації;
- вартість системи.

## 1.9 Принципи роботи та особливості застосування сервоприводів

Сервоприводи є невід'ємною частиною сучасних вимірювальних систем, зокрема координатно-вимірювальних машин, завдяки їх здатності забезпечувати точний і стабільний рух компонентів. Принцип їх роботи базується на перетворенні електричних сигналів у механічний рух, що дозволяє точно позиціонувати вимірювальні елементи у просторі. Ця функція є критично важливою для забезпечення високої точності вимірювань, яка вимагається у виробничих і дослідницьких процесах.

Сервоприводи працюють у замкнутій системі управління, яка включає двигун, підсилювач, контролер та датчики зворотного зв'язку. Контролер генерує команди для двигуна, а датчики передають інформацію про поточне положення чи швидкість, дозволяючи системі коригувати рух у режимі реального часу. Такий підхід забезпечує високу точність, навіть якщо навантаження чи інші параметри системи змінюються.

Зворотний зв'язок це ключовий елемент, що дозволяє системі порівнювати задане положення або швидкість із фактичними значеннями. Датчики, такі як енкодери чи лінійні шкали, забезпечують точне вимірювання цих параметрів.

Пропорційно-інтегрально-диференціальне управління: контролер використовує алгоритми ПІД для точного налаштування швидкості та положення двигуна, враховуючи похибки, які можуть виникнути.

Модульність: сучасні сервоприводи зазвичай є модульними, що дозволяє їх легко інтегрувати в різні системи.

У вимірювальних системах сервоприводи використовуються для забезпечення точного руху вимірювальної голівки чи інших компонентів, що взаємодіють із деталлю. Основними завданнями є: забезпечення точного встановлення вимірювальної голівки у тривимірному просторі. Рух повинен бути плавним і без

вібрацій, щоб уникнути похибок у вимірюваннях. Система повинна забезпечувати високу швидкість позиціонування без втрати точності.

Головним викликом при використанні сервоприводів у вимірювальних системах є забезпечення стабільної роботи при високих швидкостях руху. Крім того, точність залежить від налаштування системи управління та вибору відповідного датчика зворотного зв'язку. Ще одним обмеженням є вплив зовнішніх факторів, таких як вібрації чи температурні зміни, які можуть викликати похибки у вимірюваннях.

Сервоприводи забезпечують високу точність, стабільність та адаптивність у роботі вимірювальних систем. Вони підтримують багатовимірний рух, швидке реагування на зміну положення та збереження продуктивності навіть у складних умовах. Їх інтеграція з програмним забезпеченням дозволяє створювати автоматизовані системи, що відповідають сучасним вимогам до точності й ефективності у виробництві та контролі якості.

Таким чином, використання сервоприводів у вимірювальних системах є не лише важливою складовою їхньої роботи, але й основою для створення нових інноваційних рішень у галузі точних вимірювань.

### **1.10 Класифікація поворотних голівок КВМ**

Поворотні голівки є важливим елементом координатно-вимірювальних машин, які забезпечують можливість зміни положення вимірювального датчика у просторі. Це дає змогу виконувати контроль важкодоступних зон та проводити вимірювання складних геометричних об'єктів. Залежно від способу управління та конструктивних особливостей, поворотні голівки можна класифікувати на моторизовані, фіксовані та сервоприводні.

Моторизовані поворотні голівки забезпечують автоматичне позиціонування датчика завдяки вбудованим приводам. Вони здатні обертатися навколо однієї або кількох осей, керуючись командами від програмного забезпечення КВМ. Це дозволяє



швидко та точно змінювати положення датчика, що є надзвичайно важливим при автоматизованих вимірюваннях складних деталей. Їх основною перевагою є висока точність та швидкість роботи, однак це досягається за рахунок складності конструкції та високої вартості.

Фіксовані голівки дозволяють встановлювати датчик під різними кутами, проте зміна положення виконується вручну або з використанням простих механічних механізмів. Вони характеризуються простотою конструкції та низькою вартістю, але мають обмежену гнучкість. Такий тип голівок використовується у задачах, де зміна положення датчика потрібна рідко, наприклад, для стандартних вимірювань простих деталей.

Сервоприводні голівки є найбільш сучасними та високоточними. Завдяки використанню сервоприводів вони забезпечують плавний і точний рух із можливістю позиціонування під будь-яким кутом. Основною перевагою таких голівок є висока точність, досягнута за рахунок використання системи зворотного зв'язку, яка коригує положення датчика у режимі реального часу. Сервоприводні голівки особливо ефективні у високоточних системах, де потрібне складне і багатоосьове позиціонування датчика.

Тип голівки	Точність	Гнучкість	Швидкість	Складність конструкції	Вартість
Моторизована	Висока	Висока	Висока	Складна	Висока
Фіксована	Середня	Низька	Висока	Проста	Низька
Сервоприводна	Дуже висока	Дуже висока	Висока	Дуже складна	Дуже висока

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз поворотних голівок КВМ

Кожен тип поворотної голівки має свої переваги та недоліки, що визначаються умовами експлуатації, вимогами до точності вимірювань та бюджетними

обмеженнями. Для простих задач фіксовані голівки залишаються практичним рішенням, тоді як для автоматизованих процесів і складних вимірювальних операцій перевага надається моторизованим або сервоприводним голівкам. Таким чином, розвиток конструкцій поворотних голівок, особливо сервоприводних, є перспективним напрямом, що дозволяє значно підвищити ефективність та точність вимірювань у сучасних КВМ.

### **1.11 Особливості конструкцій для двовісних і тривісних поворотів**

Поворотні голівки для координатно-вимірювальних машин (КВМ) можуть бути оснащені різною кількістю осей обертання, що визначає їх конструкцію та можливості для вимірювання. У залежності від цього розрізняють двовісні та тривісні поворотні голівки. Кожен тип має свої переваги та обмеження.

Двовісні поворотні голівки мають два механізми обертання, що дозволяють змінювати положення вимірювального датчика в двох напрямках — горизонтальному і вертикальному. Ці голівки прості в конструкції і використовуються для вимірювань стандартних деталей, де немає потреби в складних рухах датчика. Вони дешевші в порівнянні з тривісними системами, але і менш універсальні. Поворотні голівки з двома осями можуть використовуватися там, де потрібне вимірювання деталей з обмеженою геометрією, і зміна положення датчика не потребує більше ніж двох площин.

Тривісні поворотні голівки, на відміну від двовісних, мають три осі обертання, що дає можливість здійснювати рух головки в трьох напрямках. Це дозволяє проводити вимірювання більш складних об'єктів, що мають тривимірну геометрію. Тривісні голівки здатні забезпечити більш точне позиціонування датчика і застосовуються в ситуаціях, коли потрібно вимірювати деталі з нерегулярними або складними формами. Така конструкція дозволяє досягти високої точності при вимірюванні складних об'єктів, однак вона є дорожчою і складнішою в конструкції, що вимагає більше компонентів та більшої кількості механізмів для забезпечення руху.

Обидва типи голівок мають свої плюси і мінуси. Двовісні голівки простіші в обслуговуванні і дешевші, тому їх використовують для стандартних завдань. Тривісні ж голівки, хоча й дорожчі, дозволяють більш точно вимірювати складні деталі і дають більшу гнучкість у роботі, тому вони є оптимальним варіантом для складних вимірювань.

Характеристика	Двовісна поворотна голівка	Тривісна поворотна голівка
Кількість осей обертання	2	3
Можливості позиціонування	Обмежене переміщення в двох площинах	Повна свобода руху в трьох площинах
Складність конструкції	Простий механізм, менше деталей	Складніший механізм, більше деталей
Вартість	Нижча	Вища
Точність	Висока, але менша ніж у тривісних системах	Дуже висока, з більшим контролем за рухом
Застосування	Стандартні вимірювання	Складні, високоточні вимірювання

Таблиця 1.2 – Порівняння двовісних і тривісних поворотних голівок

Вибір між двовісною та тривісною поворотною голівкою залежить від того, що саме потрібно виміряти. Для простих деталей, де достатньо двох осей для зміщення датчика, цілком підходить двовісна голівка. Для складніших задач, де потрібно точне вимірювання в різних площинах, тривісна голівка буде більш ефективною.

## ВИСНОВКИ ТЕОРЕТИЧНОГО РОЗДІЛУ

У теоретичному розділі роботи було проведено дослідження та аналіз основних аспектів контролю геометричних параметрів виробів за допомогою координатно-вимірювальних машин (КВМ). Окрему увагу приділено характеристикам сервоприводів, які є ключовими елементами в роботі КВМ, а також їх впливу на точність вимірювань. Розглянуті різні типи сервоприводів, зокрема електромеханічні сервоприводи та крокові двигуни, їхні принципи роботи та особливості застосування у вимірювальних системах. Визначено, що правильний вибір сервоприводу має значний вплив на точність і стабільність вимірювань, оскільки від цього залежить точність позиціонування вимірювальних головок.

Було розглянуто геометричні параметри виробів, які підлягають контролю, такі як розміри, форма, положення та інші характеристики. Важливість вимірювання цих параметрів полягає у забезпеченні відповідності виробів вимогам якості та специфікаціям.

Був проведений огляд систем контролю геометричних параметрів виробів, де було розглянуто різні підходи та методики, які використовуються для вимірювання та контролю цих параметрів. Описано принципи вимірювання, а також відповідні датчики, які застосовуються в КВМ. Розглянуто різні типи датчиків, їхні принципи роботи та особливості застосування.

Також було детально розглянуто координатно-вимірювальні машини (КВМ) як основні пристрої для виконання вимірювань. Визначено їхню роль у забезпеченні точності та повторюваності вимірювань. Описано поширені типи КВМ, такі як горизонтальні, вертикальні та порталні машини, та їхні особливості.

Окрема увага приділена голівкам координатно-вимірювальних машин, які є ключовими елементами системи вимірювань. Були розглянуті різні типи голівок, їхні можливості та особливості застосування. Описано датчики, які використовуються в голівках КВМ для вимірювань, із вказівкою на їхні принципи роботи та переваги.

Також було здійснено огляд конструкцій поворотних голівок для КВМ, що дозволяє краще зрозуміти, як забезпечити високу гнучкість і точність вимірювань. Зокрема, розглянуті двовісні та тривісні поворотні голівки, їх конструктивні особливості, переваги та обмеження. Визначено, що тривісні голівки забезпечують більшу універсальність і точність у вимірюваннях складних тривимірних об'єктів, тоді як двовісні є більш простими і підходять для вимірювання стандартних деталей з менш складною геометрією.

Проведений огляд показав, що технології у сфері сервоприводів та поворотних голівок для КВМ постійно розвиваються, що відкриває нові можливості для підвищення точності та ефективності вимірювальних систем. Важливим аспектом є правильний вибір компонентів та їх інтеграція в загальну систему, що дозволяє значно покращити продуктивність і точність вимірювань.

Загалом, у теоретичному розділі зроблено висновок, що для досягнення високої точності та ефективності в системах координатно-вимірювальних машин важливо не лише правильно вибирати датчики та голівки, але й враховувати характеристики сервоприводів, оскільки вони безпосередньо впливають на точність позиціонування та загальну стабільність роботи системи.

## 2. ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Сервопривід

Сервопривід представляє собою спеціалізований тип електричного двигуна, розроблений для забезпечення високоточного позиціонування та керування рухом механічних систем. Ключовою особливістю сервоприводу є інтегрована система керування із замкненим зворотним зв'язком, яка постійно відстежує положення вала двигуна, що дозволяє досягати винятково точного контролю над рухом.

Особливу увагу варто приділити сервоприводам постійного струму (рис. 2.1), які знаходять широке застосування в сучасних системах автоматизації. Ці пристрої перетворюють вхідний постійний струм у механічний рух, забезпечуючи прецизійний контроль положення, швидкості та прискорення. Їхня здатність до точного позиціонування та швидкого реагування робить їх незамінними компонентами в верстатах з числовим програмним керуванням, комп'ютерних системах та інших високоточних механізмах, де критичною є здатність здійснювати точні переміщення з мінімальною затримкою.

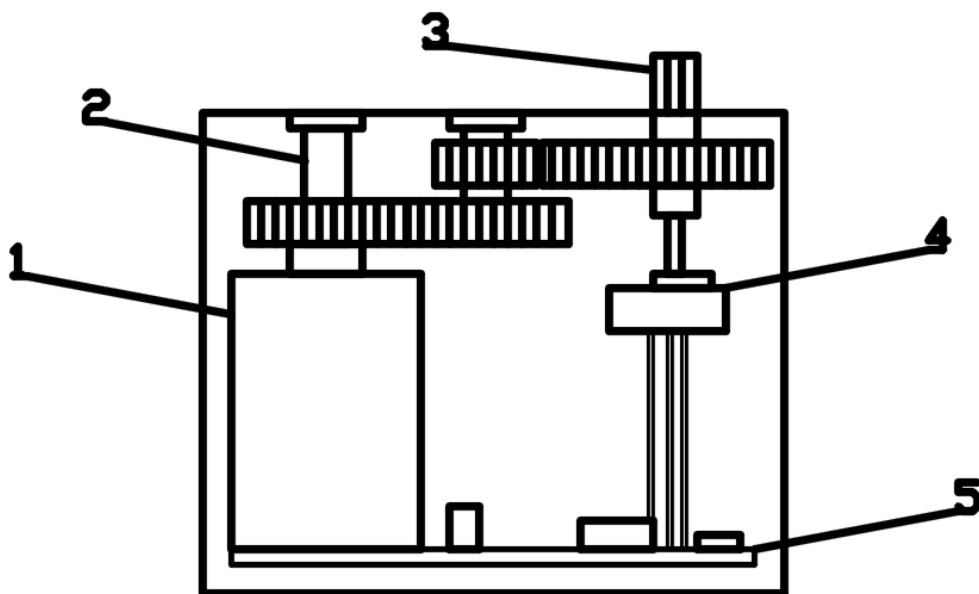


Рисунок 2.1 – Сервопривід постійного струму, керований потенціометром

Конструкція складається з кількох основних компонентів, які працюють разом для забезпечення точного позиціонування.

У верхній частині корпусу розташований вихідний вал (3), який є кінцевим елементом механізму та забезпечує безпосереднє передавання руху на зовнішні компоненти. Під валом знаходиться редуктор (2) - система зубчастих коліс різного діаметру, яка відповідає за перетворення високої швидкості обертання двигуна на більш повільний, але потужніший рух вихідного вала.

Центральне місце в конструкції займає двигун (1) постійного струму, який є джерелом механічної енергії для всієї системи. Поруч з двигуном розташований потенціометр (4), який виконує функцію датчика положення, перетворюючи механічне переміщення вала в електричний сигнал зворотного зв'язку.

У нижній частині корпусу встановлена керуюча плата (5), яка містить електронні компоненти для обробки вхідних сигналів та керування роботою двигуна на основі даних, отриманих від потенціометра. Ця система забезпечує точне позиціонування вихідного вала відповідно до керуючих команд.

Всі компоненти розміщені в компактному корпусі, що забезпечує їх захист та правильне взаємне розташування для ефективної роботи сервопривода.

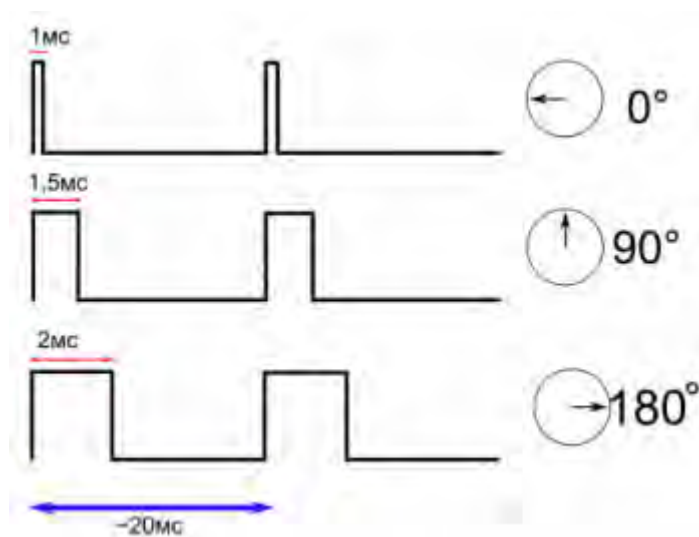


Рисунок 2.2 – Керуючі сигнали

Керування сервоприводом здійснюється через подачу прямокутних імпульсів на його сигнальний вивід з частотою приблизно 50 Гц. Амплітуда цих імпульсів повинна становити не менше 3.3В (хоча зазвичай використовується не менше 4.8В). Ширина імпульсів зазвичай варіюється в межах від 1000 до 2000 мкс, що відповідає стандартним крайнім положенням сервопривода. В реальних умовах експлуатації цей діапазон може бути дещо ширшим (наприклад, від 900 до 2100 мкс), проте конкретні значення залежать від виробника сервопривода.

На рисунку 2.2 показано керуючі сигнали, де демонструється залежність положення сервопривода від тривалості імпульсу: при тривалості 1 мс вал встановлюється в положення 0°, при 1.5 мс - в положення 90°, а при 2 мс - в положення 180°. Період слідування імпульсів становить 20 мс.

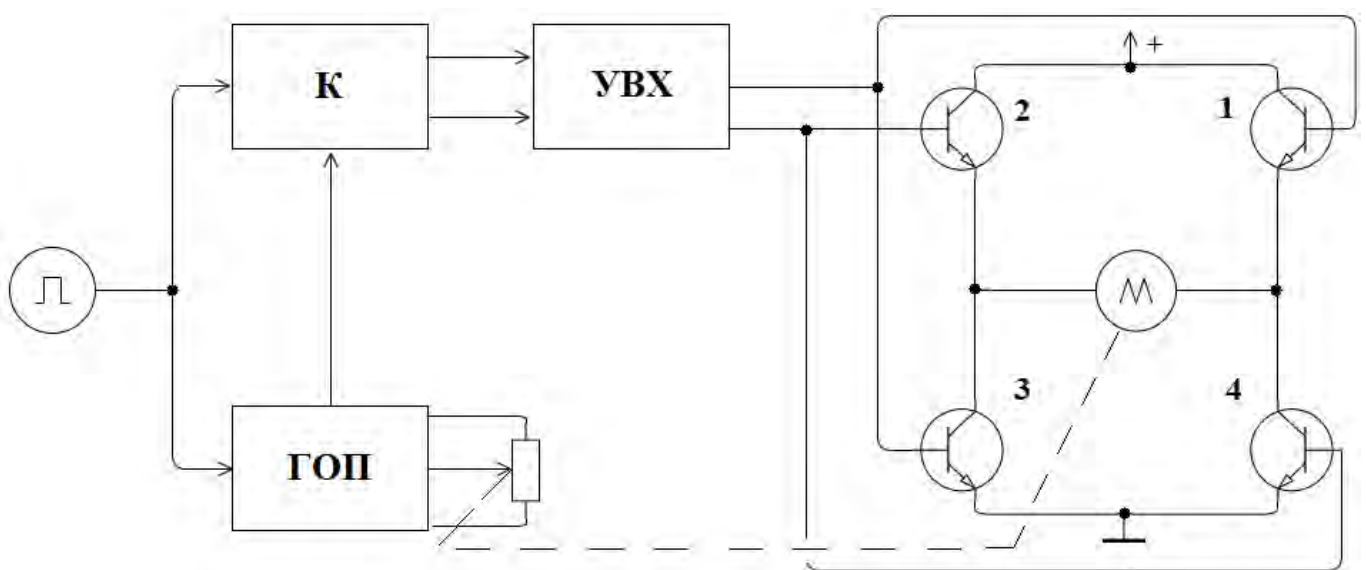


Рисунок 2.3 – Принципова схема керування сервоприводом

На представленій схемі (рис. 2.3) зображено принципову схему керування сервоприводом. Схема демонструє взаємодію основних функціональних блоків та принцип роботи системи позиціонування.



На вхід системи подається імпульсний сигнал, який одночасно надходить на два блоки: компаратор (К) та генератор опорної напруги (ГОП). Генератор опорної напруги працює в парі з потенціометром, який забезпечує зворотний зв'язок від механічної частини системи.

Компаратор виконує порівняння вхідного керуючого сигналу з сигналом зворотного зв'язку від ГОП. Результат порівняння передається на пристрій вибірки-зберігання (УВХ), який утримує цей сигнал для подальшої обробки.

У правій частині схеми розташований силовий міст, що складається з чотирьох транзисторів (позначені цифрами 1 - 4). В діагоналі моста встановлено електродвигун (М). Така конфігурація дозволяє керувати напрямком обертання двигуна залежно від того, які транзистори відкриті в конкретний момент часу.

Пунктирна лінія на схемі відображає механічний зв'язок між валом двигуна та потенціометром, що забезпечує зворотний зв'язок для точного позиціонування. Ця система зворотного зв'язку є ключовим елементом, що забезпечує високу точність роботи сервоприводу.



Рисунок 2.4 – Функціональна-структурна схема сервопривода

Функціональна структура сервопривода (рис 2.4), яка демонструє взаємодію основних компонентів системи керування положенням.

Схема починається з блоку "Ширина імпульсу в частотному перетворювачі", який генерує вхідний сигнал  $\varphi_r$ . Цей сигнал подається на суматор, де він порівнюється з сигналом зворотного зв'язку  $\varphi$  від потенціометра. Результатом цього

порівняння є сигнал помилки  $\varepsilon$ , який обчислюється як різниця між заданим та фактичним положенням ( $\varepsilon = \varphi_r - \varphi$ ).

Сигнал помилки надходить до регулятора-перетворювача, який трансформує його в керуючу напругу  $U$ . Ця напруга подається на двигун, який перетворює електричну енергію в механічний рух з кутовою швидкістю  $\omega_{дв}$ .

Механічний рух від двигуна передається через редуктор, який оптимізує параметри руху (швидкість обертання  $\omega_{вих}$  та момент  $M_{вих}$ ) відповідно до вимог навантаження. Навантаження представляє собою зовнішній механічний елемент, з яким взаємодіє сервопривід.

Потенціометр, встановлений у системі, виконує функцію датчика положення, вимірюючи фактичний кут повороту  $\varphi$  та передаючи цю інформацію назад на суматор, замикаючи таким чином контур керування. Це забезпечує постійне коригування положення системи для досягнення заданого кута повороту.

Пунктирна лінія на схемі чітко окреслює межі власне сервопривода, відділяючи його внутрішні компоненти від зовнішнього навантаження. Така структура забезпечує високу точність позиціонування та стабільність роботи системи завдяки ефективному зворотному зв'язку.

## **2.2 Кінематичний розрахунок приводу для горизонтального повороту голівки КВМ**

У даному розділі виконується розрахунок приводу для горизонтального повороту головки координатно-вимірювальної машини (КВМ). Цей механізм забезпечує необхідну точність і плавність руху головки при її обертанні навколо горизонтальної осі. Розрахунок включає вибір серводвигуна, визначення передаточного відношення редуктора. Враховано умови роботи головки, масу її елементів, а також особливості кінематичних і динамічних характеристик.

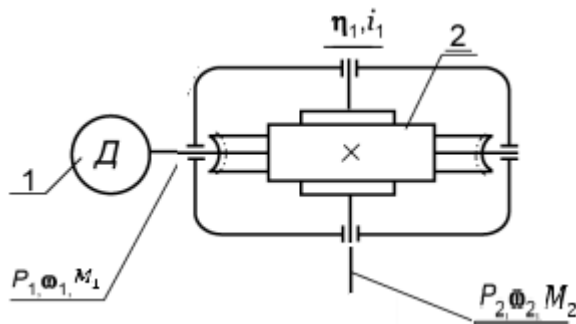


Рисунок 2.5 – Кінематична схема одноступінчастого черв'ячного редуктора

Для кінематичного розрахунку приводу беремо серводвигун Mitsubishi Electric HG-MR053. Серводвигун Mitsubishi Electric HG-MR053 належить до серії HG-MR, що відома своєю високою продуктивністю, компактними розмірами і широким застосуванням в промисловій автоматизації. Нижче наведено основні характеристики цього двигуна.

Номінальна потужність, кВт	Номінальний обертальний момент, Н·м	Піковий обертальний момент, Н·м	Номінальна швидкість, об/хв	Максимальна швидкість, об/хв	Напруга живлення, В AC
0,05	0,16	0,48	3000	6000	200

Таблиця 2.1 – Основні характеристики серводвигуна Mitsubishi Electric HG-MR053

Вибираємо ККД передач, що входять у привід. Прийняти значення коефіцієнтів корисної дії:

Підшипники кочення  $\mu_{п.к.} = 0,99$

Черв'ячної передачі  $\mu_{ч.к.} = 0,98$

Якщо поворот на  $360^\circ$  має виконуватися за 5 секунд, необхідна швидкість обертання вихідного вала  $n_2$ :

$$n_2 = \frac{\alpha}{t}$$

$$n_2 = \frac{360^\circ}{5} = 72 \text{ об/хв}$$

Загальне передаточне число ( $i$ ): Для двигуна Mitsubishi HG-MR053, де максимальна швидкість обертання пдв =  $n_1 = 3000$  об/хв, передаточне число:

$$i = i_p = \frac{n_1}{n_2}$$

$$i = i_p = \frac{3000}{72} \approx 41,7$$

Кутова швидкість на валу двигуна

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_1 = \omega_{\text{вх}} = \frac{2\pi n_1}{60}$$

$$\omega_1 = \frac{3,14 * 3000}{30} = 314,16 \text{ рад/с}$$

Кутова швидкість на веденому валу черв'ячного редуктора

$$\omega_2 = \omega_{\text{вих}} = \frac{\omega_1}{i_{1-2}} = \frac{\omega_1}{i_p}$$

$$\omega_2 = \frac{314,16}{41,7} = 7,53 \text{ рад/с}$$

Перевірка передаточного числа приводу

$$i_{\text{пр}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega_{\text{ВХ}}}{\omega_{\text{ВИХ}}}$$

$$i_{\text{пр}} = \frac{314,16}{7,53} = 41,7$$

Коефіцієнт корисної дії приводу

$$\mu = \mu_{1-2} = \mu_p = \mu_{\text{ч.п.}} \mu_{\text{п.к.}}^2$$

$$\mu = 0,8 * 0,99^2 = 0,78$$

Обертаючий момент на валу двигуна

$$M_{\text{дв}} = M_1 = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{P_1}{\omega_1}$$

$$M_{\text{дв}} = \frac{50}{314,16} = 0,15 \text{ Нм}$$

Обертаючий момент на веденому валу черв'ячного колеса редуктора

$$M_2 = M_1 \mu_{1-2} i_{1-2} = M_1 \mu_p i_p$$

$$M_2 = 0,15 * 0,78 * 41,7 = 4,87 \text{ Нм}$$

Результати кінематичного розрахунку приводу зводимо в таблицю 2.2.

Ступінь	Вал	Частота оберту $n$ , об/хв.	Кутова швидкість $\omega$ , рад/с	Момент $M$ , Нм
$i_{1-2}$ Редуктор	1	3000	314,16	0,15
	2	72	7,53	4,87

Таблиця 2.2 – Результати кінематичного розрахунку привода

Далі проводимо геометричний розрахунок архімедового черв'яка рис. 2.6. Геометричний розрахунок архімедового черв'яка базується на визначенні основних параметрів, необхідних для його проектування, таких як модуль, число витків, кут нахилу гвинтової лінії, діаметри черв'яка та черв'ячного колеса.

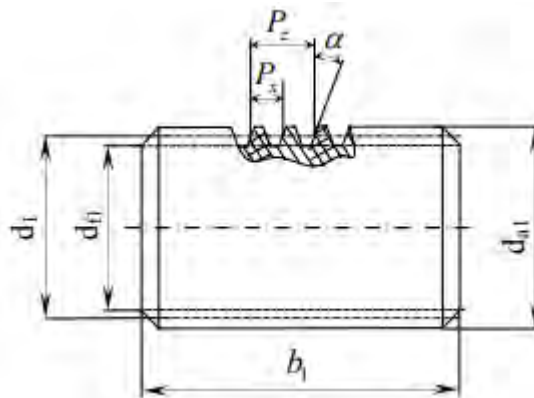


Рисунок 2.6 – Архімедовий черв'як

В осьовому перерізі бічні поверхні витка прямолінійні з кутом профілю  $\alpha = 20$  градусів. Для головки КВМ, де важлива компактність і плавність, двоходовий черв'як може бути кращим варіантом, якщо передаточне число дозволяє. Це забезпечить плавніший хід і допоможе уникнути надмірного самогальмування. Для досягнення хорошого балансу між габаритами та ефективністю, оптимальним числом зубців колеса буде  $z_2 = 20$ .

Число витків черв'яка приймаємо  $z_1 = 2$ .

Оскільки редуктор для головки координатно-вимірювальної машини (КВМ) повинен бути компактним, оптимальним вибором може бути модуль  $m = 0,75$  мм. Ці значення є типовими для мікропередач, які забезпечують невеликі розміри зубів і знижують загальні габарити передачі.

Осьовий крок  $P_x$  – це один із важливих параметрів у черв'ячній передачі, який визначає відстань між двома сусідніми витками черв'яка, виміряну вздовж його осі. Така ж відстань між суміжними профілями одного і того ж витка називається ходом гвинтової лінії витка  $P_z$ .

$$P_x = \pi m; P_z = z_1 P_x$$

$$P_x = 3,14 * 0,75 = 2,355 \text{ мм};$$

$$P_z = 2 * 2,355 = 4,71 \text{ мм}$$

Ділильний діаметр черв'яка:

$$d_1 = m q,$$

де  $q$  – коефіцієнт діаметра черв'яка приймаємо 5 (стандартна величина).

$$d_1 = 0,75 * 5 = 3,75 \text{ мм}$$

Ділильний кут підйому витка  $\gamma$ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P_z}{\pi d_1} = \frac{z_1 \pi m}{\pi d_1} = \frac{z_1}{q}$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2}{5} = 0,4$$

$$\gamma = 20^\circ$$

Висота головки витка  $h_{a1}$ :

$$h_{a1} = m$$

$$h_{a1} = 0,75$$

Висота ніжки витка  $h_{f1}$ :

$$h_{f1} = 1,2m$$

$$h_{f1} = 1,2 * 0,75 = 0,9 \text{ мм}$$

Діаметри вершин витка  $d_{a1}$ :

$$d_{a1} = d_1 + 2m$$

$$d_{a1} = 3,75 + 2 * 0,75 = 5,25 \text{ мм}$$

Діаметри впадин витка  $d_{f1}$ :

$$d_{f1} = d_1 - 2,4m$$

$$d_{f1} = 3,75 - 2,4 * 0,75 = 1,95 \text{ мм}$$

Довжина нарізаної частини черв'яка  $b_1$ :

$$b_1 = (11 + 0,06z_2)m$$

$$b_1 = (11 + 0,06 * 20) * 0,75 = 9,15 \text{ мм}$$

Геометричний розрахунок черв'ячного колеса визначає основні параметри колеса, яке взаємодіє з черв'яком у черв'ячній передачі. Основні розрахунки стосуються діаметрів, кроків, ширини зубців та кількості зубців. Ось покроковий підхід:



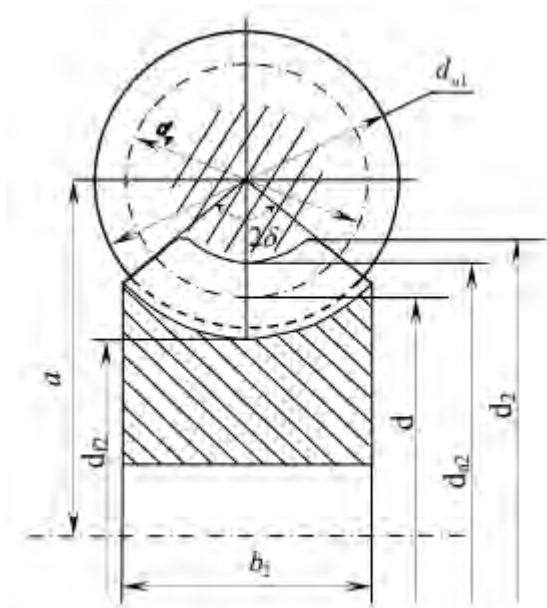


Рисунок 2.7 – Черв’ячне колесо

Ділильний діаметр  $d_2$ :

$$d_2 = mz_2$$

$$d_2 = 0,75 * 20 = 15 \text{ мм}$$

Діаметр вершин зубців  $d_{a2}$ :

$$d_{a2} = d_2 + 2m$$

$$d_{a2} = 15 + 2 * 0,75 = 16,5 \text{ мм}$$

Діаметр впадин  $d_{f2}$ :

$$d_{f2} = d_2 - 2,4m$$

$$d_{f2} = 15 - 2,4 * 0,75 = 13,2 \text{ мм}$$

Максимальний зовнішній діаметр  $d_{am2}$ :

$$d_{am2} \leq d_{a2} + 1,5m$$

$$d_{am2} = 16,5 + 1,5 * 0,75 = 17,625 \text{ мм}$$

Ширина зубчастого вінця  $b_2$ :

$$b_2 \leq 0,75d_{a1}$$

$$b_2 = 0,75 * 5,25 = 3,9375 \text{ мм}$$

Міжосьова відстань  $a_w$ :

$$a_w = 0,5(d_2 + d_1)$$

$$a_w = 0,5 * (3,75 + 15) = 9,375 \text{ мм}$$

Далі проводимо розрахунок вала-черв'яка на міцність і жорсткість. Для цього нам потрібно розрахувати навантаження на черв'яку.

Колова сила на черв'яку  $F_{t1}$ :

$$F_{t1} = \frac{2M_1}{d_1}$$

$$F_{t1} = \frac{2 * 0,15 * 10^3}{3,75} = 80 \text{ Н}$$

Осьова сила на черв'яку  $F_{a1}$ :

$$F_{a1} = \frac{2M_2}{d_2}$$

$$F_{a1} = \frac{2 * 4,87 * 10^3}{15} = 649 \text{ Н}$$

Радіальна сила на черв'яку  $F_{r1}$ :

$$F_{r1} = F_{a1} \operatorname{tg} 20^\circ$$

$$F_{r1} = 649 * \operatorname{tg} 20^\circ = 236 \text{ Н}$$

Приймаємо орієнтовано відстань між опорами 1 яка дорівнює зовнішньому діаметру колеса  $l = d_2 = 15 \text{ мм}$ . Отримуємо:

$L_1(\text{м}) - 7,5 * 10^{-3} \text{ м}$  – відстань від середини черв'яка до лівого підшипника;

$L_2(\text{м}) - 15 * 10^{-3} \text{ м}$  – відстань між підшипниками;

$L_3(\text{м}) - 5 * 10^{-3} \text{ м}$  – довжина консольної ділянки черв'яка.

Визначення опорних реакцій у вертикальній площині

$$\sum M_3 = 0$$

$$-R_{ya} * L_2 + F_{r1} * (L_2 - L_1) - F_{a1} * \frac{d_1}{2} = 0$$

$$-R_{ya} = \frac{F_{r1} * (L_2 - L_1) - F_{a1} * \frac{d_1}{2}}{L_2} = \frac{236 * (15 - 7,5) * 10^{-3} - 649 * \frac{3,75 * 10^{-3}}{2}}{15 * 10^{-3}} = 36,87 \text{ Н}$$

$$\sum M_1 = 0$$

$$R_{yb} * L_2 - F_{a1} * \frac{d_1}{2} - F_{r1} * L_1 = 0$$

$$R_{yb} = \frac{F_{a1} * \frac{d_1}{2} + F_{r1} * L_1}{L_2} = \frac{649 * \frac{3,75 * 10^{-3}}{2} + 236 * 7,5 * 10^{-3}}{15 * 10^{-3}} = 199,12 \text{ Н}$$

Перевірка:

$$\sum Y = 0$$

$$-R_{ya} + F_{r1} - R_{yb} = -36,87 + 236 - 199,12 = 0$$

Будуємо епюру згинальних моментів

$$M_{x1} = M_{x3} = 0$$

$$M_{x2} = -R_{ya} * L_1 = -36,87 * 7,5 * 10^{-3} = -0,27 \text{ Нм}$$

$$M_{x2} = -R_{yb} * (L_2 - L_1) = -199,12 * (15 - 7,5) * 10^{-3} = -1,49 \text{ Нм}$$

Тепер визначаємо опорні реакції у горизонтальній площині

$$\sum M_3 = 0$$

$$R_{xa} * L_2 + F_{t1} * (L_2 - L_1) - F_{a1} = 0$$

$$R_{xa} = \frac{-F_{t1} * (L_2 - L_1)}{L_2} = \frac{-80 * (15 - 7,5) * 10^{-3}}{15 * 10^{-3}} = -40 \text{ H}$$

$$\sum M_1 = 0$$

$$-R_{xb} * L_2 - F_{t1} * L_1 = 0$$

$$R_{xb} = \frac{-F_{t1} * L_1}{L_2} = \frac{-80 * 7,5 * 10^{-3}}{15 * 10^{-3}} = -40 \text{ H}$$

Перевірка:

$$\sum X = 0$$

$$R_{xa} + F_{t1} + R_{xb} = -40 + 80 + (-40) = 0$$

Будуємо епюру згинальних моментів

$$M_{y1} = M_{y3} = 0$$

$$M_{y2} = R_{xa} * L_1 = -40 * 7,5 * 10^{-3} = -0,3 \text{ Нм}$$

$$M_{y2} = R_{xb} * (L_2 - L_1) = -40 * (15 - 7,5) * 10^{-3} = -0,3 \text{ Нм}$$

Визначаємо сумарні реакції

$$R_A = \sqrt{R_{xa}^2 + R_{ya}^2} = \sqrt{40^2 + 36,87^2} = 54,40 \text{ H}$$

$$R_B = \sqrt{R_{xb}^2 + R_{yb}^2} = \sqrt{40^2 + 199,12^2} = 203,09 \text{ H}$$

Сумарний згинний момент в найбільш небезпечному січенні:

$$M_{\text{сум}} = \sqrt{M_{X2}^2 + M_{Y2}^2} = \sqrt{0,27^2 + 1,49^2} = 1,51 \text{ Нм}$$

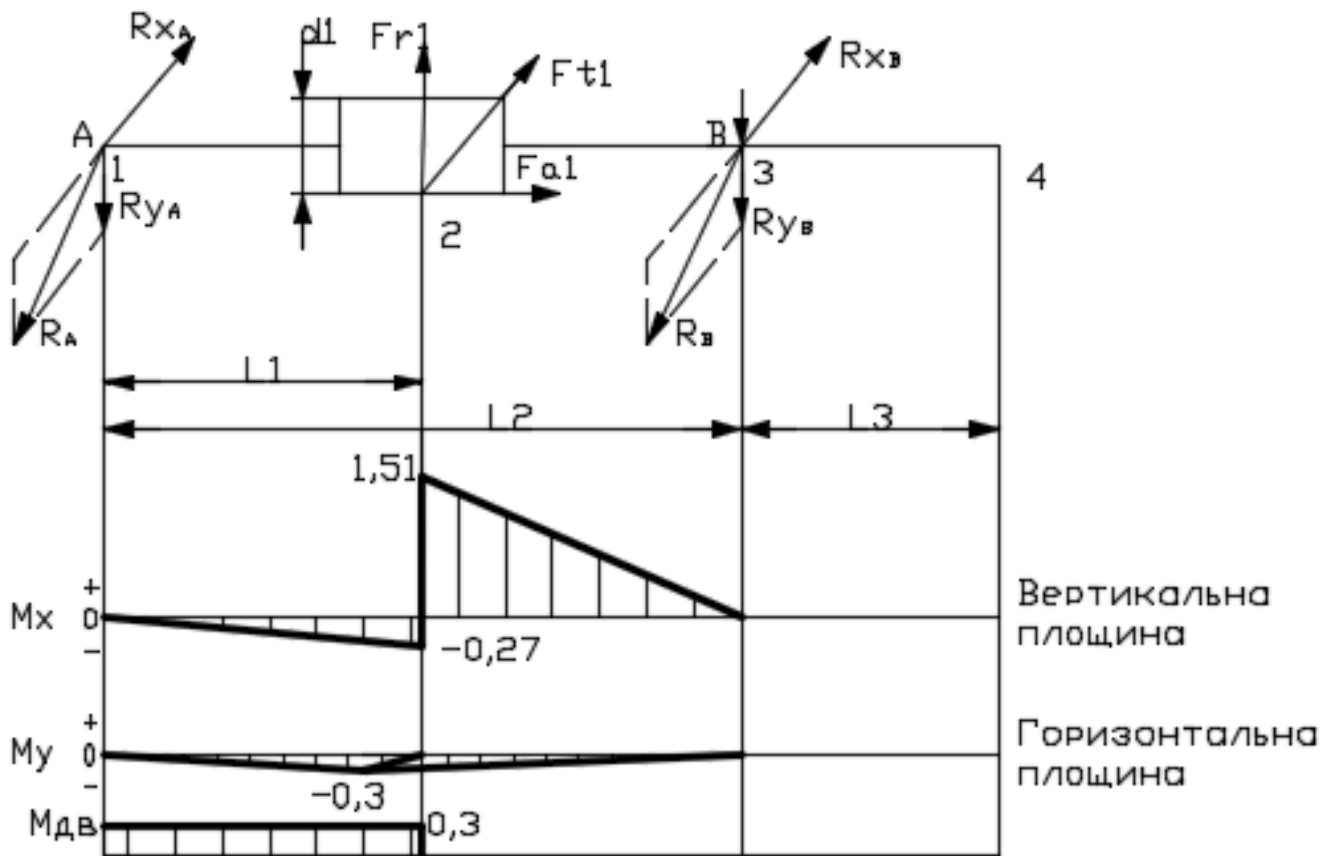


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема та епюри моментів черв'ячного вала

Визначасмо напруження згину:

$$\sigma_F = \frac{M_{\text{сум}}}{0,1(d_{f1})^3}$$

$$\sigma_F = \frac{1,51}{0,1 * 1,95^3} = 2,03 \text{ Мпа}$$

Напруження стискання:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{4F_{a1}}{\pi(d_{f1})^2}$$

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{4 * 649}{3,14 * 1,95^2} = 217,42 \text{ Мпа}$$

Напруження кручення:

$$\sigma_K = \frac{M_1}{0,2(d_{f1})^3}$$

$$\sigma_K = \frac{0,15}{0,2 * 1,95^3} = 0,101 \text{ Мпа}$$

Еквівалентне (зведене) напруження:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{(\sigma_F + \sigma_{\text{ст}})^2 + 3\sigma_K^2}$$

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{(2,03 + 217,42)^2 + 3 * 0,101^2} = 219,45 \text{ Мпа}$$

Умова міцності черв'яка:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma]_F$$

де  $[\sigma]_F$  – допустиме напруження для матеріалу черв'яка, Мпа. В нашому випадку для матеріалу Сталь 45  $[\sigma]_F = 260$  Мпа. Тобто умова виконується.

### 2.3 Кінематичний розрахунок приводу для вертикального повороту голівки КВМ

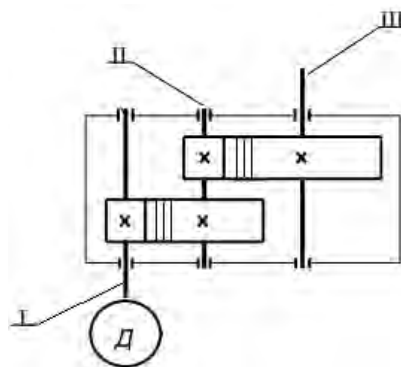


Рисунок 2.9 – Кінематична схема приводу

Потужність на веденому валу привода

$$P_B = M * \omega$$

M — момент на веденому валу (Н·м);

$\omega$  — кутова швидкість на веденому валу (рад/с).

Момент на веденому валу визначається за допомогою ваги стилуса та механічних характеристик системи:

$$M = F * r$$

F — сила (зазвичай обчислюється як  $F=m \cdot g$  де m — маса стилуса,  $g = 9.81$

r — відстань від осі обертання до точки прикладення сили (в метрах).

Маса стилуса  $m = 0.01$  кг (10 грамів), а відстань  $r=0.02$  м (20 мм)

Кутова швидкість обчислюється за формулою:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}$$

Де:

$\varphi$  — кут обертання (у радіанах,  $90^\circ = \pi/2$  рад);

t — час обертання (в секундах).

$$\omega = \frac{\pi/2}{6} = 0,262 \text{ рад/с}$$

Обчислення потужності  $P_B$

$$P_B = m \cdot g * r * \omega = 0,01 * 9,81 * 0,02 * 0,262 \approx 0,000514 \text{ Вт} = 0,514 \text{ мВт}$$

Частота обертання веденого вала привода

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

Де

$\omega$  — кутова швидкість веденого вала (рад/с);

n — частота обертання веденого вала (об/с);

$2\pi$  — коефіцієнт для переходу між радіанами та обертами.

$$n = \frac{0,262}{2\pi} \approx 0.0417 \text{ об/с} = 2.5 \text{ об/хв}$$

Загальний коефіцієнт корисної дії привода

$$\mu = \mu_3^2 \mu_0,^3$$

$\mu_3$  – коефіцієнт корисної дії зубчастої передачі, приймаємо 0,98;

$\mu_0$ , – коефіцієнт корисної дії опор, приймаємо 0,99;

$$\mu = 0,98^2 * 0,99^3 = 0,93$$

Потужність, яка потрібна на привод

$$P = \frac{P_B}{\mu} = \frac{0,514}{0,93} = 0,552 \text{ мВт}$$

Вибираємо двигун від мікросервоприводу Tower Pro SG90

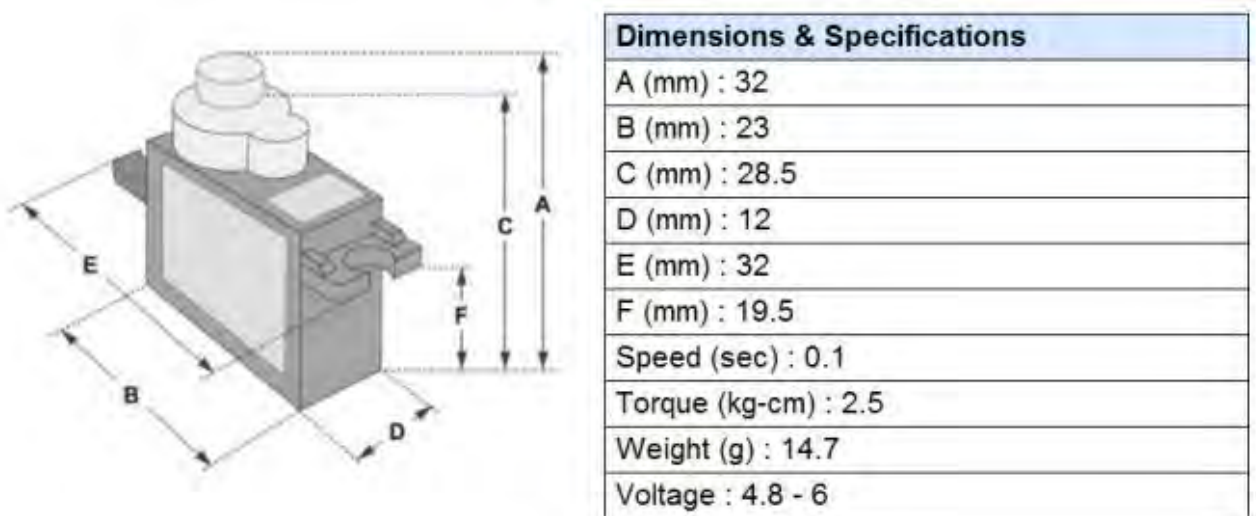


Рисунок 2.10 – Характеристики сервопривіда Tower Pro SG90



Якщо поворот на  $90^\circ$  має виконуватися наприклад за 6 секунд, необхідна швидкість обертання вихідного вала  $n_3$ :

$$n_3 = \frac{90^\circ}{6} = 15 \text{ об/хв}$$

Загальне передаточне число ( $i$ ): Для двигуна Tower Pro SG90, де максимальна швидкість обертання пдв =  $n_1 = 1500$ об/хв, передаточне число:

$$i = i_p = \frac{n_1}{n_3} = \frac{1500}{15} = 100$$

Передаточне число тихохідної ступені

$$i_T = 0,88 \sqrt{i_p} = 0,88 \sqrt{100} = 8,8$$

Передаточне число швидкохідної ступені

$$i_6 = \frac{i_p}{i_T} = \frac{100}{8,8} = 11,36$$

Частота обертання та кутова швидкість на валу двигуна

$$n_{дв} = n_1 = n_{вх} = 1500 \text{ об/хв}$$
$$\omega_{дв} = \omega_1 = \omega_{вх} = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{3,14 * 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}$$

Частота обертання та кутова швидкість на 2 валу редуктора

$$n_2 = \frac{n_1}{i_6} = \frac{1500}{11,36} = 132,04 \text{ об/хв}$$
$$\omega_2 = \frac{\pi n_2}{30} = \frac{3,14 * 132,04}{30} = 13,82 \text{ рад/с}$$

Частота обертання та кутова швидкість на 3 валу

$$n_3 = \frac{n_2}{i_T} = \frac{132,04}{8,8} = 15 \text{ об/хв}$$

$$\omega_3 = \frac{\pi n_3}{30} = \frac{3,14 * 15}{30} = 1,57 \text{ рад/с}$$

Потужність на валах привода

$$P_3 = P_B = 0,514 \text{ мВт}$$

$$P_2 = \frac{P_3}{\mu_3 \mu_0} = \frac{0,514}{0,98 * 0,99} = 0,529 \text{ мВт}$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\mu_3 \mu_0} = \frac{0,529}{0,98 * 0,99} = 0,545 \text{ мВт}$$

Обертаючі моменти на валах привода

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{0,545}{157} = 0,003 \text{ Нм}$$

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{0,529}{13,82} = 0,03 \text{ Нм}$$

$$M_3 = \frac{P_3}{\omega_3} = \frac{0,514}{1,57} = 0,32 \text{ Нм}$$

Результати кінематичного розрахунку привода зводимо в таблицю 2.3

Вал	Частота оберту n , об/хв.	Кутова швидкість $\omega$ , рад/с	Момент M , Нм	Потужність P, мВт
1	1500	157	0,003	0,545
2	132,04	13,82	0,03	0,529
3	15	1,57	0,32	0,514

Таблиця 2.3 – Результати кінематичного розрахунку привода

## **2.4 Автоматизація налаштування положення голівки під час вимірювання геометричних параметрів виробів**

Автоматизована система налаштування положення вимірювальної голівки призначена для забезпечення точності та ефективності процесу вимірювання геометричних параметрів виробів. Основними компонентами системи є приводи повороту, що дозволяють змінювати положення голівки, та модуль керування, який координує роботу системи.

Розроблений привід забезпечує зміну положення вимірювальної голівки у двох основних напрямках, що дозволяє адаптувати її до різних вимірювальних завдань: обертання навколо горизонтальної осі (Z) та обертання навколо вертикальної осі (Y).

Обертання навколо горизонтальної осі (Z) здійснюється в діапазоні від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , що дозволяє виконувати повний оберт головки. Така можливість є важливою для вимірювання геометричних параметрів виробів з різних сторін без необхідності додаткового переміщення об'єкта. Висока точність позиціонування досягається завдяки використанню черв'ячного редуктора, який мінімізує люфти та забезпечує плавний рух.

Обертання навколо вертикальної осі (Y) здійснюється в діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Це дозволяє змінювати нахил стилуса, що є особливо важливим для доступу до важкодоступних місць на виробі, таких як внутрішні порожнини або глибокі отвори. Обмеження кута повороту до  $90^\circ$  обумовлено необхідністю збереження стабільності та жорсткості конструкції головки.

Керування процесом зміни положення вимірювальної голівки здійснюється за допомогою спеціально розробленого модуля керування, що поєднує апаратну та програмну частини. Модуль забезпечує передачу команд, обробку даних і точне виконання налаштувань.

Компоненти модуля керування: планшет (інтерфейс користувача), програмне забезпечення та контролер.

Для керування використовується планшет, Samsung Galaxy Tab A8 (рис. 2.11), який поєднує компактні розміри, продуктивність і зручність сенсорного введення. Планшет виконує функцію інтерфейсу для взаємодії оператора із системою. Через нього задаються параметри повороту вимірювальної голівки та контролюється її стан.



Рисунок 2.11 – Планшет Samsung Galaxy Tab A8

Програмне забезпечення розроблено мовою Python із використанням бібліотек для графічного інтерфейсу, таких як Tkinter. Головні функції програмного забезпечення: введення параметрів налаштування (кутів повороту по осях Z і Y), відображення повідомлень про виконання команд або помилки.

В основі системи керування лежить контролер, Arduino Mega 2560 (рис 2.12), який відповідає за обробку даних із планшета та формування команд для приводу. Контролер забезпечує високоточне керування серводвигунами та взаємодію з датчиками положення.



Рисунок 2.12 – Контролер Arduino Mega 2560

Процес роботи модуля керування відбувається за кілька етапів. Спочатку оператор задає значення кутів повороту вимірювальної голівки через розділ програми «Налаштування положення» на планшеті. Після цього дані передаються з планшета до контролера за допомогою інтерфейсу зв'язку, наприклад, Bluetooth або USB.

Контролер отримує передані дані, аналізує їх і формує цифровий сигнал для подальшої обробки цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП). ЦАП перетворює цифровий сигнал на аналоговий, який подається на серводвигуни. Двигуни виконують обертання вимірювальної голівки відповідно до заданих параметрів.

Датчики кутового положення забезпечують зворотний зв'язок, передаючи інформацію про поточний стан головки назад на контролер. Якщо виявляється невідповідність між заданими та фактичними параметрами, контролер коригує рух приводу. Поточний стан головки та інформація про виконані операції відображаються на екрані планшета в режимі реального часу.

Модуль керування має кілька важливих переваг. Завдяки сенсорному екрану планшета, інтерфейс системи є інтуїтивно зрозумілим для користувача. Програмне забезпечення, розроблене на основі Python, забезпечує гнучкість і простоту налаштувань. Сучасний контролер у поєднанні з датчиками зворотного зв'язку гарантує високу точність керування системою.



Рисунок 2.13 – Структурна схема системи автоматичного керування голівки КВМ

Структурна схема системи автоматичного керування голівки КВМ (рис 2.13) в ній на вході системи задаються кути повороту  $\alpha_Y$  та  $\alpha_Z$  - це кути, на які потрібно повернути голівку координатно-вимірювальної машини по відповідних осях.

Компоненти системи та їх призначення:

1. П (Планшет) - пристрій для введення значень кутів повороту  $\alpha Y$  та  $\alpha Z$
2. К (Контролер) - обробляє вхідні дані та формує керуючі сигнали
3. ЦАП (Цифро-аналоговий перетворювач) - перетворює цифровий сигнал від контролера в аналоговий для керування електродвигунами
4. ЕД1, ЕД2 (Електродвигуни) - приводять в рух механізми повороту по осях Y та Z відповідно
5. Р1 (Зубчатий редуктор) - забезпечує передачу обертового руху від ЕД1 та зменшення швидкості обертання
6. Р2 (Червячний редуктор) - забезпечує передачу обертового руху від ЕД2 та значне зменшення швидкості обертання для точного позиціонування
7. Г (Голівка) - кінцевий виконавчий механізм, який повертається на задані кути  $\alpha Y$  та  $\alpha Z$

Процес роботи:

1. Оператор вводить значення кутів повороту  $\alpha Y$  та  $\alpha Z$  через планшет
2. Контролер обробляє ці значення та генерує відповідні цифрові сигнали
3. ЦАП перетворює цифрові сигнали в аналогові для керування електродвигунами
4. Електродвигуни ЕД1 та ЕД2 через відповідні редуктори (Р1 - зубчатий та Р2 - червячний) забезпечують поворот голівки на задані кути
5. В результаті голівка Г займає необхідне положення, визначене кутами  $\alpha Y$  та  $\alpha Z$

## ВИСНОВКИ ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКОГО РОЗДІЛУ

У проєктно-конструкторському розділі магістерської роботи було проведено розрахунки та розроблено ключові елементи системи для удосконалення вимірювальної системи координатно-вимірювальної машини (КВМ). Основний акцент зроблено на проєктуванні приводів для забезпечення руху вимірювальної головки та стилуса.

В результаті аналізу принципової та функціональної схем сервопривода можна дійти висновку, що обидві схеми демонструють ключові аспекти роботи системи керування положенням, хоча й на різних рівнях деталізації. Принципова схема розкриває конкретну електронну реалізацію системи керування через компаратор, генератор опорної напруги та силовий міст на транзисторах, тоді як функціональна схема представляє загальну структуру системи з точки зору перетворення сигналів та взаємодії основних функціональних блоків.

Особливу увагу приділено геометричному розрахунку черв'ячної передачі, включно з визначенням діаметрів, кроків зубців, а також характеристиками осьового та вершинного кроків. Це дозволило забезпечити оптимальні параметри взаємодії деталей та плавність роботи механізму.

Проведено підбір матеріалів, валів і опор із урахуванням їхніх властивостей для забезпечення довговічності та точності роботи. На основі виконаних розрахунків обрано мініатюрні сервоприводи, які відповідають вимогам до компактності та функціональності. Розроблені кінематичні схеми й ескіз конструкції голівки створюють основу для практичної реалізації проєкту, що підвищить ефективність і надійність вимірювань у промислових умовах.

Результати роботи підтверджують важливість оптимізації конструкції, вибору сучасних приводів і точного розрахунку параметрів. Завдяки цьому досягнуто покращення точності вимірювань, компактності конструкції та надійності системи. Проєктування проведено з урахуванням вимог, що дозволяє впровадити розроблену систему в сучасні КВМ.

### 3. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «УДОСКОНАЛЕННЯ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ»

#### 3.1 Опис ідеї проекту

У межах цього проекту пропонується розробка удосконаленої вимірювальної головки для координатно-вимірювальних машин (КВМ), яка забезпечить високу точність вимірювань завдяки інтеграції моторизованої двовісної системи позиціонування на базі сервоприводів. Основою цього рішення є застосування черв'ячних передач із підвищеним передаточним відношенням, що сприятиме покращенню точності контролю геометричних параметрів виробів.

Основна ідея полягає у створенні інноваційного продукту для автоматизації процесів вимірювання, що стане невід'ємною частиною сучасного промислового виробництва.

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка автоматизованої вимірювальної головки.	Застосування в координатно-вимірювальних машинах для контролю точності деталей.	Висока точність, повторюваність та стабільність вимірювань.
Інтеграція сервоприводів для двовісної роботи.	Використання в аерокосмічній, автомобільній та	Зменшення часу на налаштування вимірювального обладнання.



	медичній промисловості.	
Можливість автоматичної зміни положень.	Контроль складних геометричних параметрів на виробництвах.	Підвищення продуктивності завдяки автоматизації процесів.

Таблиця 3.1 – Опис ідеї стартап проекту

Розроблений продукт орієнтований на компанії, що спеціалізуються на точному машинобудуванні, а також на підприємства, які прагнуть підвищити ефективність своїх виробничих процесів. Продукт також має перспективи в сфері автоматизації вимірювального процесу та може бути використаний для модернізації існуючих виробничих систем.

Запропонований стартап-проект є перспективним рішенням для впровадження на ринок сучасного точного машинобудування. Інноваційні характеристики головки, зокрема двовісний сервопривод із високою дискретністю та надійністю, забезпечують конкурентоспроможність і високу додану вартість продукту для кінцевих користувачів.

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проект	Конкурент 1 (Renishaw PH10M)	Конкурент 2 (RTP20)	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Вартість розробки	\$15,000	\$40,000	\$25,000	-	-	+
2	Час на індексацію	4 секунди	2 секунди	3 секунди	+	-	-

	позиції Час розробки						
3	Кількість повторюваних позицій	400	450	400	-	+	-
4	Інтеграція з КВМ	Підтримує всі КВМ	Тільки власні моделі	Тільки власні моделі	-	-	+

Таблиця 3.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Таким чином, проведений аналіз показав, що наша ідея має низку значних переваг порівняно з конкурентами, серед яких — нижча вартість розробки та універсальність використання.

Для реалізації ідеї розробки сервоприводної двовісної поворотної голівки для КВМ проведено аналіз наявних та доступних технологій, які можуть бути використані для створення товару. Аналіз передбачав вивчення сучасних технологій виготовлення, їх доступність та можливість адаптації під вимоги проекту.

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка серводвигунів	Існуючі технології виробництва мініатюрних серводвигунів для промислових застосувань	+	+

2	Розробка редуктора	Черв'ячні передачі та планетарні редуктори, які можуть бути адаптовані до малогабаритних конструкцій	+	+
3	Виготовлення корпусу	Сучасні технології 3D-друку та прецизійної механічної обробки металів	+	+
4	Інтеграція датчиків	Існуючі модулі контактного вимірювання, адаптовані для КВМ	+	+

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: поєднання існуючих технологій, адаптованих для створення поворотної сервоприводної головки для координатно-вимірювальної машини

Таблиця 3.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

За результатами проведеного аналізу встановлено, що всі необхідні технології для реалізації ідеї проекту є наявними на ринку та доступними для використання. Для створення поворотної голівки буде використовуватись поєднання існуючих технологій із їх адаптацією під потреби проекту. Це забезпечує технологічну здійсненність реалізації проекту та дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані із впровадженням.

### 3.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення основних ризиків та можливостей, які можна очікувати від ринку є необхідним, оскільки дозволяє спроектувати напрями розвитку стартапу зі урахуванням всіх складових ринкового положення, попиту цільових клієнтів та

пропозицій конкурентів. Доцільно використати ці знання під час ринкового впровадження проекту.

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5-7 великих виробників (Mitutoyo, Hexagon, Zeiss тощо)
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~15 млрд грн на світовому ринку
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає (на 5–8% щорічно)
4	Наявність обмежень для входу	Високі витрати на сертифікацію, складність збуту
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ISO 10360-2, вимоги до точності, стандарти CE, FCC
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	12–15%

Таблиця 3.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Поточний ринок КВМ демонструє стійке зростання, спричинене розвитком автоматизації виробництва, контролю якості та вимог до точності в аерокосмічній, автомобільній та машинобудівній галузях. Основні гравці вже займають велику частину ринку, проте наявність специфічних технологічних запитів (наприклад, компактні серво-головки) відкриває ніші для нових проектів.

Основними ризиками є високі початкові витрати та необхідність відповідності міжнародним стандартам якості. Проте, за умови успішної сертифікації і залучення конкурентних переваг (зниження собівартості та впровадження новітніх технологій), проект може стати привабливим для потенційних інвесторів.

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до послуги
1	Забезпечення високої точності вимірювань на виробництв	- Великі виробники в автомобільній галузі -Аерокосмічні підприємства -Машинобудівні заводи	- Стандарти ISO, CE - Висока частота використання - Чутливість до ціни, але високі вимоги до надійності - Потреба у швидкій технічній підтримці	- Висока точність (до 1 мкм) - Довговічність - Легкість інтеграції у виробничі процеси - Гарантія та обслуговування
2	Автоматизація контрольних процесів в умовах масового виробництва	Автомобільні та електронні виробництва з високим рівнем автоматизації	- Вимоги до швидкості вимірювань - Високий ступінь автоматизації - Потреба у комплексному підході (системне рішення)	- Висока швидкість вимірювань - Сумісність з автоматизованими системами управління - Можливість роботи в безперервному режимі
3	Дослідження та розробка в університетах і дослідницьких лабораторіях	- Науково-дослідні інститути - Технічні університети	- Потреба у точності та універсальності - Обмежений бюджет - Вимоги до можливості роботи з нестандартними деталями	- Універсальність - Гнучкість налаштувань - Можливість інтеграції нестандартних функцій

Таблиця 3.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Для кожної групи споживачів потрібно враховувати специфічні вимоги. Великі виробники орієнтуються на надійність і довговічність коли малі підприємства потребують компактних і доступних рішень.Наукові установи шукають універсальні інструменти з можливістю налаштувань.

Це дозволяє визначити основні напрями адаптації продукту для різних ринкових сегментів.

Аналіз ринкового середовища дозволяє виявити потенційні загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Ідентифікація цих загроз допомагає заздалегідь розробити стратегії мінімізації їх впливу. У таблиці наведено основні

фактори загроз із зазначенням їх змісту та можливих дій компанії для реагування на них.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Вихід на ринок нових міжнародних конкурентів із сучасними технологіями	Інвестування у вдосконалення технологій, підвищення якості продукції, запровадження конкурентних цін
2	Економічні чинники	Зростання собівартості виробництва через інфляцію та підвищення цін на комплектуючі	Оптимізація витрат, налагодження довгострокових контрактів із постачальниками
3	Політичні та правові чинники	Ризики змін у законодавстві, що регулює стандарти і сертифікацію продукції	Моніторинг змін у законодавстві, забезпечення відповідності продукції міжнародним і державним стандартам
4	Чинники попиту	Зниження попиту через економічний спад	Диверсифікація ринків збуту, розробка нових моделей продукції з меншими витратами для доступу до ширшого кола споживачів
5	Застарілість технології	Поява більш інноваційних технологій	Розробка з урахуванням появи нових технологій

Таблиця 3.6 – Фактори загроз

Результати аналізу показали, що найбільш вагомими загрозами для проекту є посилення конкуренції. Для зниження їх впливу рекомендується зосередитися на

вдосконаленні технології виробництва. Своєчасне врахування цих ризиків сприятиме успішній адаптації проекту до зовнішнього середовища.

Ринкові можливості є ключовими елементами для формування конкурентних переваг підприємства. Їх правильна ідентифікація та використання дозволяють компанії зміцнити свої позиції на ринку та забезпечити стійкий розвиток. У таблиці зазначено основні фактори можливостей, їх значення та потенційні заходи для їх реалізації.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Науково-технічні чинники	Впровадження нових матеріалів і технологій, що дозволяють зменшити розміри і вагу продукції	Залучення інноваційних партнерів
2	Соціально-демографічні чинники	Підвищення інтересу молодих спеціалістів до автоматизації та інженерії	Взаємодія з університетами, участь у освітніх програмах і розробка адаптивних продуктів
3	Міжнародні чинники	Можливість виходу на ринки, що розвиваються (наприклад, країни Азії або Латинської Америки)	Пошук дистриб'юторів у нових регіонах, адаптація продукції до специфічних умов ринку

Таблиця 3.7 – Фактори можливостей

Ринкове середовище для впровадження проекту характеризується як перспективне завдяки зростаючому попиту на високоточні вимірювальні системи та наявності нових ринків збуту. Проте існують загрози, такі як вихід сильних конкурентів та економічні ризики, що потребують підготовленої стратегії управління.

Ступеневий аналіз конкуренції дозволяє оцінити тип ринкової структури, рівень конкурентної боротьби, галузеві аспекти, а також характер і інтенсивність конкуренції. У таблиці представлено основні характеристики конкурентного середовища, їх прояви та можливий вплив на діяльність підприємства, що допомагає розробити стратегії для підвищення конкурентоспроможності.

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції	Монополістична конкуренція: різноманітність товарів, значення мають як ціна, так і нецінові чинники	Розробка інноваційної продукції, створення унікальної торгової марки, вдосконалення сервісу і рекламних кампаній
2. За рівнем конкурентної боротьби	Національний рівень: конкуренція між підприємствами всередині країни	Зміцнення позицій на локальному ринку, впровадження програм лояльності клієнтів, покращення співвідношення "ціна-якість"
3. За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева конкуренція: основна конкуренція між виробниками вимірювальних	Аналіз конкурентів, розробка рішень, що перевершують їх за точністю та функціональністю



4. Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова конкуренція: суперництво між схожими видами вимірювальних пристроїв	Фокус на вдосконалення точності, компактності та функціональності продукції
5. За характером конкурентних переваг	Нецінова конкуренція: акцент на якості, технологічності, інноваціях	Інвестування в інновації, підвищення якості продукції, створення програм післяпродажного обслуговування
6. За інтенсивністю	Немарочна конкуренція: брендинг не є визначальним фактором, головним є функціональність і якість	Створення репутації надійного виробника через якість і довговічність продукції, активна участь у виставках і презентаціях

Таблиця 3.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Ринок координатно-вимірювальних машин характеризується монополістичною конкуренцією, де важливу роль відіграють нецінові фактори, такі як інноваційність, якість, надійність продукції. Основна боротьба відбувається між виробниками схожих типів продукції на національному рівні, а акцент зміщується на функціональність, інтеграцію нових технологій та розширення сервісних послуг.

Для успішної конкурентної боротьби підприємству необхідно: вдосконалювати точність і функціональність продукції, забезпечити інноваційність розробок, пропонувати комплексні рішення (продукт + сервіс), активно рекламувати переваги своїх розробок та брати участь у спеціалізованих заходах.

Для оцінки конкурентного середовища ринку та визначення його ключових характеристик використовується модель 5 сил М. Портера. Ця модель дозволяє виявити, як прямі конкуренти, потенційні учасники ринку, постачальники, клієнти та товари-замінники впливають на діяльність компанії. Таблиця відображає основні

фактори впливу кожної складової, а також визначає можливості та загрози для підприємства.

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Навести перелік прямих конкурентів	Hexagon Manufacturing Intelligence, Mitutoyo, Carl Zeiss Industrial Metrology, Wenzel Group	Малі інноваційні стартапи у галузі автоматизації вимірювань (наприклад, у сфері 3D-сканування)	Постачальники датчиків (Renishaw, Heidenhain), серводвигунів (FANUC, Siemens), електроніки та мехатроніки	Великі промислові підприємства, які потребують точного вимірювання (автомобільна, авіаційна, космічна галузі)	Технології безконтактного сканування (оптичні сканери, лазерні вимірювальні системи)
Визначити бар'єри входження в ринок	Високі інвестиції в розробку, необхідність сертифікацій ISO, сильна репутація існуючих гравців	Висока капіталомісткість розробок, труднощі з патентуванням, потреба у налагоджених каналах збуту	Можливий дефіцит специфічних електронних компонентів, залежність від глобальних	Високі вимоги до точності, адаптивності та підтримки продукту, низька цінова чутливість	Лазерне позиціонування, оптичні компаратори, системи на основі ШІ

			постачальників		
Визначити фактори сили постачальників	Висока концентрація виробників компонентів (обмежений вибір постачальників для критичних деталей)	Постачальники можуть диктувати ціни на датчики та електроніку через обмеженість пропозиції			
Визначити фактори сили споживачів	Промислові гіганти зможуть диктувати умови через великі обсяги замовлень	Висока конкуренція між постачальниками змушує компанії пропонувати додаткові послуги (сервіс, навчання персоналу)			
Фактори загрози з боку замінників	Технології безконтактного вимірювання розвиваються швидше,				

	ніж традиційні КВМ				
--	--------------------------	--	--	--	--

Таблиця 3.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Інтенсивність конкуренції серед прямих гравців висока, особливо з боку провідних міжнародних компаній. Щоб бути конкурентоспроможним, потрібно запропонувати інноваційні рішення, наприклад, адаптивну головку або покращені серводвигуни. Потенційні конкуренти мають середній вплив через високу капіталомісткість галузі. Постачальники можуть мати помірний вплив через залежність від їх продукції, тому варто працювати над локалізацією виробництва компонентів. Споживачі мають сильну позицію через великі обсяги закупівель і вимоги до точності, що стимулює надавати унікальні функції, сервіс та інновації. Товари-замінники становлять загрозу у довгостроковій перспективі, тому варто інтегрувати технології безконтактного вимірювання в продукт.

В нижче наведеній таблиці продемонстровано фактори які забезпечать позитивні результати на конкурентному ринку.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Інноваційність	Використання моторизованої сервоприводної головки, яка забезпечує високу точність і швидкість вимірювань, дозволяє отримати конкурентну перевагу перед традиційними рішеннями.
2	Точність	Висока точність вимірювань (до мікронного рівня), яка відповідає вимогам галузей, таких як авіабудування, машинобудування та медична техніка, є ключовим фактором для вибору клієнта.

3	Гнучкість і адаптивність	Можливість повороту головки по двох осях та сумісність із різними типами датчиків і стилусів забезпечують універсальність використання в різних виробничих процесах.
4	Цінова доступність	Оптимізація конструкції та локалізація частини виробництва дозволяють знизити собівартість продукції, що робить її доступною для середніх і малих підприємств.

Таблиця 3.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Texas Instruments						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Інноваційність	18					+		
2	Точність	17							
3	Гнучкість і адаптивність	17					+		
4	Цінова доступність	14							+

Таблиця 3.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Інноваційна головка для КВМ»

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.11).

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Висока інноваційність і технічні переваги</li> <li>2. Висока точність та адаптивність до різних умов</li> <li>3. Відповідність міжнародним стандартам</li> <li>4. Сумісність з більшістю стандартних систем</li> </ol>	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Висока вартість розробки та виробництва</li> <li>2. Необхідність постійного оновлення програмного забезпечення</li> <li>3. Висока залежність від постачальників компонентів</li> </ol>
---	---

	4. Обмежена географія постачання та підтримки
Можливості: 1. Розширення на нові ринки 2. Зростаючий попит на інноваційні технології 3. Залучення інвестицій для масштабування 4. Збільшення попиту на автоматизовані вимірювальні системи	Загрози: 1. Зростання цін на сировину та компоненти 2. Посилення цінової конкуренції 3. Виникнення нових конкурентів, що швидко виходять на ринок 4. Регуляторні зміни, які обмежують технології

Таблиця 3.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Стартап має переваги у вигляді інноваційних технологій, високої точності та енергоефективності, а також відповідності міжнародним стандартам, що дозволяє йому успішно конкурувати на ринку.

Основні слабкі сторони включають високу вартість розробки та виробництва, обмежену географію постачання та підтримки, а також необхідність постійного оновлення програмного забезпечення для забезпечення конкурентоспроможності.

Стартап має потенціал для розширення на нові ринки, залучення інвестицій для масштабування, а також укладання партнерських угод з великими гравцями на ринку, що відкриває нові можливості для розвитку.

Найбільші загрози включають зростання цін на сировину, посилення цінової конкуренції та появу нових конкурентів, а також зміну регуляційних вимог, що може обмежити використання деяких технологій.

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Розробка та вдосконалення прототипу головки для КВМ, проведення тестування та сертифікація для відповідності стандартам	Висока	12 місяців
2	Вихід на основні ринки через партнерства з великими постачальниками та дистриб'юторами технічних систем	Середня	18 місяців
3	Масштабування виробництва, розширення модельного ряду та інтеграція нових функцій в продукт для різних галузей	Середня	24 місяці
4	Вихід на нові ринки з допомогою онлайн-продажів та маркетингових кампаній	Висока	6-12 місяців

5	Розробка нових варіантів головки для КВМ, орієнтуючись на специфічні потреби різних промислових секторів	Середня	18 місяців
---	--	---------	------------

Таблиця 3.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Після аналізу вище зазначених альтернатив ринкової поведінки, оптимальною для стартап-проекту є Альтернатива 4 - вихід на нові ринки з допомогою онлайн-продажів та маркетингових кампаній.

### 3.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові підприємства, що використовують координатно-вимірвальні машини для точних вимірів деталей в процесі виробництва	Висока	Високий (від кількох сотень до тисяч одиниць)	Середня	Середня
2	Постачальники технологічних рішень для автоматизації та оптимізації виробничих процесів, які потребують інтеграції нових	Середня	Середній (десятки до сотень одиниць)	Висока	Складна

	вимірювальних систем				
3	Науково-дослідні організації та університети, які працюють над розробкою нових технологій та випробовуванням інновацій	Висока	Низький (десятки одиниць для досліджень і прототипів)	Низька	Легка
<p>Які цільові групи обрано: промислові компанії та компанії, що працюють у сфері автоматизації вимірювань.</p> <p>Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення, що компанія буде зосереджуватися на співпраці з промисловими підприємствами, які потребують високоточних вимірювальних систем, а також з компаніями, що займаються автоматизацією виробничих процесів у різних галузях.</p>					

Таблиця 3.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку.

п / п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
	Вихід на ринок з пропозицією інноваційних вимірювальних систем для промислових компаній	Диференційований маркетинг	Висока точність вимірювань, інноваційні рішення, адаптація під потреби конкретних підприємств	Стратегія диференціації
	Розширення продажів через партнерства з	Масовий маркетинг	Стандартизовані рішення для різних типів підприємств,	Стратегія лідерства по витратах



компаніями автоматизації виробництва	в		здатність швидко масштабуватися	
Спеціалізація на сегменті високоточних вимірювальних систем для компаній, що працюють у сфері автоматизації		Стратегії спеціалізації	Глибоке розуміння потреб ринку автоматизації, специфічні вимоги до точності	Стратегія спеціалізації

Таблиця 3.15 – Базова стратегія розвитку

Для розробки базової стратегії розвитку стартапу було обрано три варіанти, які передбачають різні стратегії охоплення ринку. В даній таблиці можна спостерігати обрані стратегії розвитку. Базовою стратегією є диференціація, спрямована на створення інноваційних вимірювальних систем для промислових компаній. Це дозволить підприємству забезпечити високу точність вимірювань, запропонувати інноваційні рішення та адаптувати продукти під конкретні потреби кожного клієнта.

Альтернативною стратегією є спеціалізація на сегменті автоматизації виробництва, з глибоким розумінням специфічних вимог щодо точності та ефективності для компаній, які займаються автоматизацією виробничих процесів.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (Таблиця 3.16).

Для вибору стратегії конкурентної поведінки в нашому випадку, варто врахувати кілька факторів, пов'язаних із розробкою координатно-вимірювальної машини та її компонентів, таких як моторизовані сервоприводи та редуктори.

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Так	Забирати існуючих споживачів через вдосконалення продуктів або зниження ціни	Може копіювати деякі технічні характеристики, якщо це допоможе бути конкурентоспроможним	Стратегія наслідування лідеру

Таблиця 3.16 – Вибір стратегії конкурентної поведінки

Згідно з таблицею 3.16, обрано стратегію наслідування лідеру. Ця стратегія передбачає, що проект є «першопрохідцем» на ринку, і компанія намагається забрати існуючих споживачів у конкурентів за рахунок вдосконалення продукту або зниження ціни. При цьому, компанія може копіювати деякі технічні характеристики товару конкурента, якщо це дозволить підвищити її конкурентоспроможність на ринку.

Стратегія наслідування лідеру є орієнтованою на адаптацію та вдосконалення вже існуючих рішень, що дозволяє скористатися перевагами лідера ринку, зберігаючи при цьому достатню гнучкість для швидкої реакції на зміни в конкурентному середовищі. Це дозволяє знизити ризики, пов'язані з новаторством, та забезпечити конкурентні переваги за допомогою поступового вдосконалення продукту.

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока якість, інноваційність, надійність	Лідерство за якістю	Високий рівень технологічних інновацій, стійкість до змін, престижність товару	1. Інновації 2. Надійність 3. Якість
2	Доступність, оптимальне співвідношення ціна-якість	Лідерство за ціною	Зниження витрат через масштаб виробництва, конкурентні ціни	1. Доступність 2. Вартість 3. Ефективність

Таблиця 3.17 – Визначення стратегії позиціонування

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку.

### 3.4 Розробка маркетингової програми та планування стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 3.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту
1	Висока якість і надійність	Забезпечує довговічність і стабільну роботу товару	Інноваційні технології, перевірена якість, сервісне обслуговування
2	Оптимальне співвідношення ціна-якість	Продукт є доступним при високій якості	Конкурентні ціни, вигідні умови покупки, гнучка система знижок

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди 1. Споживач потребує точного та швидкого вимірювання малих деталей 2. Товар забезпечує високу точність та швидкість вимірювання, що допомагає у забезпеченні якості продукції		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристик и	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Механічні характеристики: точність, швидкість руху головки	М	Тх
	2. Електричні характеристики: споживана потужність, тип підключення	М	Тх
	3. Швидкодія	Нм	Тх
	4. Підтримка масового використання	Нм	Тх
	5. Естетичні характеристики: компактний дизайн, зручність у використанні	Нм	Е
Якість: відповідає нормам ДСТУ 2844-94			

	Пакування: зручне для транспортування, надійне
	Марка: компанія-розробник, назва товару
III. Товар із підкріпленням	До продажу с: інструкція з експлуатації, демонстрація товару, консультації
	Після продажу: гарантійне обслуговування, постпродажний сервіс, доступність запасних частин

Таблиця 3.19 – Опис трьох рівнів моделі *товару*

Ця таблиця допомагає чітко розрізнити три рівні товару, починаючи від концептуального задуму до реального виконання і підкріплення товару додатковими послугами. Важливо також передбачити механізми захисту ідеї товару від копіювання, що є необхідним для збереження конкурентної переваги на ринку.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 3.20).

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	600 000 грн	500 000 грн	1 500 000 грн	450 000 грн / 500 000 грн
2	200 000 грн	150 000 грн	800 000 грн	180 000 грн / 220 000 грн
3	100 000 грн в рік	120 000 грн в рік	1 000 000 грн в рік	90 000 грн / 110 000 грн

Таблиця 3.20 – Визначення меж встановлення ціни

Товари-замінники мають занадто високу вартість, щоб брати їх до уваги при визначенні ціни. Середня ціна на товари-аналоги варіюється в межах від 150 000 до 500 000 грн, в залежності від специфікацій та функцій. Рівень доходів потенційних споживачів складає від 800 000 до 1 500 000 грн на рік. Однак встановлення ціни на наш товар/послугу буде залежати від співвідношення з рівнем доходів потенційних

компаній-клієнтів, при цьому ціна варіативна: від 180 000 до 220 000 грн в залежності від комплектації та специфікацій. Третій варіант відображає ціни на підтримку цього обладнання протягом року, що коливаються від 90 000 до 110 000 грн в рік, з урахуванням сервісу та технічної підтримки.

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Клієнти (компанії) шукають високу точність та надійність у вимірювальних системах для виробництва. Переважно ці компанії працюють у галузях високих технологій.	Виробник повинен здійснювати прямий контакт з клієнтом, надавати консультації, а також забезпечувати сервіс та підтримку після продажу.	Канал нульового рівня (прямий маркетинг)	Власна система збуту через торгових агентів, які є співробітниками компанії, та через збутові філіали для забезпечення високого рівня сервісу.
2	Потенційні покупці часто звертаються до компаній, що спеціалізуються на певному типі вимірювальних систем. Пошук на ринку здійснюється через спеціалізовані каталоги та виставки.	Постачальник має забезпечити комплексну підтримку продукту та вчасну доставку.	Канал одного рівня (роздрібні торговці)	Залучення договірних збутовиків для забезпечення складування, доставки та обслуговування продуктів у різних регіонах.
3	Споживачі націлені на придбання повних систем з можливістю налаштування та індивідуальних рішень для свого бізнесу. Це можуть бути великі корпорації, які шукають гнучкі рішення.	Постачальник має забезпечити консультування, доставку, налаштування та технічну підтримку на всіх етапах використання.	Канал дворівневий (оптовий та роздрібні торговці)	Власна система збуту для великих корпоративних клієнтів через філіали та оптових партнерів для забезпечення доставки та налаштування.

Таблиця 3.21 – Формування системи збуту

У першому випадку, де основними клієнтами є великі технологічні компанії, оптимально використовувати канал прямого маркетингу. Прямі продажі дозволяють виробнику безпосередньо взаємодіяти з клієнтом, забезпечувати точну технічну підтримку та надавати індивідуальні консультації. У другому випадку використовується канал одного рівня з залученням збутовиків для зберігання та доставки продукції. Це дозволяє покрити більшу частину ринку через наявність спеціалізованих партнерів. Третій варіант передбачає дворівневий канал, що включає як оптових, так і роздрібних продавців. Це дозволяє отримати ширший охоплення ринку, особливо для компаній, які надають готові системи з налаштуванням.

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Клієнти – це представники підприємств, що займаються виробництвом в галузях високих технологій і мають потребу в точних і надійних вимірювальних системах. Вони приймають рішення про покупку на основі технічних характеристик і бренду.	Прямі комунікації через корпоративні виставки, онлайн-конференції, сайти, а також спеціалізовані технічні журнали та професійні платформи.	Висока точність, надійність, інноваційні технології, простота інтеграції в існуючі системи.	Інформувати цільову аудиторію про переваги високоточних вимірювальних систем, підвищення ефективності виробничих процесів за допомогою інноваційних технологій.	Створення образу бренду, що асоціюється з точністю та надійністю. Використовувати технічні деталі та показники якості в рекламних матеріалах. Вказувати, що система легко інтегрується в інші підприємства без значних

					змін у процесах.
2	Потенційні покупці часто звертаються до технічних консультантів і постачальників обладнання, що спеціалізуються на вимірювальних системах для точного контролю в промисловості.	Канали: безпосередні консультації, виставки, презентації на промислових форумах, сайти з оглядами технологій, інтернет-реклама (особливо на технічних платформах і форумах).	Лідерство в галузі точності, унікальні функції сервісу та підтримки, гнучкість налаштування під специфічні потреби виробництва.	Підкреслити конкурентні переваги продукції (високоточні системи, що гарантують ефективність та безпеку виробничих процесів).	Рекламне звернення, яке демонструє переваги системи в порівнянні з конкурентами. Використовувати реальні приклади з підвищенням точності вимірювань у конкретних сферах. Застосовувати інформацію про довгострокову підтримку клієнтів та гнучкість в адаптації продукту до різних умов.
3	Споживачі – це великі корпорації, що шукають інноваційні рішення для масштабних виробничих	Офіційні канали: корпоративні сайти, участь у виставках і конференціях, email-розсилки,	Технічна інноваційність, швидкість реагування на зміни, підтримка на всіх етапах.	Зацікавити потенційних клієнтів у довгостроковому співробітництві, підкреслю	Тема рекламного звернення: "Максимальна точність для Вашого виробництв

	процесів, які забезпечують точність та ефективність на кожному етапі.	онлайн-демонстрації.		ючи переваги у вигляді економії часу та ресурсів за рахунок впровадження інновацій.	а". Використовувати технічні специфікації, що підкреслюють точність та швидкість роботи системи. Позиціонувати продукт як основний елемент у стратегії підвищення ефективності на всіх етапах виробництва.
--	---	----------------------	--	---	--

Таблиця 3.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Перше рекламне повідомлення орієнтоване на технічну аудиторію, де основним акцентом є точність та надійність продукту. Важливо позиціювати продукт як безпечний і точний інструмент для високих технологій. Друге звернення орієнтоване на промислові підприємства, де акцент ставиться на специфічні потреби таких компаній і підтримку на всіх етапах. Третє повідомлення націлене на великі корпорації, що шукають гнучкі і інноваційні рішення для ефективного виробництва, з акцентом на довгострокове партнерство і переваги інтеграції продукту в їхні процеси.



Таким чином, концепція маркетингових комунікацій формує стратегію просування, базуючись на специфіці ринку, поведінці клієнтів і перевагах продукту.

Бізнес-модель є фундаментом будь-якого стартапу, що визначає спосіб створення, доставки та отримання цінності для кінцевого користувача. У цьому підрозділі представлено детальну структуру бізнес-моделі, яка описує ключові аспекти діяльності стартапу, включаючи цінні пропозиції, джерела доходів та основні витрати.

Елемент бізнес-моделі	Опис
Цінні пропозиції	Високоточна вимірювальна головка для координатно-вимірювальної машини, що забезпечує покращену точність, автоматизацію та довговічність.
Цільові сегменти	Промислові підприємства, науково-дослідні установи, малі та середні підприємства, виробники машин та обладнання.
Канали взаємодії	Прямі продажі, партнерські мережі, онлайн-платформи, галузеві виставки та конференції.
Джерела доходів	Продаж вимірювальних головок, ліцензування технологій, технічна підтримка, адаптація обладнання під замовлення.
Ключові ресурси	Інженерна команда, патенти на розробки, технологічне обладнання для прототипування, фінансові ресурси.
Основні витрати	Виробничі витрати, розробка інноваційних моделей, маркетинг, участь у виставках, патентування та юридичний супровід.

Таблиця 3.23 – Команда стартап-проекту

Ця бізнес-модель забезпечує стратегічний підхід до розвитку стартапу, оптимізацію ресурсів та ефективну комунікацію з потенційними клієнтами.

Для успішної реалізації стартап-проекту, спрямованого на удосконалення вимірювальної системи та координатно-вимірювальної машини (КВМ), необхідно сформувати команду професіоналів, які забезпечать розробку технічного рішення, його адаптацію до ринкових умов і впровадження на підприємствах. Команда стартапу повинна охоплювати всі ключові етапи: розробку, конструювання, тестування, захист інтелектуальної власності, організацію виробництва та маркетинг.

На основі аналізу обсягу робіт та основних завдань було визначено необхідні ролі й відповідальності членів команди. Ця інформація відображена у таблиці.

Учасник команди	Посада	Завдання, що необхідно виконати
Розробник конструкцій	Інженер-конструктор	Розробити креслення і 3D-моделі головки КВМ, редукторів і сервоприводів; забезпечити відповідність конструкцій стандартам і технічним вимогам
Інженер з автоматизації	Фахівець з КВМ	Інтегрувати серводвигуни з системою управління КВМ; забезпечити налаштування програмного забезпечення для автоматичного позиціонування та зчитування даних.
Спеціаліст з матеріалознавства	Інженер з матеріалів	Вибрати матеріали для конструкції головки з урахуванням їх міцності, ваги та довговічності; забезпечити

			проведення аналізу зношуваності та температурного розширення.
Фахівець аналізу даних	3	Інженер-аналітик	Розробити алгоритми для обробки даних, отриманих з виміральної головки, провести тестування точності і надійності системи.
Менеджер маркетингу	3	Маркетолог	Провести аналіз ринку, розробити стратегію позиціонування і просування продукту, організувати комунікацію з потенційними клієнтами і партнерами.
Юридичний консультант		Юрист патентування	3 Підготувати патентну документацію, забезпечити захист інтелектуальної власності; провести аналіз ризиків порушення прав третіх сторін.
Менеджер проєкту		Керівник проєкту	Координувати всі етапи реалізації стартапу, відповідати за дотримання строків і бюджету, взаємодіяти з інвесторами та партнерами.

Таблиця 3.23 – Команда стартап-проєкту

Команда стартап-проєкту розроблена з урахуванням специфіки технічних, організаційних і ринкових завдань. Завдяки злагодженій роботі команди, проєкт має високі шанси на успішне впровадження у виробництво і подальший вихід на ринок.

№ п/п	Зміст етапу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Собівартість
										0	1	2				

													реалізація
1	Аналіз ринку, визначення вимог та цільової аудиторії												700\$
2	Розробка концепції ідеї стартапу												1000\$
3	Розробка технічного завдання та створення прототипу												2000\$
4	Розробка та інтеграція програмного забезпечення												5000\$
5	Тестування												3000\$

	програмно го забезпече ння та налагодже ння системи												
6	Розроб ка інтерфейсі в користува ча												4000\$
7	Налаго дження безпеки даних та інтеграція систем захисту												4500\$
8	Пошук і залучення інвестицій												3500\$
9	Підгот овка запуску продукту												6000\$

10	Маркетинг, реклама та масштабування проєкту													5000\$
Сума														35,200\$

Таблиця 3.24 – Графік реалізації стартап-проєкту

Цей план включає всі основні етапи реалізації стартапу, від аналізу ринку до маркетингової кампанії та масштабування.

## ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Проведений аналіз ринку показав наявність стійкого попиту на високоточні вимірювальні системи, зокрема координатно-вимірювальні машини для промислових підприємств. Динаміка ринку вказує на постійний розвиток і технологічні інновації в галузі, що сприяє зростанню потреби в нових рішеннях для вимірювання та контролю якості продукції. Рентабельність роботи на ринку залежить від здатності компанії запропонувати конкурентоспроможний продукт з високими технічними характеристиками та якістю сервісу, що дасть змогу зайняти певну нішу на ринку.

З огляду на потенційні групи клієнтів, зокрема виробничі компанії в галузі високих технологій, точних вимірювань та автоматизації, перспективи впровадження проекту є досить сприятливими. Однак існують бар'єри входження, такі як високі початкові інвестиції в розробку та сертифікацію обладнання, а також значна конкуренція на ринку. Тому важливо забезпечити високу конкурентоспроможність проекту через інноваційність, технічну підтримку і можливість адаптації продукції під індивідуальні потреби клієнтів.

Для ринкової реалізації проекту доцільно обрати стратегію диференціації, орієнтуючись на високоточні рішення для великих і середніх виробничих компаній. Альтернативно, можна розглянути співпрацю з великими промисловими корпораціями як частину довгострокового партнерства, що дозволить збільшити масштаби виробництва і охоплення ринку.

Подальша імплементація проекту є доцільною за умови виконання попередніх етапів, зокрема завершення розробки та тестування продукту, а також створення надійної системи збуту та підтримки клієнтів. Зважаючи на високий попит на точні вимірювальні системи та перспективи розвитку галузі, проект має потенціал для успішної реалізації на ринку. Для цього важливо забезпечити стійке фінансування, маркетингову підтримку та розвиток сервісних послуг.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання магістерської роботи на тему "Удосконалення вимірювальної системи та координатно-вимірювальної машини" було виконано комплексний аналіз та вдосконалення елементів контактної-вимірювальної системи. Робота базується на досвіді, отриманому під час виконання дипломного проекту, та розширює дослідження шляхом інтеграції нових технологій і підходів.

Було досліджено сучасні методи та принципи роботи вимірювальних систем. Розглянуто конструктивні особливості координатно-вимірювальних машин, види датчиків дотику та їх вплив на точність вимірювань. Удосконалення системи спрямоване на підвищення її точності та стабільності шляхом застосування новітніх приводних технологій і вдосконалення кінематичних характеристик.

У межах цього розділу виконано розробку двох приводів для вимірювальної головки КВМ. Привід горизонтального повороту забезпечує поворот на  $360^\circ$  за 5 секунд. Було виконано розрахунок черв'ячного редуктора з визначенням його основних параметрів, таких як модуль, осьовий крок, коефіцієнт діаметра черв'яка. Застосування серводвигуна Mitsubishi HG-MR053 дозволило досягти необхідної точності й плавності руху.

Привід для підняття стилуса ( $0-90^\circ$ ) реалізовано з використанням мікросервопривода Tower Pro SG90, який забезпечує компактність конструкції та достатню потужність для виконання завдання.

У ході розрахунків визначено потужності, кутові швидкості, передаточні числа та кінематичні параметри систем. Це забезпечило надійність і відповідність вимогам проекту.

Результати роботи можуть бути інтегровані в стартап-проект для впровадження вдосконаленої системи у виробничі процеси. Модернізація вимірювальної головки КВМ дозволить: збільшити точність контролю геометричних параметрів, скоротити час на виконання вимірювань, забезпечити високу конкурентоспроможність продукції завдяки зниженню похибок у виробництві.



Виконані дослідження та розробки підтверджують доцільність впровадження модернізованої вимірювальної системи. Розроблені приводи відповідають сучасним вимогам до точності, швидкодії та компактності. Робота закладає основу для подальших інновацій у сфері координатно-вимірювальних технологій, зокрема шляхом застосування цифрових систем керування та інтеграції з автоматизованими виробничими процесами.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Боженко Л. І. Стандартизація, метрологія та кваліметрія ум машинобудуванні: Навч. посібник. – Львів: Світ, 2003. – 328 с.
2. Базієвський С.Д. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання. Підручник / С.Д. Базієвський, В.Ф. Дмитришин – Київ: Видавничий Дім «Слово», 2006. – 504 с.
3. Бичківський Р.В. Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація: Підручник / Р.В. Бичківський, П.Г.Столярчук – Львів: Львівська політехніка, 2004. – 560 с.
4. ДСТУ ISO 10360-2:2006 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Приймальні та контрольні випробування координатно-вимірювальних машин. Частина 2. Координатно-вимірювальні машини для вимірювання розмірів (ISO 10360-2:2001, IDT)
5. Теоретичні основи структурно-параметричного геометричного моделювання виробів машинобудування В. В. Ванін, Г. А. Вірченко, П. М. Яблонський; КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 223 с.
6. Орнатський Д. П. Розробка комп'ютеризованої системи для контролю криволінійних поверхонь за допомогою індуктивних датчиків / Д. П. Орнатський, Н.В. Михалко, М. О. Катаєва // Технологический аудит и резервы производства. – №1/2. – 2016.– С. 83–90.
7. Орнатський Д.П. Підвищення точності та швидкодії вимірювань лінійнокутових величин потенціометричними датчиками / Д.П . Орнатський, М.О. Катаєва // Вісник Інженерної академії України. – № 4. – С 103 – 107.
8. Колосов О. С. Технічні засоби автоматизації і управління / Юрайт.2022. – 291.

9. Розрахунки механічних передач : навчальний посібник до курсового й дипломного проектування / С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – 204 с.
10. Григор'єв А. С. Порівняння характеристик приводів обертового руху для систем автоматизації і керування. / А. С. Григор'єв, О. М.Павловський. // Погляд у майбутнє приладобудування. – 2019. – №1. – С. 7–9.
11. Мехатроніка : Підручник / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Крушельницький В.В. – Київ. : Національний університет біоресурсів і природокористування, 2020. – 404 с.
12. Механотроніка: Конспект лекцій / уклад. Н. М. Гулієва. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – 104 с.
13. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : Навч. посіб. для вищ. навч. закл. / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський та ін. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
14. Морзе Н. В., Варченко-Троценко Л. О., Гладун М. А. Основи робототехніки : навч. посіб. Кам'янець-Подільський : ПП Буйницький О. А., 2016. 184 с.
15. Робототехніка : підручник / В. І. Костюк та ін. Київ : Вища шк., 1994. 447 с
16. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
17. Кірієнко О.А. Прикладна механіка: навчальний посібник для студ. ВНЗ / О.А.Кірієнко, В.І.Коломієць ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін.-т». – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 208 с.
18. Кірієнко О.А. Теорія механізмів і машин: навчальний посібник для студентів ВНЗ / О.А.Кірієнко ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін.-т». – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 232 с.

19. Шегедин, О.І. Теоретичні основи електротехніки : навч. посіб. / О.І. Шегедин, В.С. Маляр.; Львів : Магнолія 2006, 2012. – 167с.
20. Коруд, В.І. Електротехніка : підручник для ВНЗ / В.І. Коруд, О.Є. Гамола.; за заг. ред. В.І. Коруда.- 3-тє вид., перероб. і доп.- Львів:Магнолія, 2007.- 447с.
21. Мілих, В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник для ВНЗ/В.І. Мілих, О.О. Шавьолкін; за ред. В.І. Мілих.- К.: Каравела, 2007.- 688с.