

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Автоматизований пристрій для вимірювання діаметрів та міжцентрової віддалі отворів в корпусних деталях

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи РН-41  
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Нікулай Ю.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Наконечний Ю.І.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Апостол Ю.О.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Паламар М.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра приладів і контрольно-вимірювальних систем  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Паламар М.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка»  
(шифр і назва спеціальності)

здобувачу Ніколаю Юрію Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизований пристрій для вимірювання діаметрів та міжцентрової віддалі отворів в корпусних деталях.

Керівник роботи Наконечний Юрій Іванович, старший викладач  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 26 » травня 2026 року № 4/9-254

2. Термін подання здобувачем завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи корпусна деталь з двома отворами діаметром 80Н7 мм та міжцентровою віддалю 350 мм.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Проаналізувати існуючі методи і засоби вимірювання. 2. Розробити схему приладу.

3. Провести розрахунки вузлів і точності вимірювання. 4. Розробити математичну модель.

5. Розробити функціональну схему електронної частини.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Складальне креслення; кінематична схема; функціональна схема; розрахункова схема

розміщення вимірювальних перетворювачів; схема вимірювання.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Загально-технічна частина			
2. Конструкторська частина			
3. Спеціальна частина			
3.1. Математичне моделювання			
3.2. Мікропроцесорна техніка та електроніка			
4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці			

7. Дата видачі завдання 13 березня 2026 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи.	14.03.2026	
2	Огляд та аналіз існуючих методів і засобів вимірювання.	20.03.2026	
3	Обґрунтування вибору методу вимірювання.	29.03.2026	
4	Оформлення розділу «Загальнотехнічна частина».	3.04.2026	
5	Розроблення кінематичної та функціональної схеми.	11.04.2026	
6	Виконання розрахунків ключових вузлів приладу.	25.04.2026	
7	Оформлення розділу «Конструкторсько-технологічна частина».	28.04.2026	
8	Розроблення математичної моделі приладу.	4.05.2026	
9	Вибір елементної бази для електронної частини приладу.	6.05.2026	
10	Оформлення розділу «Спеціальна частина».	10.05.2026	
11	Аналіз умов праці оператора при роботі з пристроєм, розробка заходів з охорони праці та безпеки експлуатації.	16.05.2026	
12	Розроблення складального креслення.	5.06.2026	
13	Оформлення кваліфікаційної роботи.	14.06.2026	
14	Попередній захист кваліфікаційної роботи .	22.06.2026	
15	Захист кваліфікаційної роботи.	24.06.2026	

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Нікулай Ю.С.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Наконечний Ю.С.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Автоматизований пристрій для вимірювання діаметрів та міжцентрової віддалі отворів в корпусних деталях».

Обсяг кваліфікаційної роботи: пояснювальна записка – 61 аркушів формату А4, додатки – 8 аркушів формату А4, графічний матеріал – 5 аркушів формату А1.

Ключові слова: ВИМІРЮВАННЯ ДІАМЕТРУ, МІЖЦЕНТРОВА ВІДДАЛЬ, КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ, ОБРОБКА ДАНИХ.

Метою роботи є підвищення точності та продуктивності контролю геометричних параметрів виробів шляхом автоматизації процесу вимірювання. У роботі проведено аналіз існуючих методів і засобів контролю розмірів отворів, обґрунтовано вибір конструктивних та схемотехнічних рішень пристрою. Виконано розрахунки основних параметрів системи, досліджено точність вимірювань та оцінено похибки.

Розроблений пристрій забезпечує автоматичне зчитування, обробку та відображення результатів вимірювання, що дозволяє зменшити вплив людського фактору та підвищити достовірність контролю. Отримані результати можуть бути використані на підприємствах машинобудівної галузі для контролю якості деталей та оптимізації виробничих процесів.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА .....	9
1.1 Загальна характеристика завдання вимірювання міжцентрової віддалі та діаметрів отворів у корпусних деталях.....	9
1.2 Огляд існуючих методів вимірювання міжцентрової віддалі .....	10
1.3 Аналіз існуючих технічних рішень.....	13
1.4 Порівняльний аналіз розглянутих технічних рішень.....	21
1.5 Обґрунтування вибору прототипу та напрямків вдосконалення.....	22
2 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	24
2.1 Загальна характеристика конструкції приладу .....	24
2.2 Розрахунок похибок вимірювання .....	29
2.3 Розрахунок пружини притискання повзуна .....	32
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	36
3.1 Математичне моделювання.....	36
3.1.1 Визначення діаметрів отворів.....	38
3.1.2 Визначення міжцентрової відстані.....	40
3.1.3 Перетворення показів давачів у координати точок вимірювання .....	40
3.1.4 Загальний алгоритм обчислення параметрів.....	41
3.2 Мікропроцесорна техніка та електроніка .....	42
3.2.1 Вибір індуктивного давача.....	48
3.2.2 Схема узгодження для індуктивного давача.....	48
3.2.3 Вибір потенціометричного давача .....	51
3.2.4 Схема узгодження для потенціометричного давача.....	53

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....	57
4.1 Вимоги ергономіки до організації робочого місця оператора .....	57
4.2 Використання і опис дії систем пожежогасіння на підприємствах приладобудування.....	60
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	66
ДОДАТКИ.....	3

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Підвищення вимог до якості та взаємозамінності деталей машин у сучасному машинобудуванні зумовлює необхідність розробки та впровадження точних і продуктивних засобів вимірювального контролю. Корпусні деталі — корпуси редукторів, коробок передач, підшипникових опор — є базовими елементами більшості механізмів і визначають точність взаємного розташування всіх складових вузлів. Серед геометричних параметрів корпусних деталей міжцентрова віддаль між отворами та їх діаметри є найбільш відповідальними з точки зору забезпечення правильного функціонування механізму, оскільки їх відхилення від номінальних значень спричиняє нерівномірний розподіл навантаження на підшипники, погіршення умов зачеплення зубчастих передач і, як наслідок, передчасний вихід вузлів з ладу.

Традиційні ручні методи контролю міжцентрової віддалі (за допомогою штангенциркулів зі спеціальними губками, оправок та вимірювачів лінійних розмірів) є трудомісткими, залежать від кваліфікації оператора і не дозволяють забезпечити необхідну продуктивність та відтворюваність результатів в умовах серійного та масового виробництва. Водночас розвиток елементної бази мікроелектроніки, давачів лінійних переміщень і комп'ютерних засобів обробки інформації відкриває широкі можливості для створення автоматизованих вимірювальних приладів нового покоління. Таким чином, розробка автоматизованого приладу для одночасного вимірювання міжцентрової віддалі та діаметрів отворів у корпусних деталях є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності вимірювального контролю в машинобудівній галузі.

Метою дипломної роботи є розробка конструкції автоматизованого приладу для вимірювання міжцентрової віддалі та діаметрів отворів у корпусних деталях, що забезпечує підвищену точність і продуктивність контролю порівняно з існуючими аналогами. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: провести аналіз існуючих технічних рішень та обґрунтувати вибір прототипу;

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розробити принципову схему і конструкцію приладу; обґрунтувати вибір вимірювальних перетворювачів; розробити алгоритм обчислення координат центрів отворів, їх діаметрів і міжцентрової віддалі; провести аналіз похибок вимірювання.

Об'єкт дослідження — процес контактного вимірювання геометричних параметрів циліндричних отворів у корпусних деталях машинобудування.

Предмет дослідження — методи і засоби автоматизованого координатного вимірювання міжцентрової віддалі та діаметрів отворів із застосуванням електронних давачів переміщення та обчислювального блоку.

У роботі використано такі методи дослідження: порівняльний патентно-аналітичний — для вивчення існуючих технічних рішень і вибору прототипу; координатний метод вимірювання — для визначення положення центрів отворів через координати точок їх внутрішньої поверхні; метод аналітичної геометрії — для виведення залежностей обчислення діаметрів і міжцентрової віддалі за показаннями давачів; метод аналізу похибок — для оцінки впливу окремих елементів приладу на результуючу похибку вимірювання.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1 ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Загальна характеристика завдання вимірювання міжцентрової віддалі та діаметрів отворів у корпусних деталях

Корпусні деталі є однією з найбільш відповідальних груп виробів у машинобудуванні. Вони слугують базою для монтажу валів, підшипників, зубчастих передач та інших елементів механізмів, визначаючи точність їх взаємного розташування в просторі. До геометричних параметрів, що підлягають обов'язковому контролю при виготовленні та складанні корпусних деталей, насамперед відносяться міжцентрова віддаль (МЦВ) між отворами та їх діаметри. Відхилення цих параметрів від номінальних значень понад допустимі межі призводить до погіршення умов зачеплення зубчастих пар, нерівномірного навантаження на підшипники, виникнення паразитних вібрацій та передчасного зношування вузлів.

Міжцентрова віддаль — це відстань між геометричними осями двох або більше циліндричних отворів, що визначається як відстань між центрами їх поперечних перерізів. Залежно від конфігурації деталі отвори можуть мати паралельні, перпендикулярні або довільно орієнтовані осі, однак найчастіше у практиці машинобудування зустрічаються деталі з паралельними отворами. Саме такі деталі (корпуси редукторів, коробок передач, підшипникові опори) є типовими об'єктами контролю для приладів, що розглядаються в цій роботі.

Точність вимірювання МЦВ безпосередньо пов'язана з точністю визначення координат центрів отворів. Стандарти машинобудування («Допуски форми і розташування поверхонь», ISO 1101) нормують відхилення розташування осей у вигляді позиційних допусків, що вимагає від вимірювальних приладів забезпечення точності на рівні 1–5 мкм для відповідального виробництва і 5–15 мкм для серійного.

Задача автоматизації такого контролю є актуальною з кількох причин. По-перше, ручні методи вимірювання (за допомогою штангенциркулів зі

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

спеціальними губками, індикаторних нутромірів, калібрів тощо) є трудомісткими, залежать від кваліфікації оператора і не забезпечують необхідної відтворюваності результатів. По-друге, в умовах масового та серійного виробництва потрібний контроль 100% виробів без суттєвого збільшення часу виробничого циклу, що можливе лише при використанні автоматизованих засобів. По-третє, сучасні стандарти якості вимагають документування результатів вимірювань, статистичного аналізу процесів вимірювальних даних — завдань, що природно вирішуються засобами автоматизації.

## 1.2 Огляд існуючих методів вимірювання міжцентрової віддалі

Перш ніж перейти до аналізу конкретних патентних рішень, доцільно систематизувати основні методи вимірювання МЦВ, що застосовуються в промисловості. Усі відомі методи можна поділити на кілька груп залежно від принципу дії.

### Контактні механічні методи

Найбільш поширеними є контактні методи, при яких визначення координат осей отворів здійснюється шляхом механічного контакту вимірювальних елементів із внутрішньою поверхнею отворів. До цієї групи відносяться:

- вимірювання за допомогою кульових або конічних оправок, що вставляються в отвори, з подальшим виміром відстані між їх зовнішніми поверхнями і розрахунком МЦВ через відомі радіуси оправок;
- застосування центраторів з розрізними втулками, що самоустановлюються в отворах і задають положення осей для вимірювача лінійних розмірів;
- використання кулькових вимірювальних головок (нутромірів), що фіксують діаметр у трьох або більше точках по колу і дозволяють обчислити координати центра;

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- координатні вимірювальні машини (КВМ) з контактними щупами — найбільш точний і універсальний, але дорогий метод, що вимагає значного часу на вимірювання.

#### Безконтактні та комбіновані методи

Розвиток сенсорної техніки і комп'ютерного зору відкрив можливості для безконтактних вимірювань МЦВ. До таких методів відносяться:

- оптичні методи на основі мікроскопів та проекторів профілю, що дозволяють визначати центри отворів по зображенню їх країв;
- лазерна триангуляція для вимірювання відстаней між контрольними точками;
- пневматичні методи, що використовують зміну тиску повітря при зміні зазору між соплом і поверхнею отвору для визначення діаметра і положення осі;
- комбіновані системи, що поєднують контактні вимірювальні перетворювачі з електронними засобами обробки сигналів і обчислення результатів.

Останні є предметом основного інтересу в контексті цієї роботи, оскільки вони поєднують надійність механічного контакту з точністю і швидкодією електронної обробки даних, що особливо важливо для автоматизованого контролю в умовах серійного виробництва.

### 1.3 Аналіз існуючих технічних рішень

Авторське свідоцтво №1634978 описує «Пристрій для контролю міжцентрового відстані отворів».

Конструктивна схема пристрою ґрунтується на застосуванні центраторів оригінальної конструкції. Кожен центратор виконаний у вигляді стакану, закритого з одного торця пробкою. В середині стакану з можливістю осьового

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переміщення за рахунок пружини і прокладки розміщена розрізна втулка. Така втулка при введенні в отвір деталі самоустановлюється, рівномірно притискаючись своїми сегментами до внутрішньої циліндричної поверхні. Це дозволяє компенсувати невеликі відхилення форми отвору від ідеального циліндра і забезпечує точне суміщення осі центратора з геометричною віссю отвору.

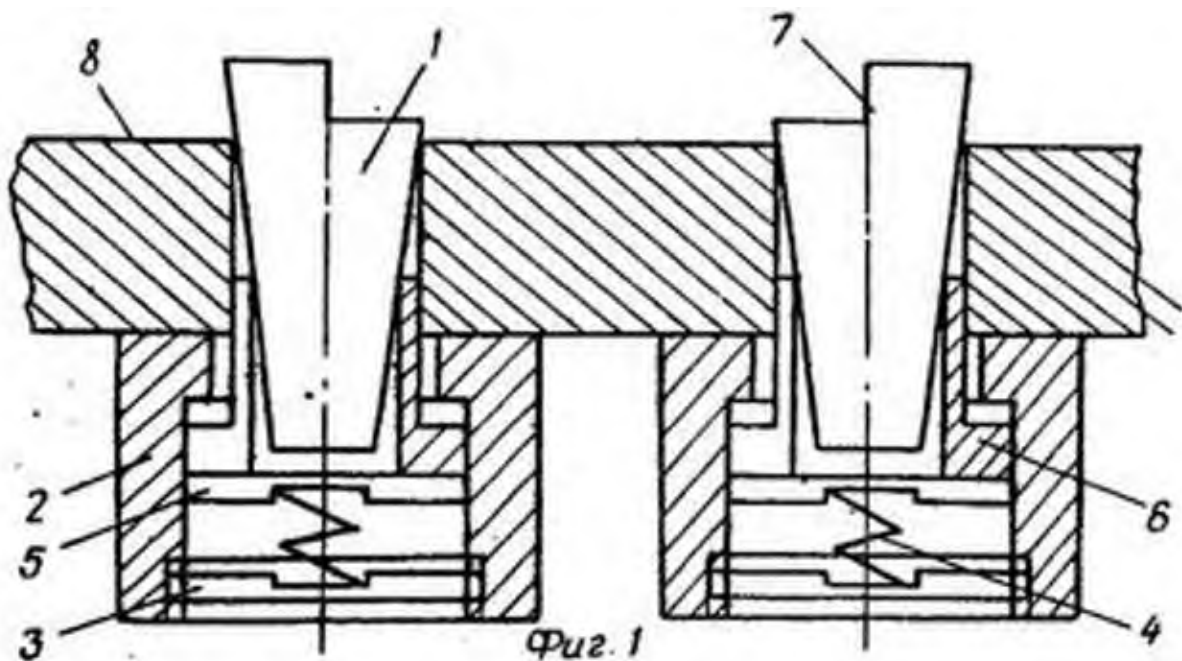


Рисунок 1.1 – Схема пристрою з свідоцтва №1634978

З протилежного боку від центраторів в отвори контрольованої деталі встановлюються конічні оправки, що мають на своїй основі лиску. Ця лиска слугує базовою поверхнею для взаємодії з вимірювачем лінійних розмірів (штангелем або іншим прецизійним інструментом). Таким чином, вимірювач фіксує відстань між двома точками — базовими поверхнями конічних оправок, встановлених у відповідних отворах, — що після введення поправки на геометричні параметри оправок дає значення міжцентрової відстані.

Важливою перевагою даного технічного рішення, підкресленою в описі до свідоцтва, є розширення функціональних можливостей — пристрій дозволяє проводити контроль не лише двох, а й групи отворів шляхом послідовного або

						КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			14

одночасного введення центраторів. Завдяки цьому можна контролювати взаємне розташування кількох отворів, наприклад у фланцевих з'єднаннях або деталях з рядом отворів під кріплення, що значно підвищує практичну цінність пристрою для серійного виробництва.

До переваг конструкції за А.С. №1634978 відносяться: відносна простота конструкції і невисока вартість виготовлення; можливість самоустановлення центраторів у отворах різних діаметрів у певному діапазоні; відтворюваність результатів при правильному налаштуванні; можливість контролю групи отворів.

Водночас пристрій має суттєві недоліки, що обмежують сферу його застосування. Механічний контакт різної втулки з поверхнею отвору супроводжується силами тертя, які можуть зміщувати центратор відносно осі отвору, особливо при наявності забруднень або шорсткості поверхні вище певного рівня. Використання пружинних елементів ускладнює конструкцію і є джерелом додаткових похибок через нелінійність характеристик пружини і її гістерезис. Пристрій практично не піддається автоматизації — введення центраторів, їх позиціонування і знімання деталі виконуються вручну, що обмежує продуктивність контролю. Крім того, відсутність вбудованого обчислювального блоку вимагає ручного розрахунку МЦВ за результатами вимірювань, що збільшує ймовірність помилок.

Авторське свідоцтво №1640520 описує «Контрольно-вимірювальний прилад для перевірки міжцентрової відстані».

Пристрій орієнтований на вирішення завдання прецизійного контролю положення осей у корпусних деталях машинобудівного виробництва.

Принциповою конструктивною особливістю даного приладу є застосування плаваючої рами — механізму компенсації похибок базування деталі. При встановленні контрольованої деталі на базові елементи приладу неминуче виникають похибки позиціонування, пов'язані з неточністю виготовлення базових поверхонь деталі, забрудненням, деформаціями тощо. Плаваюча рама, з'єднана з базовими елементами через пружні або кінематичні зв'язки, здатна компенсувати

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

ці систематичні похибки, забезпечуючи більш точне вимірювання істинних геометричних відхилень.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

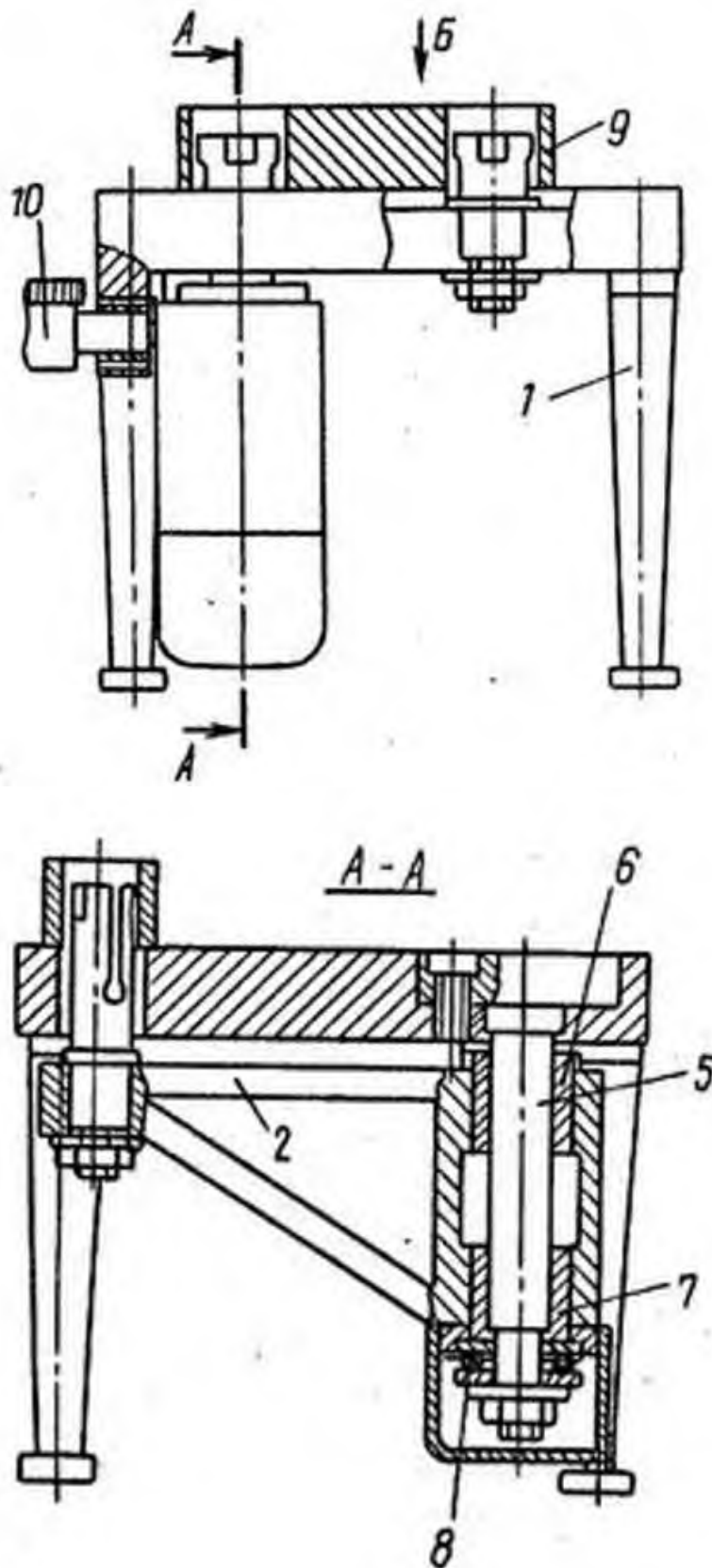


Рисунок 1.2 – Схема пристрою з свідоцтва №1640520

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 030.00.00.000 ПЗ

Арк.

17

Принцип роботи полягає в наступному. Після встановлення деталі розрізна (або конічна) вимірювальна пробка вводиться в контрольовану зону отвору. За рахунок пружних елементів або кінематичних зв'язків пробка розкривається до контакту із внутрішньою поверхнею отвору. Будь-які відхилення форми або розміру отвору від номінального викликають переміщення елементів пробки, яке через механізм передачі потрапляє на відліковий пристрій — стрілочний індикатор або цифровий дисплей. Можливість обертання вимірювальних вузлів дозволяє перевіряти геометричні параметри по різних діаметральних напрямках без переустановлення деталі, що суттєво прискорює процес контролю.

Принципово важливою перевагою конструкції за А.С. №1640520 є підвищена точність за рахунок самоустановлення вимірювальних елементів і механічної компенсації перекосів. Плаваюча рама забезпечує незалежність результату вимірювання від похибок базування, що є значним кроком вперед порівняно з конструкціями, де деталь жорстко фіксується у визначеному положенні. Зручність і швидкість зчитування результатів, можливість контролю різних розмірів і форм отворів у певному діапазоні роблять прилад достатньо універсальним.

До недоліків конструкції відносяться відносна складність кінематичної схеми з наявністю рухомих і пружних елементів, що зношуються в процесі експлуатації. Потреба в точному налаштуванні під конкретний розмір і конфігурацію деталі збільшує час переналагодження при зміні номенклатури. При значному зношуванні або забрудненні контактних поверхонь точність вимірювань знижується, причому виявити цей факт без метрологічного контролю приладу складно. Відсутність вбудованого обчислювального блоку також є обмеженням для автоматизованої реєстрації та обробки результатів.

Авторське свідоцтво №1601499 описує «Пристрій для вимірювання міжцентрової відстані отворів».

Пристрій призначений для контролю міжцентрових відстаней і діаметрів отворів із паралельними осями. Метою винаходу проголошено підвищення

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точності, продуктивності та розширення функціональних можливостей за рахунок вимірювання діаметрів отворів.

Конструктивна схема пристрою є суттєво складнішою порівняно з описаними вище аналогами. Пристрій містить корпус із двома основами, на яких розміщені кулькові напрямні. Вздовж напрямних переміщуються каретки з вимірювальними головками. Кожна вимірювальна головка являє собою циліндричну пробку, всередині якої на рухомих важелях змонтовані вимірювальні наконечники. Важелі встановлені на шарнірах і взаємодіють з давачами переміщення — лінійними вимірювальними перетворювачами.

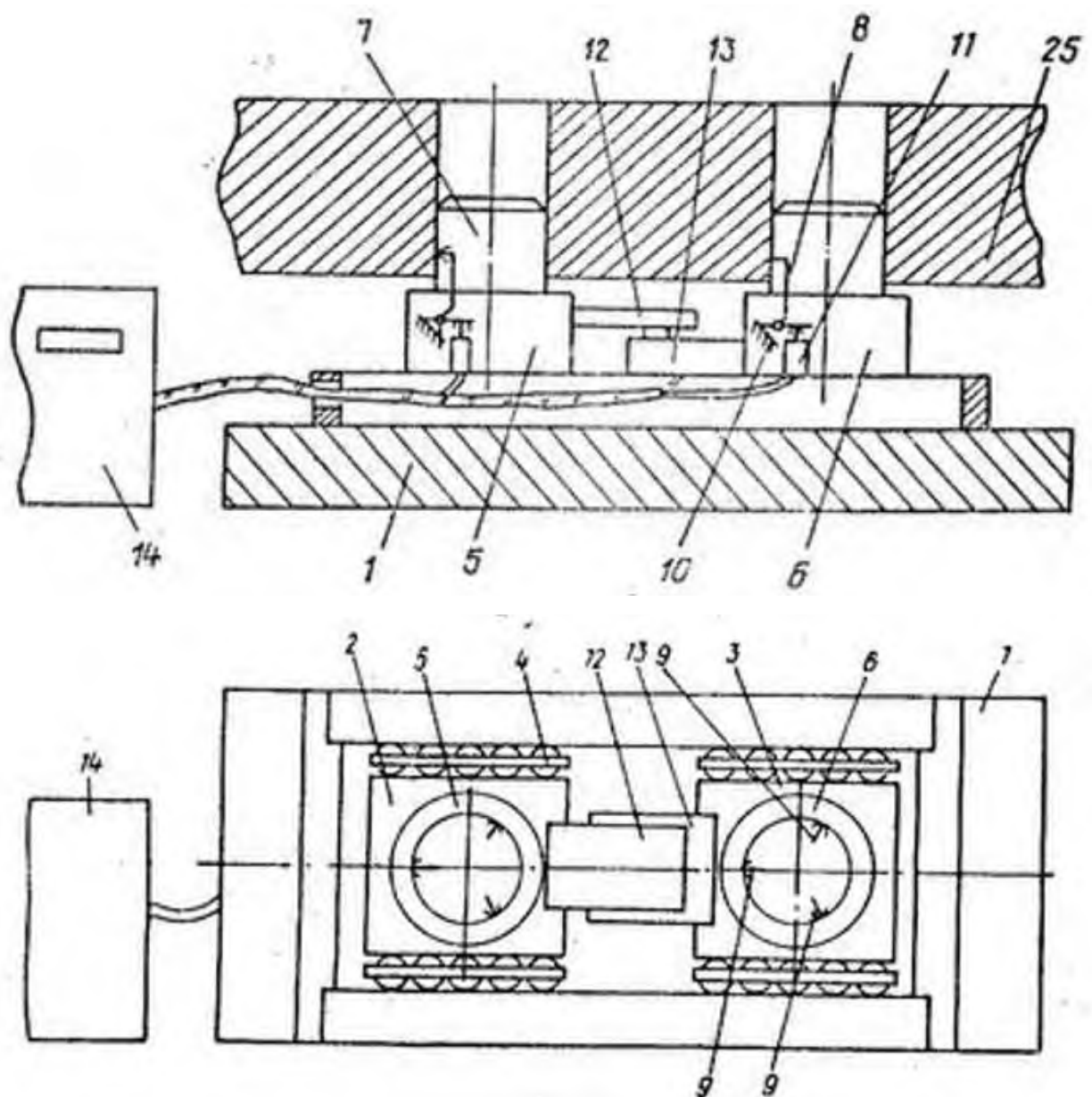


Рисунок 1.3 – Схема пристрою з свідоцтва №1601499

						КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			19

Ключовою конструктивною особливістю є розміщення трьох вимірювальних блоків рівномірно по периметру кожної пробки. Кожен блок складається з важеля з наконечником і давача. Вимірювальні блоки мають можливість одночасного рівномірного переміщення в радіальному напрямку за рахунок конуса, що переміщується всередині пробки: при осьовому переміщенні конуса всі три важелі розходяться або сходяться синхронно. Положення конуса фіксується гайкою після налаштування на розмір контрольованого отвору.

Вимірювальні головки з'єднані між собою засобом вимірювання відстані між їхніми осями, що складається з повзунка і електронної координатної лінійки. Давачі переміщення і координатна лінійка електрично з'єднані з електронним обчислювальним блоком.

Пристрій працює таким чином. Кожна вимірювальна головка налаштовується на прохідний діаметр відповідного отвору шляхом переміщення конуса. Після цього пробки вводяться в отвори деталі, і вимірювальні наконечники контактують із поверхнями отворів у трьох рівномірно розподілених точках. Відносне положення повзунка і координатної лінійки, що встановлюється при вимірюванні, разом із показаннями давачів наконечників, передається до електронного обчислювального блоку.

В обчислювальному блоці здійснюється розрахунок координат центрів отворів і міжцентрової відстані за аналітичними залежностями. Координати центра кожного отвору обчислюються через координати трьох вимірюваних точок на його внутрішній поверхні методом вписаного кола. Міжцентрова відстань визначається як відстань між обчисленими координатами центрів з урахуванням показань координатної лінійки. Діаметр кожного отвору обчислюється через ті ж самі координати вимірюваних точок.

При цьому враховуються кути встановлення давачів відносно осі, що проходить через центри головок, що дозволяє визначити компоненти переміщень наконечників по осях координат і підвищує точність просторових вимірювань. Формули, реалізовані в обчислювальному блоці.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Серед переваг пристрою за А.С. №1601499 необхідно виділити такі. Висока точність досягається завдяки застосуванню чутливих електронних давачів лінійних переміщень і обчислювальній обробці результатів за аналітичними формулами, що дозволяє уникнути систематичних похибок, характерних для механічних схем відліку. Одночасне вимірювання діаметрів і МЦВ суттєво підвищує продуктивність контролю порівняно з послідовними методами. Автоматизація обчислень усуває людський фактор при розрахунку результату і дозволяє отримувати числові значення параметрів у реальному масштабі часу без ручного розрахунку. Система також придатна для реалізації багатоточкових вимірювань і статистичного накопичення даних для контролю якості технологічного процесу.

Серед недоліків слід зазначити значну конструктивну складність і, як наслідок, більш високу вартість виготовлення порівняно з механічними аналогами. Необхідність калібрування давачів і перевірки координатної лінійки вимагає наявності відповідного метрологічного забезпечення і кваліфікованого персоналу. Точність системи суттєво залежить від стабільності роботи вимірювальних перетворювачів і є чутливою до зовнішніх дестабілізуючих факторів — температурних змін, вібрацій від суміжного обладнання, забруднення контактних поверхонь наконечників.

#### 1.4 Порівняльний аналіз розглянутих технічних рішень

Для систематизованого порівняння трьох розглянутих авторських свідоцтв і обґрунтування вибору прототипу для дипломної роботи складемо зведену порівняльну таблицю за ключовими критеріями оцінки вимірювальних систем.

Аналіз таблиці 1.1 показує, що пристрій за А.С. №1601499 перевершує аналоги за сукупністю найбільш значущих критеріїв — точністю, функціональністю та потенціалом до автоматизації. Два інших рішення

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

(№1634978 та №1640520) є менш складними, але і менш можливостей надають у контексті автоматизованого виробничого контролю.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика розглянутих патентних рішень

Критерій оцінки	А.с. №1634978	А.с. №1640520	А.с. №1601499
Точність вимірювання	Середня	Вище середньої	Висока
Вимірювання діаметрів отворів	Ні	Частково	Так
Автоматизація обчислень	Ні	Ні	Так
Компенсація похибок базування	Часткова	Так (плаваюча рама)	Так (3 точковий контакт)
Продуктивність контролю	Низька	Середня	Висока
Складність конструкції	Низька	Середня	Висока
Потенціал автоматизації	Низький	Середній	Високий
Можливість контролю групи отворів	Так	Обмежена	Так

### 1.5 Обґрунтування вибору прототипу та напрямків вдосконалення

За результатами проведеного порівняльного аналізу для виконання кваліфікаційної роботи бакалавра за основу (прототип) обрано авторське свідоцтво №1601499 «Пристрій для вимірювання міжцентрової відстані отворів».

Вибір цього прототипу обґрунтовується такими міркуваннями. По-перше, реалізований у ньому координатний метод вимірювання з використанням

електронних давачів є концептуально сучасним і відповідає тенденціям розвитку вимірювальної техніки — переходу від суто механічних до мехатронних систем. По-друге, на відміну від інших розглянутих аналогів, цей пристрій здатний одночасно вимірювати як міжцентрову відстань, так і діаметри отворів, що відповідає постановці завдання дипломної роботи. По-третє, наявність електронного обчислювального блоку забезпечує принципову можливість подальшої автоматизації процесу вимірювання — підключення до ПЕОМ, реалізації алгоритмів статистичного контролю якості, виведення даних на принтер або в систему управління виробництвом.

Разом із тим аналіз прототипу виявив ряд напрямків, що потребують вдосконалення при розробці власної конструкції приладу:

- підвищення ступеня автоматизації процесу вимірювання — автоматичне введення вимірювальних головок в отвори, автоматичне налаштування на розмір, автоматична розвантаження деталі;
- вдосконалення алгоритму обчислення координат центрів отворів для підвищення точності при наявності похибок форми (відхилень від правильної циліндричної форми);
- покращення захисту давачів і механічних елементів від забруднення мастилом і металевим пилом в умовах цехового виробництва;
- реалізація інтерфейсу виведення результатів вимірювань для інтеграції з системами статистичного управління процесом (SPC) і документування результатів;
- оптимізація конструкції механізму синхронного переміщення вимірювальних блоків для підвищення надійності та зменшення зносу контактних поверхонь.

Вирішення перелічених задач при збереженні принципових переваг прототипу становить основний зміст конструкторської та дослідницької частини дипломної роботи.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 2 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Загальна характеристика конструкції приладу

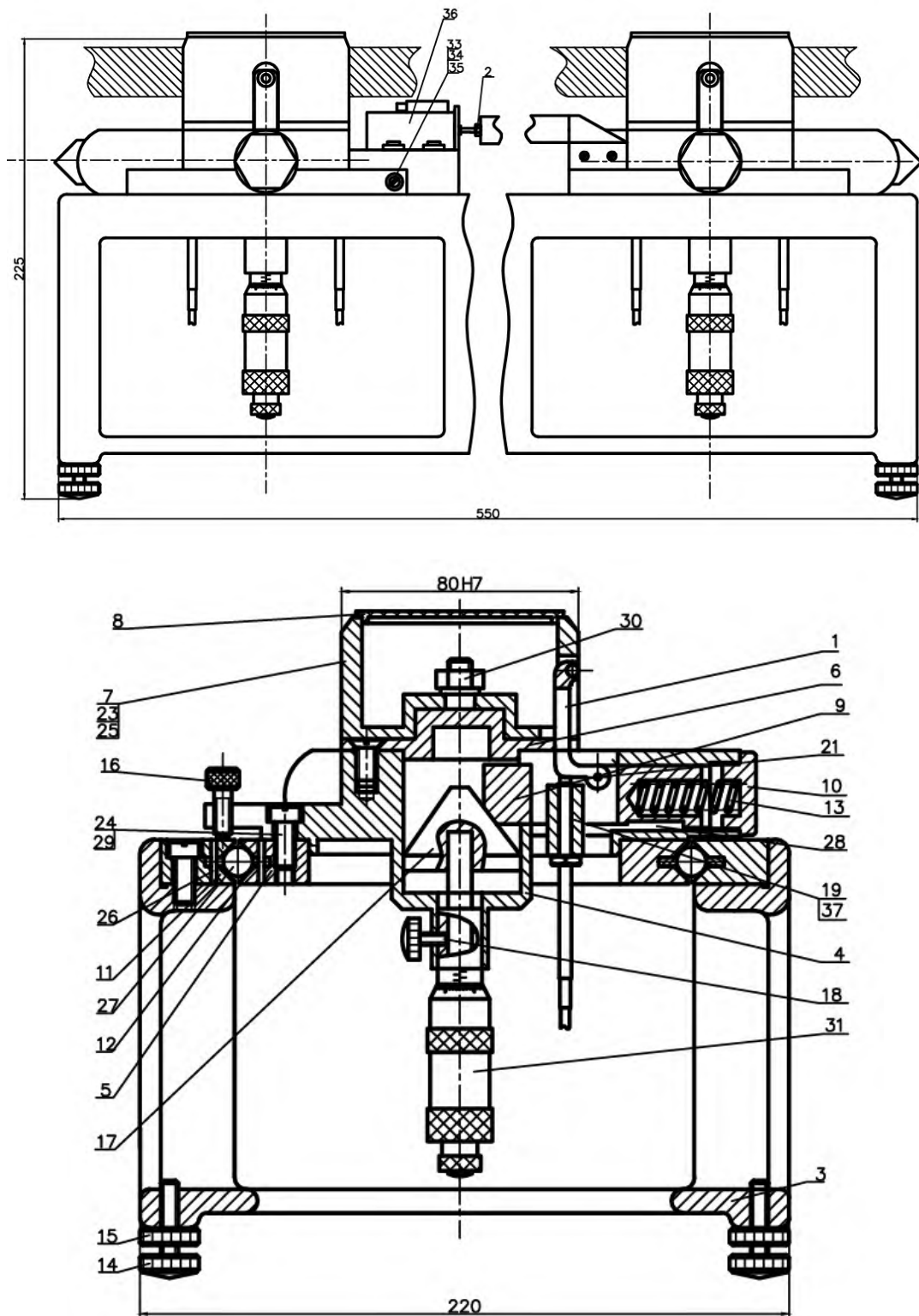


Рисунок 2.1 – Схема приладу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 030.00.00.000 ПЗ

Арк.

24

Вимірювальний прилад для визначення геометричних параметрів отворів є функціонально завершеним пристроєм, що поєднує точну механіку, сучасну електроніку та програмне забезпечення. Такий підхід до конструювання дозволяє реалізувати широкий спектр контрольних-вимірювальних операцій в умовах машинобудівного виробництва, забезпечуючи надійне та стабільне отримання результатів.

В корпусі розміщені всі основні функціональні вузли: вимірювальні пробки 7, каретки 5, важелі 1 з наконечниками, індуктивні давачі сили 37 та потенціометричний давач 36. Взаємне розташування цих компонентів визначається конструктивною схемою, що забезпечує їх скоординовану та надійну взаємодію протягом усього циклу вимірювання.

Конструкція приладу базується на модульній архітектурі, що суттєво спрощує обслуговування та ремонт. Кожен функціональний блок може бути замінений або відкалібрований незалежно від інших, що знижує витрати на підтримку приладу в робочому стані та скорочує час простою обладнання.

Електронний блок відповідає за збір, первинну обробку та відображення вимірювальної інформації. Він отримує сигнали від обох давачів, виконує математичні розрахунки та формує результат у форматі, зручному для оператора. Вбудований мікропроцесор забезпечує швидку обробку даних у реальному часі, що дозволяє проводити серійні вимірювання з мінімальними затримками між циклами.

#### Базування контрольованої деталі та кінематика переміщень

Правильне базування контрольованої деталі є ключовою умовою отримання достовірних результатів вимірювання. У даному приладі базування здійснюється шляхом встановлення деталі безпосередньо на вимірювальні пробки, що значно спрощує процедуру позиціонування та усуває потребу в додаткових пристосуваннях. Така схема базування водночас є початковим етапом

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

вимірювання, оскільки пробки одразу займають положення, необхідне для визначення параметрів отворів.

Вимірювальні пробки змонтовані на каретках 5, які переміщуються в лінійному напрямку вздовж корпусу приладу. Діапазон переміщення кожної каретки обмежений штифтом, що виключає вихід рухомих елементів за межі робочої зони. Такий підхід захищає механізм від пошкоджень при помилковому встановленні деталей нестандартних розмірів.

Переміщення кареток відбувається по направляючих із кульковими елементами 27, що забезпечують мінімальне тертя та плавний хід. Завдяки цьому навіть незначні зусилля з боку контрольованої деталі призводять до точного позиціонування вимірювальних пробок. Конструкція направляючих розрахована на тривалу експлуатацію без зміни геометричних характеристик.

Положення кареток фіксується потенціометричним давачем, який забезпечує точне визначення координат кожного вимірювального модуля відносно базової площини приладу. Зібрана інформація передається до електронного блоку, де перетворюється на дані про міжцентрові відстані між отворами деталі. Алгоритм обробки враховує геометрію розміщення давачів.

### Конструктивні особливості вимірювальних блоків

Вимірювальні блоки є ключовими структурними елементами приладу, що безпосередньо контактують із контрольованою деталлю. Кожен блок являє собою самодостатню прецизійну одиницю, що включає пробку та важелі з наконечниками. Конструкція блоків розроблена з урахуванням необхідності забезпечення стабільного контакту з поверхнею отвору в широкому діапазоні геометричних відхилень.

Важелі всередині кожної пробки закріплені через шарніри, що надає їм можливість вільного переміщення. Така схема дозволяє наконечникам, встановленим на важелях, автоматично підлаштуватись до реальної форми

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

поверхні отвору, навіть якщо вона відрізняється від ідеальної циліндричної. Завдяки шарнірному з'єднанню зусилля контакту розподіляється рівномірно, що знижує ризик локального пошкодження поверхні.

Наконечники важелів виготовлені з твердих зносостійких матеріалів, що забезпечує тривалий ресурс роботи без зміни геометрії контактної зони. Форма наконечників підібрана таким чином, щоб мінімізувати похибку від пружної деформації в точці контакту. Під час вимірювання наконечники, ковзаючи по внутрішній поверхні отвору, можуть відхилятися від початкового положення залежно від поверхні і форми отвору, це відхилення фіксують індуктивні давачі.

З'єднання пробки з кареткою реалізоване через посадочне гніздо з точно обробленими поверхнями сполучення. Це забезпечує високу повторюваність встановлення пробок при їх заміні або переналагодженні. Конструкція передбачає можливість швидкого демонтажу пробки без застосування спеціального інструменту, що скорочує час переналагодження між партіями деталей різних типорозмірів.

Матеріали, що використовуються у вимірювальних блоках, відповідають вимогам метрологічного обладнання щодо температурної стабільності та корозійної стійкості. Усі тертьові поверхні пройшли термічну обробку та фінішне шліфування для досягнення необхідної точності геометрії та зниження тертя. Сукупність цих конструктивних рішень визначає метрологічні можливості приладу та його надійність в умовах серійного виробництва.

#### Елементи фіксації та центрування

Система фіксації та центрування є одним із найбільш відповідальних функціональних вузлів приладу, оскільки від її точності безпосередньо залежить якість базування вимірювальних пробок. Конструктивно ця система включає пружини 13, кришки пробок 8, мікрометричні гвинти 31, стопорні 18.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пружини забезпечують постійне притискання важелів до внутрішньої поверхні отвору. Кришки, в свою чергу, виконують подвійну роль: вони захищають внутрішній механізм пробки від потрапляння забруднень та одночасно є напрямними елементами, що визначають правильне осьове положення рухомих частин. Зусилля має бути достатнім для надійного контакту, але не настільки великим, щоб спотворювати форму м'яких поверхонь.

Центрування пробок здійснюється за допомогою фасок на пробці. Така схема центрування забезпечує точне суміщення осі пробки з віссю контрольованого отвору і виключає перекося, які могли б призвести до систематичної похибки вимірювання.

Фіксація пробки в заданому положенні досягається шляхом затягування гайки 30, яка жорстко утримує пробку в посадочному місці каретки. Після фіксації гайки жорсткість системи різко зростає, що є необхідною умовою для отримання стабільних результатів вимірювань.

Конус 17 усередині пробки встановлюється в точно задане осьове положення за допомогою мікрометричного гвинта 31. Положення конуса визначає ступінь розкриття важелів, а отже — ефективний діаметр вимірювання.

### Принцип роботи та метрологічні характеристики

Функціонування приладу розпочинається з підготовчого етапу — налаштування вимірювальних пробок відповідно до номінального діаметра отворів контрольованої партії деталей. Для цього за допомогою мікрометричного гвинта встановлюється осьове положення конуса, яке визначає розкриття важелів. Налаштування здійснюється за еталонним зразком з відомим діаметром. Процедура є відносно швидкою і не потребує кваліфікованого метрологічного персоналу — достатньо слідувати інструкції, яка відображається на екрані електронного блоку.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

У процесі вимірювання пробки вводяться в отвори контрольованої деталі, а важелі, обертаючись навколо шарнірів, вступають у контакт з внутрішньою поверхнею. Індуктивний давач фіксує відносне положення важеля, яке відповідає фактичному діаметру отвору. Одночасно потенціометричний давач реєструє просторове положення осей обох вимірювальних пробок. Обидва типи сигналів передаються до електронного блоку в режимі реального часу.

Обробка вимірювальної інформації включає розрахунок діаметрів і міжцентрової віддалі отворі, і порівняння отриманих значень з допусками, занесеними до пам'яті блоку. Прилад автоматично класифікує деталі як придатні або непридатні. Такий підхід не лише забезпечує контроль якості, а й надає інформацію для аналізу стабільності технологічного процесу.

Метрологічні характеристики приладу відповідають сучасним вимогам точного машинобудування. Роздільна здатність давача діаметру та давача міжцентрової віддалі узгоджена з допусками деталей, що контролюються. Завдяки комплексному застосуванню прецизійних механічних компонентів, точних сенсорів та спеціалізованого програмного забезпечення прилад забезпечує стабільну відтворюваність результатів у змінних умовах виробничого середовища.

## 2.2 Розрахунок похибок вимірювання

При аналізі точності вимірювального пристрою розрахунку підлягають усі складові похибки, що впливають на достовірність результатів вимірювання. До їх складу належать як систематичні, так і випадкові похибки — незалежно від характеру їх виникнення та типу джерела. В процесі функціонування приладу обидва види похибок проявляються сумісно, тому результуюча похибка може бути знайдена сумуванням відповідних складових:

$$\sum \delta = \delta_{\text{сист}} + \delta_{\text{вип}}$$

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

У даному випадку випадкові похибки виключаються з розгляду, оскільки їх мінімізація досягається конструктивними заходами. Розрахунок ведеться лише для систематичних складових похибки.

Чистота поверхні важеля після тонкого шліфування відповідає Ra 0,32 мкм згідно з ГОСТ 2789-73. Дана шорсткість є достатньо малою і не справляє відчутного впливу на точність вимірювання, тому при подальших розрахунках ця складова похибки не враховується:

$$\delta_{\text{шорст}} = 0$$

Для вимірювання діаметрів отворів застосовуються індуктивні давачі з точністю вимірювання 5 мкм. Показання передаються на вимірювальну точку через важільний механізм із співвідношенням плечей 3 : 1, де плече від давача до наконечника є втричі довшим за плече від шарніра до давача. Відповідно до закону важеля, похибка давача трансформується у похибку вимірювання наконечника з коефіцієнтом передачі:

$$K = \frac{l_1}{l_2} = \frac{3}{1} = 3$$

де  $l_1$  — плече від давача до наконечника;  $l_2$  — плече від шарніра до давача.

Похибка індуктивного давача, приведена до точки вимірювання через важіль:

$$\delta_{\text{сис}} = \delta_{\text{датч}} \cdot K = 5 \cdot 3 = 15 \text{ мкм}$$

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

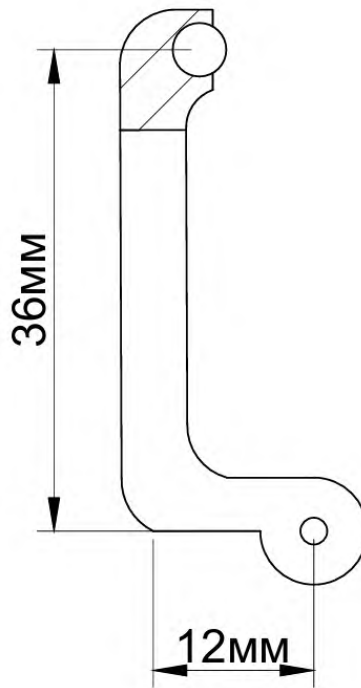


Рисунок 2.2 – Схема важеля вимірювальної пробки

Похибка переміщення каретки зумовлена якістю обробки контактних поверхонь направляючих. Завдяки застосуванню кулькових направляючих із прецизійно шліфованими поверхнями та використанню мастила ця складова є незначною та враховується у складі загальної похибки потенціометричного давача.

Для вимірювання міжцентрової відстані між отворами застосовується потенціометричний давач із точністю 5 мкм. Цей давач з'єднаний безпосередньо з повзунком без додаткових важільних передач, тому коефіцієнт передачі дорівнює одиниці і похибка давача передається без перетворення:

$$\delta_{\text{пот}} = 5 \text{ мкм}$$

Похибка мікрометричного гвинта не враховується у загальному балансі похибок приладу, оскільки він не бере безпосередньої участі у вимірюванні контрольованих параметрів деталі. Мікрометричний гвинт застосовується виключно для початкового налаштування положення конуса на прохідний діаметр отвору. Після фіксації конуса стопорним елементом вплив гвинта на результат вимірювання є відсутнім:

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta_{\text{мікр}} = 0$$

Загальна похибка приладу визначається сумуванням усіх врахованих систематичних складових: похибок індуктивних давачів, приведених до точки вимірювання через важіль, та похибки потенціометричного давача міжцентрової відстані.

$$\sum \sqrt{\delta^2} = \sqrt{(\delta_{\text{інд}}^2 + \delta_{\text{пот}}^2)} = \sqrt{(15^2 + 5^2)} = 15,8 \text{ мкм}$$

Таким чином, максимальна сумарна систематична похибка приладу при лінійному підсумовуванні складає 15,8 мкм.

### 2.3 Розрахунок пружини притискання повзуна

На основі конструктивних вимог до механізму притискання повзуна приймаємо наступні початкові параметри пружини:

- зовнішній діаметр:  $D = 10 \text{ мм}$
- найбільше робоче зусилля:  $P_2 = 2,5 \text{ кг}$
- хід пружини:  $h = 14 \text{ мм}$

Ці параметри задаються виходячи з розмірів посадкового місця, необхідного зусилля затиску та ходу механізму.

Зусилля притискання пружини  $P_2$  приймаємо рівним 2,5 кг на основі аналізу аналогічних конструкцій вимірювальних головок для контролю отворів, де робоче зусилля контакту наконечника з поверхнею деталі зазвичай лежить у діапазоні 1,5–3 кг. Таке значення забезпечує стабільний, безлюфтовий контакт наконечника важеля з поверхнею отвору протягом усього циклу вимірювання, не спричиняючи при цьому помітної пружної деформації контактної поверхні деталі (сталь, чавун), що могла б внести похибку у результат. Водночас обране зусилля залишається достатньо помірним, щоб не ускладнювати введення вимірювальної пробки в

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

отвір та виведення її після вимірювання, а також не призводить до прискореного зносу наконечників важелів.

Відповідно до значень  $D = 10$  мм та  $P_2 = 2,5$  кг, за ГОСТ 13766-78 (пружини гвинтові циліндричні стиску) вибираємо пружину стиску 1 класу, 1 розряду. Клас 1 відповідає відносно невеликим робочим деформаціям (до 30 % від максимальної), розряд 1 – найменшому індексу пружини в цьому класі.

Для обраної пружини стандарт задає такі табличні характеристики:

- сила стиску при максимальній деформації:  $P_3 = 2,8$  кг
- зовнішній діаметр:  $D = 10$  мм
- діаметр дроту:  $d = 1$  мм
- жорсткість одного витка:  $z_1 = 1,375$  кг/мм
- найбільший прогин одного витка:  $f_3 = 2,041$  мм

Жорсткість пружини (зусилля на одиницю деформації) визначається за формулою:

$$z = \frac{(P_1 - P_2)}{h}$$

де:

- $P_2 = 2,5$  кг: робоче зусилля пружини;
- $P_1 = 1,75$  кг: зусилля попередньої деформації (попереднє підтискання);
- $h = 14$  мм: робочий хід пружини (різниця між робочою та попередньою деформацією).

Зазвичай  $P_1 = (0,5..0,7) \cdot P_2$ ; тут  $P_1 = 1,75$  кг  $\approx 0,7 \cdot P_2$ .

$$z = \frac{(2.8 - 1.75)}{14} = 0.0536 \frac{\text{кг}}{\text{мм}}$$

Число робочих витків пружини визначається як відношення жорсткості одного витка (табличне значення зі стандарту) до загальної жорсткості пружини:

$$z = \frac{z_1}{z} = \frac{1.372}{0.0536} \approx 25.5 \text{ витків}$$

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Чим менша загальна жорсткість  $z$  порівняно з жорсткістю одного витка  $z_1$ , тим більше витків потрібно для забезпечення заданої м'якості пружини. Кількість витків – дробова, тому далі уточнюємо жорсткість.

Оскільки розрахункове число витків є дробовим, приймаємо  $n = 25,5$  витків і уточнюємо фактичну жорсткість пружини:

$$z_{\text{уточ}} = \frac{z_1}{n} = \frac{1.372}{25.5} = 0.0538 \frac{\text{кг}}{\text{мм}}$$

Уточнена жорсткість незначно відрізняється від розрахункової (0,0538 проти 0,0536 кг/мм), що є допустимим. Саме це значення використовується у всіх подальших розрахунках.

Повне число витків пружини включає робочі витки та опорні (нерухомі) витки, які не беруть участі у пружній деформації:

$$n_1 = n + n_3 = 25.5 + 1.5 = 27 \text{ витків}$$

$n_2 = 1,5$  – число опорних витків. Для пружин стиску з підшліфованими торцями стандарт рекомендує  $n_2 = 1,5$  (по 0,75 витка з кожного кінця). Опорні витки забезпечують рівномірний розподіл навантаження та стійкість пружини.

Середній діаметр пружини (діаметр, по якому розташована вісь витка):

$$D_0 = D - d = 10 - 1 = 9 \text{ мм}$$

Визначаємо деформації пружини при трьох характерних навантаженнях (по уточненій жорсткості  $z_{\text{ут}} = 0,0538$  кг/мм):

Деформація при попередньому навантаженні  $P_1$ :

$$F_1 = \frac{P_1}{z} = \frac{1.75}{0.0538} = 32.5 \text{ мм}$$

Деформація при робочому навантаженні  $P_2$ :

$$F_2 = \frac{P_2}{z} = \frac{2.5}{0.0538} = 46.5 \text{ мм}$$

Деформація при максимальному навантаженні  $P_3$ :

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$F_3 = \frac{P_1}{z} = \frac{2.8}{0.0538} = 52 \text{ мм}$$

Визначаємо геометричні висоти пружини в різних станах. Висота при максимальній деформації (витки торкаються):

$$H_3 = (f_3 + d - n_2) = (27 + 1 - 1.5) = 26.5 \text{ мм}$$

Це мінімальна (блокова) висота пружини. Формула враховує, що при стисканні до блоку: кількість щілин між витками дорівнює кількості робочих витків, а опорні витки вже підшліфовані.

Висота у вільному стані:

$$H_0 = H_3 + F_3 = 52 + 26.5 = 78.5 \text{ мм}$$

Довжина пружини у вільному (нестиснутому) стані. Дорівнює блоковій висоті плюс максимальна деформація.

Висота при попередньому навантаженні  $P_1$ :

$$H_1 = H_0 - F_1 = 78.5 - 32.5 = 46 \text{ мм}$$

Висота при робочому навантаженні  $P_2$ :

$$H_2 = H_0 - F_2 = 78.5 - 46.5 = 32 \text{ мм}$$

$H_1$  та  $H_2$  – висоти пружини у встановленому стані та в кінці робочого ходу відповідно. Ці значення необхідні для перевірки компоновки конструкції: пружина повинна вміщатися у відведений простір при будь-якому положенні повзуна/

Крок пружини (відстань між осями сусідніх витків у вільному стані):

$$t = f_3 + d = 2.401 + 1 = 3.041 \text{ мм}$$

$f_3$  – граничний прогин одного витка з таблиць ГОСТ,  $d$  – діаметр дроту. Крок визначає зазор між витками у вільному стані, що забезпечує рівномірне стиснення витків при навантаженні. Умова  $t > d$  виконується:  $3,041 > 1$  мм.

Нижче приведена таблиця отриманих результатів:

Таблиця 2.1

Параметр	Значення
Зовнішній діаметр D	10 мм

Діаметр дроту $d$	1 мм
Середній діаметр $D_0$	9 мм
Число робочих витків $n$	25,5
Повне число витків $n_1$	27
Жорсткість пружини $z$	0,0538 кг/мм
Крок пружини $t$	3,041 мм
Висота у вільному стані $H_0$	78,5 мм
Висота при $P_1$ ( $H_1$ )	46 мм
Висота при $P_2$ ( $H_2$ )	32 мм
Блокова висота $H_3$	26,5 мм

### 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Математичне моделювання

При автоматизованому контролі корпусних деталей ключовими геометричними параметрами є діаметри циліндричних отворів  $D$  та міжцентрові відстані  $L$  між ними. Вимірювальний прилад визначає ці параметри непрямим методом — через координати точок на поверхні отворів, зафіксовані вимірювальними перетворювачами.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

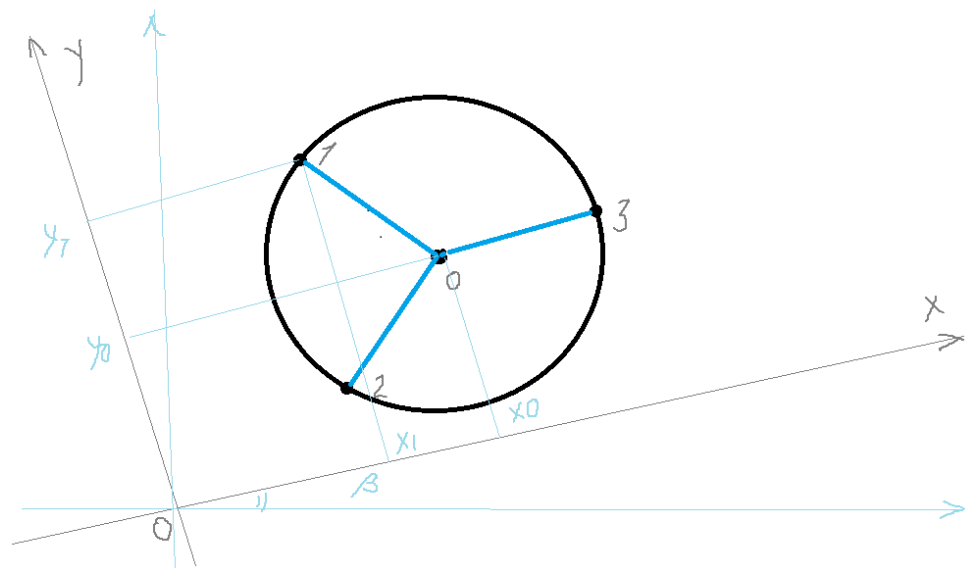


Рисунок 3.1 - До визначення координат отвору  $X_0, Y_0$  за визначеними координатами  $x_i, y_i, i = 1, 2, 3$

Принцип роботи приладу базується на тому, що кожний отвір вимірюється трьома вимірювальними давачами, які розташовані рівномірно навколо осі отвору. Показання  $i$ -го давача позначені як координати точки  $(x_i, y_i)$ , де  $i = 1, 2, 3$ . За цими трьома точками однозначно визначається центр кола (отвору) та його радіус.

Задача зводиться до:

- 1) Знаходження координат  $(x_0, y_0)$  центра отвору за трьома точками на його поверхні;
- 2) Обчислення діаметра  $D$  отвору та міжцентрової відстані  $L$  між двома отворами.

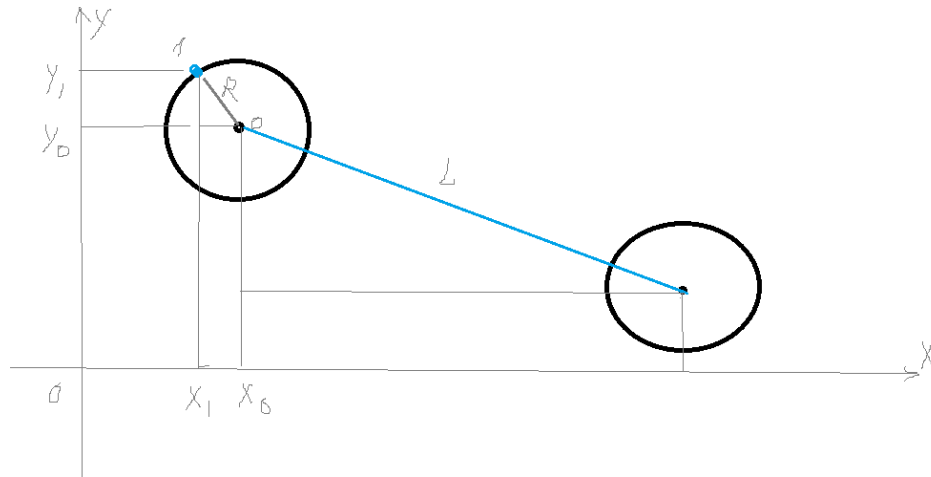


Рисунок 3.2 – До визначення міжцентрової віддалі

### 3.1.1 Визначення діаметрів отворів

У системі  $XOY$ , вимірювальна схема включає три давачі, наконечники яких торкаються внутрішньої поверхні отвору. Через геометрію кола, усі три точки дотику  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  рівновіддалені від центра  $(x_0, y_0)$  на величину радіуса  $R = D/2$ .

Математично це виражається системою рівнянь кіл:

$$\begin{aligned} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 &= R^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 &= R^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 &= R^2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Оскільки всі три квадратичні вирази дорівнюють одному значенню  $R^2$ , перша та друга рівності між собою, а також перша та третя дають рівняння без  $R^2$ :

Прирівнюємо перший і другий вирази системи (3.1):

$$(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \quad (3.2)$$

Розкриємо дужки в лівій та правій частинах (3.2):

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$x_1^2 - 2x_1x_0 + x_0^2 + y_1^2 - 2y_1y_0 + y_0^2 = x_2^2 - 2x_2x_0 + x_0^2 + y_2^2 - 2y_2y_0 + y_0^2$$

Члени  $x_0^2$  та  $y_0^2$  скорочуються з обох боків:

$$x_1^2 - 2x_1x_0 + y_1^2 - 2y_1y_0 = x_2^2 - 2x_2x_0 + y_2^2 - 2y_2y_0$$

Переносимо всі члени з  $x_0$  і  $y_0$  в ліву частину:

$$2(x_2 - x_1) \cdot x_0 + 2(y_2 - y_1) \cdot y_0 = x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 \quad (3.3)$$

Аналогічно прирівнюємо перший і третій вирази системи (3.1) і після тих самих перетворень отримуємо:

$$2(x_3 - x_1) \cdot x_0 + 2(y_3 - y_1) \cdot y_0 = x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 \quad (3.4)$$

Звідки за правилом Крамера для знаходження розв'язку системи лінійних рівнянь:

$$x_0 = \frac{(y_3 - y_1)(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2) - (y_2 - y_1)(x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2)}{2(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 2(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

$$y_0 = \frac{(x_2 - x_1)(x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2) - (x_3 - x_1)(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)}{2(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 2(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

Після знаходження координат центра  $(x_0, y_0)$  діаметр  $D$  отвору визначається як подвоєна відстань від центра до будь-якої з трьох точок вимірювання. Для підвищення точності рекомендується використовувати усереднення по всіх трьох точках.

Відстань від центра до першої точки:

$$R_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (3.5)$$

Аналогічно для другої та третьої точок:

$$R_2 = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \quad (3.6)$$

$$R_3 = \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2} \quad (3.7)$$

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Усереднений радіус:

$$R = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{3} \quad (3.8)$$

Діаметр отвору:

$$D = 2R = 2\sqrt{(x_{01} - x_1)^2 + (y_{01} - y_1)^2} \quad (3.9)$$

де  $x_{01}, y_{01}$  - координати центра першого (вимірюваного) отвору;

$x_1, y_1$  - координати однієї з точок на поверхні цього отвору. При практичних розрахунках використовується формула (3.20) або середнє значення по трьох точках (3.19).

### 3.1.2 Визначення міжцентрової відстані

Для визначення міжцентрової відстані  $L$  між двома отворами необхідно знайти координати центрів обох отворів за формулами (3.13) - (3.14). Нехай перший отвір має центр  $(x_{01}, y_{01})$ , а другий -  $(x_{02}, y_{02})$ .

При вимірюванні в системі координат, пов'язаній з базовою площиною деталі, загальна формула міжцентрової відстані матиме вигляд:

$$L = L_x + \sqrt{(x_{02} - x_{01})^2 + (y_{02} - y_{01})^2} \quad (3.10)$$

де  $L_x$  - показники давача міжцентрової відстані;

$x_{01}, y_{01}$  - координати центра першого отвору;

$x_{02}, y_{02}$  - координати центра другого отвору.

### 3.1.3 Перетворення показів давачів у координати точок вимірювання

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювальні давачі забезпечують лінійне переміщення наконечника вздовж власної осі. Щоб перейти від показань давача  $\Delta_i$  до координат точки дотику  $(x_i, y_i)$  у системі координат приладу, використовуються формули перетворення.

Нехай  $i$ -й давач установлений під кутом  $\beta_i$  до осі  $X$ , а координати базової точки (нульового положення наконечника) дорівнюють  $(x_b, y)$ . Тоді координати точки дотику:

$$x_i = x_b + \Delta_i \cdot \cos \beta_i \quad (3.11)$$

$$y_i = y_b + \Delta_i \cdot \sin \beta_i \quad (3.12)$$

де  $x_b, y_b$  - координати базової точки давача при нульовому показанні (конструктивно задані параметри приладу);

$\Delta_i$  - абсолютне показання  $i$ -го давача (виміряне переміщення наконечника);

$\beta_i$  - кут встановлення  $i$ -го давача відносно осі  $X$ .

Для схеми з рівномірним розташуванням давачів (кути  $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ ) значення кутів:

$$\beta_1 = 0^\circ; \beta_2 = 120^\circ; \beta_3 = 240^\circ$$

Це забезпечує симетричне охоплення перетину отвору та мінімізує вплив похибок форми (некруглості) на результат вимірювання центра. При несиметричному розташуванні давачів кути  $\beta_i$  задаються конструктивно і є калібрувальними параметрами приладу.

### 3.1.4 Загальний алгоритм обчислення параметрів

На підставі виведених формул формується такий алгоритм обчислення:

Крок 1. Зчитати показання трьох давачів для першого отвору:  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ .

Крок 2. Обчислити координати точок вимірювання за формулами для кожного давача:

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крок 3. Знайти координати центра першого отвору ( $x_{01}$ ,  $y_{01}$ ) за формулами.

Крок 4. Обчислити діаметр  $D_1$  першого отвору за формулою (3.9).

Крок 5. Повторити кроки 1–4 для другого отвору, отримавши центр ( $x_{02}$ ,  $y_{02}$ ) і діаметр  $D_2$ .

Крок 6. Обчислити міжцентрову відстань  $L$  за формулою (3.10).

Крок 7. Порівняти отримані значення  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $L$  з допустимими відхиленнями, вказаними на кресленні, та сформулювати рішення — «придатна» або «брак».

### 3.2 Мікропроцесорна техніка та електроніка

Система обробки вимірювальної інформації функціонує на основі алгоритмів, що враховують геометричні взаємозв'язки між сигналами давача діаметру у межах однієї пробки, а також між сигналами давача міжцентрової віддалі. Первинні сигнали від давачів проходять аналого-цифрове перетворення та надходять до мікропроцесорного обчислювального модуля.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

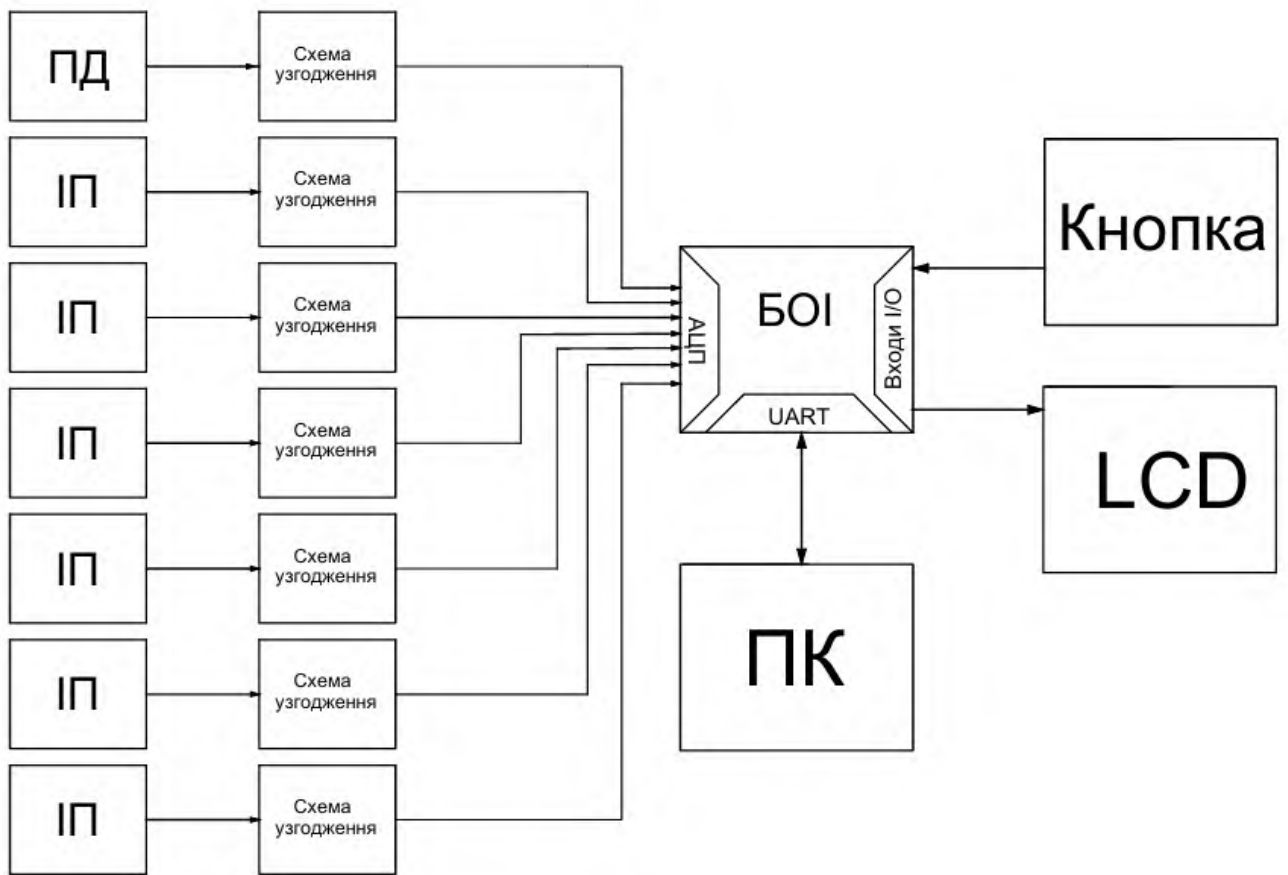


Рисунок 3.3 – Функціональна схема приладу: ПД – потенціометричний давач; ІП – індуктивний перетворювач

Обчислювальний модуль здійснює розрахунок координат центрів отворів контрольованої деталі методом найменших квадратів на основі трьох точок контакту важелів із поверхнею кожного отвору. Паралельно виконується визначення дійсного діаметру кожного отвору як діаметра описаного кола через ці три точки. Міжцентрова відстань між отворами розраховується як відстань між обчисленими координатами їх центрів із використанням показань повзунка. Результати вимірювань відображаються у цифровому форматі та можуть бути збережені в пам'яті приладу або передані до зовнішніх систем збору та аналізу статистичних даних.

Усі отримані вимірювальні дані передаються до електронного обчислювального блоку, який виконує їх опрацювання відповідно до встановлених математичних залежностей.

## Блок електронної обробки інформації

Центральним вузлом електронної частини приладу є блок обробки інформації БОІ. Його основою є мікроконтролер, який поєднує функції аналого-цифрового перетворення, цифрової обробки інформації, керування периферійними пристроями та організації зовнішнього обміну даними.

До складу БОІ входить багатоканальний аналого-цифровий перетворювач АЦП, що приймає сигнали від усіх семи електронних каналів. АЦП виконує послідовне опитування входів та перетворення аналогових рівнів напруги у цифровий код. Частота дискретизації та розрядність перетворення визначають точність цифрового представлення вимірюваних параметрів та забезпечують необхідну швидкодію системи.

Отримані цифрові дані надходять до обчислювального ядра БОІ, де виконуються алгоритми математичної обробки. У процесі обробки враховуються калібрувальні коефіцієнти, проводиться перерахунок цифрових кодів у фізичні величини та визначаються міжцентрові відстані і діаметри контрольованих отворів.

Для зв'язку із зовнішніми пристроями електронна частина використовує послідовний інтерфейс UART. Через нього забезпечується двосторонній обмін даними між БОІ та персональним комп'ютером. Канал UART використовується для передачі результатів вимірювання, статистичної обробки, архівування інформації та формування звітної документації. У зворотному напрямку можуть передаватися команди зміни режимів роботи, оновлення калібрувальних таблиць та параметри налаштування системи.

Підключення органів керування та пристроїв індикації здійснюється через порти введення-виведення мікроконтролера. За допомогою цих портів реалізується робота кнопки керування та взаємодія з рідкокристалічним дисплеєм.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

## Вибір мікроконтролера

Для реалізації вимірювальної системи було обрано мікроконтролер STM32F103C8T6, оскільки він забезпечує оптимальне співвідношення між продуктивністю, набором периферії та енергоспоживанням. Ядро ARM Cortex-M3 дозволяє виконувати обробку сигналів у реальному часі з тактовою частотою до 72 МГц, що є достатнім для роботи з високошвидкісним АЦП та передачі даних через інтерфейси зв'язку без затримок. Наявність вбудованого 12-бітного АЦП дозволяє напряду оцифровувати аналоговий сигнал від вимірювального тракту без застосування зовнішніх перетворювачів, що спрощує схему та підвищує надійність системи.

Інтегровані інтерфейси USART забезпечують зручну передачу вимірних даних на ПК або інші пристрої для подальшої обробки та візуалізації, а універсальні порти GPIO використовуються для керування службовими сигналами, синхронізації та підключення допоміжних елементів системи. Таким чином, STM32F103C8T6 є доцільним вибором для побудови компактної та функціонально насиченої вимірювальної системи.

Електронна частина приладу включає сім вимірювальних каналів, кожен із яких утворений первинним перетворювачем та відповідною схемою узгодження сигналу. Така структура забезпечує незалежну обробку сигналів від кожного давача та дозволяє адаптувати параметри електронного тракту до особливостей конкретного типу вимірювального перетворювача.

Таблиця 3.1 – характеристики STM32F103C8T6

Параметр	Значення
Ядро	ARM Cortex-M3
Максимальна частота	72 МГц
Flash-пам'ять	64 КВ
SRAM	20 КВ
Живлення	2.0 – 3.6 В

ADC	12-bit, до 16 каналів
USART	до 3 інтерфейсів
GPIO	до ~37 ліній

### Первинні перетворювачі та електронні схеми узгодження

Для вимірювання міжцентрової відстані використовується потенціометричний давач ПД, який перетворює лінійне переміщення вимірювальних головок у пропорційну аналогову напругу. Завдяки значному діапазону переміщення потенціометричний канал використовується для визначення загального положення механізму та забезпечення грубого вимірювання координат.

Прецизійне вимірювання малих переміщень здійснюється шістьма індуктивними перетворювачами ІІ. Їх робота базується на зміні індуктивного зв'язку котушок при переміщенні феромагнітного осердя. Кожен індуктивний давач відповідає за контроль окремого напрямку або параметра вимірювання, що забезпечує отримання повної інформації про геометричний стан контрольованої деталі.

Сигнали від первинних перетворювачів безпосередньо не подаються до блоку цифрової обробки, а проходять через індивідуальні електронні схеми узгодження. Основним призначенням цих схем є приведення параметрів сигналів до рівнів, сумісних з входами аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Залежно від типу давача схеми узгодження виконують підсилення або послаблення сигналу, узгодження рівнів напруг, фільтрацію завад та захист електронних входів від перевантаження.

Для індуктивних каналів додатково реалізується демодуляція змінного сигналу, оскільки LVDT-перетворювачі формують диференційний сигнал змінного струму. Після обробки на виходах усіх схем узгодження формуються

нормовані аналогові сигнали, придатні для подальшого аналого-цифрового перетворення.

### Відображення інформації та керування приладом

Підсистема відображення інформації представлена рідкокристалічним дисплеєм LCD, який забезпечує локальну індикацію результатів вимірювання та службових повідомлень. На дисплеї в режимі реального часу відображаються числові значення вимірюваних параметрів, поточний режим роботи та допоміжна діагностична інформація. Наявність автономного відображення забезпечує можливість використання приладу без обов'язкового підключення до персонального комп'ютера.

Керування електронною частиною приладу реалізується за допомогою кнопки оператора, підключеної до цифрових входів БОІ. Залежно від алгоритму обробки натискань кнопка може використовуватись для запуску циклу вимірювання, підтвердження операцій, скидання показань та перемикання режимів роботи між вимірюванням діаметра і міжцентрової відстані. Такий принцип керування дозволяє зберегти простоту інтерфейсу та забезпечити надійну експлуатацію приладу в умовах виробничого середовища.

Таким чином електронна частина приладу являє собою завершену систему збору, узгодження, перетворення та цифрової обробки вимірювальної інформації, в якій кожен функціональний вузол виконує чітко визначене завдання та забезпечує отримання точних і стабільних результатів контролю.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.2.1 Вибір індуктивного давача

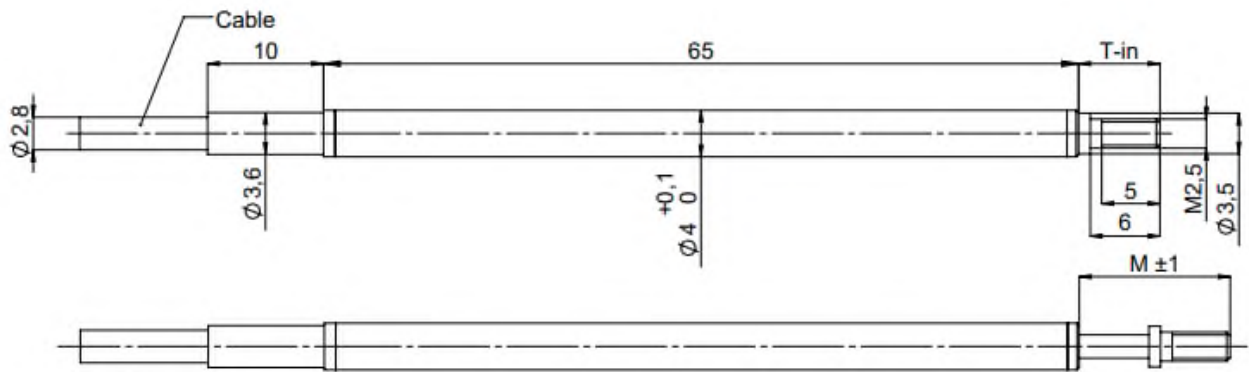


Рисунок 3.4 – Індуктивний давач

Для вимірювання малих переміщень з підвищеними вимогами до точності застосовуються індуктивні перетворювачі типу IZAL-2-K, що належать до класу LVDT. Їх вибір обумовлений високою чутливістю, стабільністю характеристик та низьким рівнем шумів. LVDT-перетворювачі виконують прецизійне вимірювання малих відхилень, що в сукупності забезпечує необхідний діапазон і точність вимірювань.

Таблиця 3.2 – характеристики IZAL-2-K

Діапазон вимірювання	$\pm 1$ мм
Загальний хід	2 мм
Вихідний сигнал	Диференційний змінний (AC)
Лінійність	$\pm 0.25\%$ F.S.
Точність	5 мкм

### 3.2.2 Схема узгодження для індуктивного давача



$$V_A - V_B = S \cdot V_{EXC} \cdot d = 0,045 \cdot 3 \cdot 1 = 0,135 \text{ В rms}$$

Для типового LVDT приймаємо  $V_A \approx 1,6 \text{ В rms}$  при крайньому положенні:

$$VTR = \frac{V_A}{V_{EXC}} = \frac{1,6}{3} = 0,533$$

4.2. Щоб у крайньому положенні забезпечити  $V_A = 3 \text{ В}$ :

$$VTR = \frac{V_A}{V_{EXC}} = \frac{3}{0,533} = 5,63 \text{ В rms}$$

Перевірка запасу по живленню ( $V_S = \pm 15 \text{ В}$ ):

$$15 - 5,63 \cdot 2 = 15 - 11,26 = 3,74 \text{ В} \geq 2,5 \text{ В}$$

5. Резистор R1

Для  $V_{EXC} = 5,63 \text{ В rms}$ ,  $V_S = \pm 15 \text{ В}$ , тому  $R1 \approx 4,7 \text{ кОм}$ .

6. Конденсатор C1 (частота збудження 40 кГц)

$$C_1 = \frac{35 \mu\text{F} \cdot \text{Hz}}{f_{EXC}} = \frac{35}{40000} = 0,875 \text{ нФ}$$

7. Конденсатори C2, C3, C4 (смуга пропускання 250 Гц)

$$C_2 = C_3 = C_4 = \frac{100 \mu\text{F} \cdot \text{Hz}}{f_S} = \frac{100}{250} = 400 \text{ нФ}$$

$$C_2 = C_3 = C_4 = 0,47 \text{ мкФ}$$

8. Резистор R2 (підсилення)

Визначаємо VTR. При центральному положенні для LVDT типово  $V_A + V_B \approx 2 \text{ В}$ . Приймаємо  $V_A + V_B \approx 2,7 \text{ В}$  при  $V_{EXC} = 5,63 \text{ В}$ :

$$VTR = \frac{V_{EXC}}{V_A + V_B} = \frac{5,63}{2,7} = 2,09 \text{ В}$$

Для вихідної напруги  $\pm 2 \text{ В}$  при переміщенні  $\pm 1 \text{ мм}$ :

$$R_2 = \frac{V_{OUT}}{S \cdot d \cdot VTR \cdot 500 \mu\text{A}} = \frac{2}{0,045 \cdot 1 \cdot 2,09 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_2 = \frac{2}{0,0000471} = 42,5 \text{ кОм}$$

Приймаємо  $R_2 = 43 \text{ кОм}$  (або  $47 \text{ кОм}$  стандартний E24).

						КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
							50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

## 9. Резистори R3, R4 (зміщення виходу)

Для зміщення вихідного діапазону з  $\pm 2$  В у діапазон 0...4 В встановлюємо  $V_{OS}=2$  В:

$R4=\infty$  (вхід OFFSET2 розімкнено)

$$R_3 = \frac{1.2 * R_2}{V_{OS}} - 5\text{кОм} = \frac{1.2 - 43000}{2} - 5000 = 25800 - 5000 = 20.8\text{кОм}$$

$$R_3 = 20\text{кОм}$$

### 3.2.3 Вибір потенціометричного давача

Для вимірювання міжцентрової відстані в складі приладу обрано потенціометричний давач переміщення Novotechnik TR-0010. Вибір даного типу перетворювача обумовлений вимогами до діапазону вимірювання, простоти електронного узгодження та достатньої точності для каналу грубого позиціонування.

Потенціометричний давач забезпечує безпосереднє перетворення лінійного переміщення у пропорційну аналогову напругу, що дозволяє отримувати вимірювальний сигнал без складних проміжних перетворень. Це істотно спрощує електронну частину каналу та знижує вимоги до схем узгодження, які зводяться до масштабування рівня сигналу до діапазону аналого-цифрового перетворювача.

Важливою перевагою даного типу давача є його робочий хід 10 мм, що забезпечує достатній діапазон вимірювання для задач визначення міжцентрової відстані. У конкретній реалізації приладу використовується центральна частина діапазону з робочим відхиленням  $\pm 3$  мм, що дозволяє мінімізувати вплив нелінійності на крайніх ділянках ходу та підвищити стабільність вимірювань.

										КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
											51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

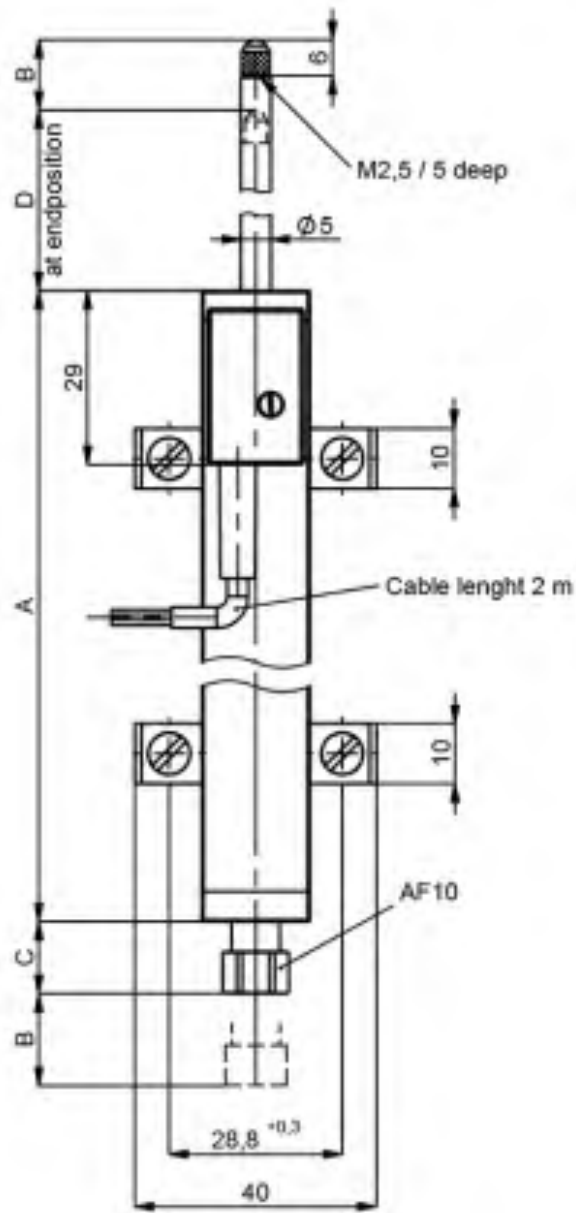


Рисунок 3.6 – Потенціометричний давач

Таблиця 3.3 – характеристики Novotechnik TR-0010

Діапазон вимірювання	10 мм
Робочий діапазон у приладі	6 мм
Вихідний сигнал	Аналогова напруга
Лінійність	±0.25% F.S.
Точність	5 мкм

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 030.00.00.000 ПЗ

Арк.

52

Таким чином, потенціометричний давач обрано як оптимальне рішення для каналу вимірювання міжцентрової відстані, де необхідне поєднання широкого робочого діапазону, достатньої точності та мінімальної складності електронної обробки сигналу.

### 3.2.4 Схема узгодження для потенціометричного давача

Роботу системи вимірювання на основі потенціометричного давача Novotechnik TR-0010 доцільно організувати відносно центрального положення штока. Це пояснюється тим, що використання лише середньої частини робочого ходу дозволяє зменшити вплив нелінійності крайніх зон та підвищити стабільність перетворення малих переміщень. У такому режимі нульова точка відповідає приблизно середньому положенню (близько 5 мм), а корисний робочий інтервал становить  $\pm 3$  мм, тобто використовується лише частина повного ходу 10 мм.

Електрично давача працює як резистивний дільник напруги. При живленні 3.3 В вихідна напруга змінюється пропорційно переміщенню штока в межах повного ходу. Чутливість системи можна визначити як відношення напруги до довжини ходу:

$$\frac{3.3\text{В}}{10\text{мм}} = 0.33\text{В/мм}$$

Це означає, що кожен міліметр переміщення змінює вихідну напругу приблизно на 0.33 В. У робочому діапазоні  $\pm 3$  мм (загалом 6 мм) корисна зміна сигналу становить:

$$6\text{ мм} \times 0.33\text{ В/мм} \approx 1.98\text{ В}$$

Таким чином, замість використання повного діапазону 0–3.3 В, система працює лише з центральною частиною характеристики, яка займає приблизно 60% шкали. Це є перевагою, оскільки центральна зона потенціометра зазвичай має кращу лінійність та менший вплив крайових похибок.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При використанні 12-бітного аналого-цифрового перетворювача STM32 (4096 рівнів) крок квантування по напрузі становить:

$$\frac{3.3\text{В}}{4096} = 0.8\text{мВ}$$

Переведемо це у переміщення:

$$\frac{0.8\text{мВ}}{0.33\text{В/м}} = 0.0024\text{мм} = 2.4\text{мкм}$$

### 3.18 Підключення потенціометричного давача

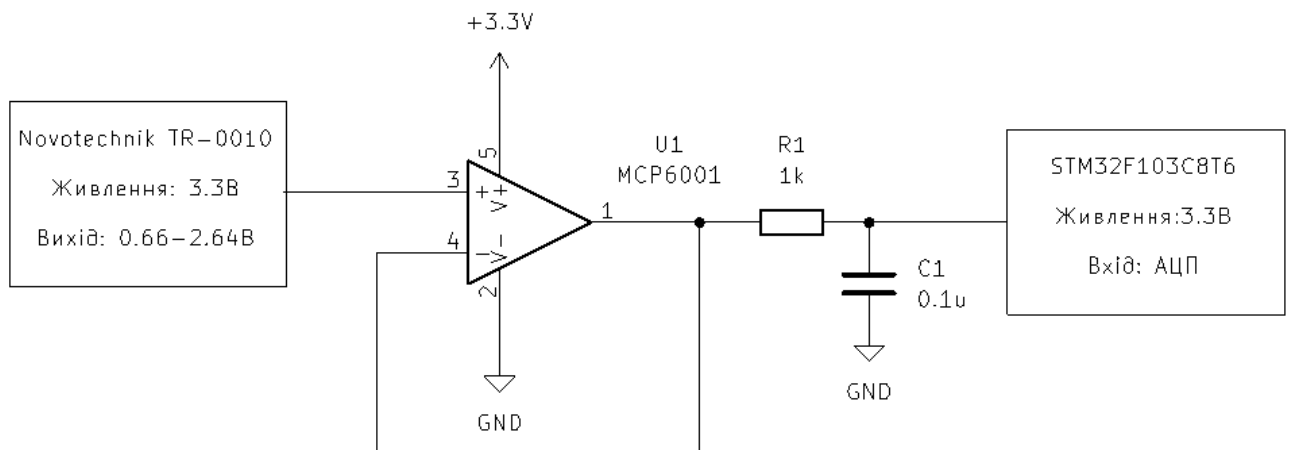


Рисунок 3.6 – Схема підключення потенціометричного давача

У цій схемі вимірювального каналу для потенціометричного давача переміщення застосовано буферний операційний підсилювач із подальшим RC-фільтром з метою забезпечення коректної роботи аналого-цифрового перетворювача та мінімізації похибок вимірювання, що виникають як на рівні давача, так і на рівні дискретизації сигналу. Вихід потенціометричного давача, навіть за умови живлення від стабілізованої напруги 3.3 В, по суті є виходом дільника напруги зі змінним внутрішнім опором, який залежить від положення рухомого контакту. Це означає, що джерело сигналу не є низькоомним і його параметри змінюються в процесі роботи, що ускладнює безпосереднє навантаження ємнісними або імпульсними входами наступних каскадів.

Застосування операційного підсилювача в режимі повторювача напруги дозволяє розв'язати давач від подальшого навантаження, оскільки вхід ОП має дуже високий опір і практично не впливає на режим роботи потенціометра, тоді як вихід ОП формує низькоомне джерело напруги, здатне стабільно працювати з ємнісним навантаженням і імпульсним характером споживання струму з боку АЦП мікроконтролера. Це особливо важливо, оскільки вхід АЦП має внутрішній вибірково-запам'ятовуючий конденсатор, який під час кожного циклу вимірювання короткочасно підключається до джерела сигналу і створює різкі зміни навантаження, що без буферизації призводило б до просідання напруги та динамічних похибок.

RC-ланка першого порядку на елементах  $R1 = 1$  кОм та  $C1 = 0.1$  мкФ, розташована після буфера, виконує функцію обмеження смуги пропускання та придушення високочастотних завад, які можуть проникати як через живлення, так і через електромагнітні наведення від цифрової частини системи.

Частота зрізу розраховується за формулою:

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 1000 * 0.0000001} \approx 1592 \text{ Гц}$$

Оскільки вона підключена вже до низькоомного виходу операційного підсилювача, її параметри залишаються стабільними і не залежать від положення повзунка давача, що забезпечує лінійність і відтворюваність частотної характеристики фільтра. Додатково резистивний елемент RC-ланки обмежує пікові струми в момент вибірки АЦП, а конденсатор забезпечує локальне накопичення заряду, завдяки чому зменшується вплив імпульсного характеру роботи аналого-цифрового перетворювача на вимірюваний сигнал.

Для буферного каскаду було обрано операційний підсилювач МСР6001 від Microchip як малопотужний ОП загального призначення, який добре підходить для роботи в якості повторювача напруги у вимірювальних аналогових трактах.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

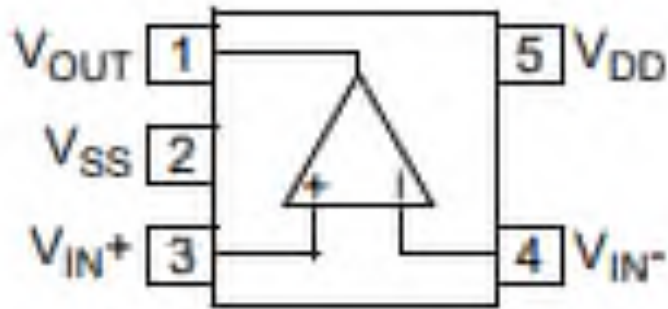


Рисунок 3.7 – Схема підключення MCP6001

Для буферного каскаду було обрано операційний підсилювач MCP6001 від Microchip як малопотужний ОП загального призначення, який добре підходить для роботи в якості повторювача напруги у вимірювальних аналогових трактах.

MCP6001 працює в діапазоні живлення 1.8–5.5 В, має rail-to-rail вхід і вихід, що дозволяє повністю використовувати діапазон напруги живлення без значних втрат по амплітуді. Типова споживана потужність становить близько 100  $\mu$ А, що робить його зручним для малопотужних систем. Також підсилювач має смугу пропускання близько 1 МГц та низький вхідний струм зміщення, що забезпечує мінімальний вплив на джерело сигналу при буферизації.

Завдяки стабільній роботі в режимі одиничного підсилення, низькому енергоспоживанню та достатній точності для прецизійних вимірювальних застосувань, MCP6001 є доцільним вибором для реалізації буфера між давачем і подальшими аналогово-цифровими або фільтруючими каскадами.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Вимоги ергономіки до організації робочого місця оператора

Основна мета ергономіки полягає в оптимізації умов праці таким чином, щоб мінімізувати фізичне та психологічне навантаження на людину, знизити ризик виникнення професійних захворювань, підвищити продуктивність праці та зменшити кількість помилок, пов'язаних із людським чинником. Ергономічно правильно організоване робоче місце дозволяє оператору виконувати трудові операції без зайвих витрат енергії та зусиль, зберігаючи високу концентрацію уваги протягом усього робочого дня.

Ергономіка як наука інтегрує досягнення фізіології, психології, гігієни праці, антропометрії та технічних дисциплін. Вона встановлює нормативи щодо розмірів робочих поверхонь, розташування органів керування, рівня освітленості, мікрокліматичних умов та організації робочого простору загалом. В Україні ергономічні вимоги регламентуються державними стандартами ДСТУ та санітарними нормами ДСН.

Робоче місце оператора повинно відповідати антропометричним характеристикам людини — сукупності розмірів тіла, пропорцій та рухових можливостей. Висота робочої поверхні для роботи сидячи становить 680–720 мм для чоловіків та 650–700 мм для жінок. Якщо робоче місце призначене для використання різними операторами, рекомендується застосовувати регульовані меблі, що дозволяють змінювати висоту столу та крісла відповідно до зросту конкретного працівника.

Крісло оператора є одним із ключових елементів ергономічно організованого робочого місця. Воно повинно мати регульовану висоту сидіння (від 400 до 500 мм), кут нахилу спинки (від 95° до 110°), підлокітники та поперекову підтримку. Правильна посадка передбачає, що стегна паралельні підлозі, коліна зігнуті під кутом 90°, ступні повністю стоять на підлозі або

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

підставці для ніг, а спина спирається на спинку крісла. Це мінімізує навантаження на хребет і запобігає виникненню болю в спині та шиї.

Зона досяжності рук оператора визначає розміщення органів керування та основних робочих інструментів. Оптимальна зона — простір на відстані 300–400 мм від тулуба по горизонталі, де оператор може виконувати дії без напруження м'язів плечового поясу. Максимальна зона досяжності, де виконуються рідкісні операції, не повинна перевищувати 600 мм. Клавіатура розміщується так, щоб лікті були зігнуті під кутом близько 90°, а зап'ястки знаходились у нейтральному положенні для профілактики тунельного синдрому.

Монітор комп'ютера або дисплей пульта керування є основним засобом отримання оператором робочої інформації, тому його правильне розташування має критичне значення. Верхній край екрана повинен знаходитись на рівні очей або трохи нижче, а відстань від очей до екрана становить 500–700 мм залежно від розміру дисплея та розміру шрифту. Кут нахилу монітора рекомендується в межах 10–20° від вертикалі, що відповідає природному куту погляду людини злегка вниз.

Органи керування (кнопки, перемикачі, рукоятки, сенсорні панелі) розташовуються відповідно до частоти їх використання та значущості виконуваних функцій. Найчастіше використовувані елементи розміщуються у центральній зоні, зручній для правої руки, рідкісніші — на периферії. Важливим принципом є функціональне групування: органи керування, що відносяться до одного технологічного процесу, об'єднуються разом і відокремлюються від інших груп візуально або фізично. Стандарти вимагають також дотримання стереотипів руху: наприклад, поворот рукоятки за годинниковою стрілкою повинен відповідати збільшенню параметра.

Засоби відображення інформації (індикатори, шкали, сигнальні лампи) проектуються з урахуванням можливостей зорового сприйняття людини. Кутівий розмір символів на шкалах та дисплеях повинен становити не менше 15–20 кутових хвилин, що забезпечує їх чітке розрізнення. Колірне кодування сигналів

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

виконується відповідно до міжнародних стандартів: червоний — небезпека/стоп, жовтий — увага/попередження, зелений — норма/дозвіл, синій або білий — інформаційний сигнал.

Освітленість робочого місця оператора нормується залежно від характеру зорової роботи. Для роботи з документами та комп'ютером рівень освітленості на робочій поверхні повинен становити не менше 300–500 лк. Важливо уникати відблисків на екрані монітора та прямого потрапляння сонячного світла в поле зору оператора. Рекомендується комбіноване освітлення: загальне рівномірне плюс місцеве для освітлення паперових документів. Джерела загального освітлення розміщуються так, щоб їхнє відображення не потрапляло в зону огляду оператора.

Мікрокліматичні умови на робочому місці оператора регламентуються санітарними нормами. Температура повітря в теплий період року - 22–25°C, у холодний - 21–24°C. Відносна вологість повітря підтримується в межах 40–60%, швидкість руху повітря не перевищує 0,1 м/с. Відхилення від цих норм призводить до підвищення стомлюваності, зниження уваги та погіршення загального самопочуття оператора. Системи вентиляції та кондиціонування повинні забезпечувати подачу не менше 20–30 м<sup>3</sup> свіжого повітря на годину на одного працівника.

Рівень шуму на робочому місці оператора не повинен перевищувати 50–65 дБА залежно від характеру роботи. Для операторів, що виконують інтелектуальну роботу, пов'язану з переробкою великих обсягів інформації, допустимий рівень шуму — не більше 50 дБА. Вібрація обладнання нормується відповідно до санітарних правил і обмежується рівнями, що не перевищують порогів відчуття людини при тривалій дії. При необхідності застосовуються акустичні екрани, звукопоглинальні покриття та антивібраційні підставки.

Оптимальна організація робочого дня оператора передбачає чергування праці та коротких перерв для відновлення функціонального стану організму. При роботі з відеодисплейними терміналами рекомендується робити перерву

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

тривалістю 10–15 хвилин через кожні 45–60 хвилин роботи. Загальний час регламентованих перерв протягом робочого дня становить 50–90 хвилин залежно від категорії важкості та напруженості праці. Під час перерв рекомендується виконувати гімнастику для очей, шиї та спини.

Для запобігання хронічній втомі та розвитку професійних захворювань (остеохондрозу, міопії, синдрому хронічної втоми) оператори повинні чергувати роботу за монітором із виконанням інших видів діяльності, що не потребують напруженої зорової та інтелектуальної роботи. Нормами встановлено, що безперервна робота з відеодисплейним терміналом не повинна перевищувати 2 годин поспіль. Ці вимоги особливо актуальні для операторів диспетчерських пунктів і центрів управління технологічними процесами у приладобудуванні.

Загалом правильно організоване робоче місце оператора є не просто вимогою нормативних документів, а й економічно обґрунтованим рішенням. Зниження стомлюваності та захворюваності персоналу, зменшення кількості помилок і виробничих інцидентів, підвищення продуктивності — все це є прямим наслідком дотримання ергономічних стандартів. Інвестиції в ергономіку робочого місця окупаються за рахунок підвищення якості продукції та скорочення витрат на лікування та компенсації.

#### 4.2 Використання і опис дії систем пожежогасіння на підприємствах приладобудування

Підприємства приладобудування відносяться до виробництв з підвищеним ризиком пожежної небезпеки внаслідок специфіки технологічних процесів та застосовуваних матеріалів. На таких підприємствах використовуються різноманітні горючі матеріали: ізоляційні покриття кабелів та дротів, пластмасові корпуси приладів, лакофарбові покриття, розчинники та флюси для паяння, мастила. Крім того, значна частина обладнання знаходиться під напругою, що зумовлює можливість виникнення пожеж електричного походження.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Характерними причинами виникнення пожеж на приладобудівних підприємствах є: коротке замикання в електричних мережах та обладнанні, перегрів електронних компонентів, займання горючих рідин при їх неправильному зберіганні чи використанні, статична електрика при роботі з синтетичними матеріалами, порушення технологічних регламентів при паянні та нанесенні лакофарбових покриттів.

Залежно від характеру горючих матеріалів та обладнання, що знаходяться у виробничих приміщеннях, встановлюється клас пожежної небезпеки. Для більшості цехів приладобудівних заводів характерні пожежі класу А (горіння твердих матеріалів) та класу Е (горіння в умовах електричних установок під напругою). Паливно-мастильні матеріали та розчинники відносяться до класу В (горіння рідин).

Спринклерні системи водяного пожежогасіння є найпоширенішим типом стаціонарних установок для захисту виробничих будівель. Принцип їх дії базується на автоматичному розпиленні води при підвищенні температури до заданого порогу активації (68°C, 79°C або 93°C залежно від типу спринклера). Кожен спринклерний зрошувач містить теплочутливий елемент — скляну колбу з рідиною або легкоплавкий замок. При досягненні температури активації елемент руйнується, клапан відкривається і вода під тиском розпилюється у вигляді конічного факела.

Для приладобудівних підприємств спринклерні системи застосовуються переважно у складських приміщеннях, побутових будівлях та адміністративних корпусах. У виробничих цехах, де знаходяться електрообладнання та прецизійні прилади, застосування спринклерних систем обмежене через ризик завдання значних матеріальних збитків від контакту з водою. У таких приміщеннях перевагу надають іншим засобам пожежогасіння або застосовують дренчерні системи з ручним або автоматичним запуском, коли вода подається одночасно через всі зрошувачі зони.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пінні системи пожежогасіння використовуються для ліквідації пожеж класів А і В. Вогнегасна піна являє собою стабільну дисперсну систему, утворену бульбашками повітря або газу в розчині піноутворювача. Механізм гасіння полягає в ізоляції поверхні горіння від атмосферного кисню та охолодженні зони горіння. Розрізняють піну низької кратності (до 20:1), середньої кратності (до 200:1) та високої кратності (понад 200:1).

Газові установки пожежогасіння є найбільш ефективним засобом захисту приміщень з електронним обладнанням, серверних кімнат, архівів та інших об'єктів, де застосування води або піни недопустиме. Принцип їх дії полягає у подачі в приміщення спеціального газового вогнегасного складу, який знижує концентрацію кисню нижче порогу підтримання горіння або порушує ланцюгову реакцію окиснення.

Газова система пожежогасіння складається з балонів з вогнегасним агентом, розподільного трубопроводу з насадками-зрошувачами, пускового пристрою та системи автоматичної пожежної сигналізації. При спрацюванні пожежних датчиків (димових, теплових або комбінованих) система управління формує сигнал тривоги, після чого з витримкою часу 30–60 секунд (для евакуації персоналу) подає команду на відкриття клапанів балонів. Вогнегасний агент надходить у трубопровід та рівномірно розподіляється по приміщенню через спеціальні насадки протягом 10–30 секунд.

Порошкові системи пожежогасіння застосовуються для гасіння пожеж класів А, В, С та Е. Вогнегасний порошок являє собою дисперсний матеріал на основі бікарбонату натрію, бікарбонату калію або фосфатів амонію з різноманітними добавками для поліпшення текучості. Механізм гасіння включає декілька ефектів: інгібування ланцюгової реакції горіння, охолодження зони горіння та ізоляція поверхні від доступу кисню. Порошкові системи характеризуються високою вогнегасною ефективністю та здатністю діяти за низьких температур.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Аерозольні генератори пожежогасіння є відносно новим типом засобів, що знайшли широке застосування для захисту електрощитових, серверних та технологічних шаф на приладобудівних підприємствах. Вогнегасний аерозоль утворюється при термічному розкладанні спеціального піротехнічного складу та являє собою суміш дрібнодисперсних солей і газів. Механізм гасіння аналогічний порошковому - хімічне інгібування та охолодження. Перевагами аерозольних генераторів є компактність, тривалий термін зберігання без обслуговування та можливість монтажу безпосередньо у захищеному об'єкті без зовнішнього трубопроводу.

Ефективність будь-якої системи пожежогасіння значною мірою залежить від швидкості виявлення загоряння та своєчасного запуску засобів гасіння. На підприємствах приладобудування застосовуються автоматичні системи пожежної сигналізації (АСПС), що включають різні типи пожежних сповіщувачів. Димові сповіщувачі іонізаційного та оптичного типів реагують на появу продуктів горіння в повітрі. Теплові сповіщувачі спрацьовують при підвищенні температури повітря до заданого порогу або при різкому її зростанні. Комбіновані сповіщувачі поєднують обидва принципи виявлення, забезпечуючи вищу надійність і знижуючи ймовірність помилкових спрацювань.

Система управління пожежогасінням здійснює збір сигналів від пожежних сповіщувачів, аналіз ситуації та видачу команд на запуск засобів гасіння, оповіщення персоналу та евакуацію. Сучасні прилади управління реалізують алгоритми перевірки достовірності сигналу — пожежна тривога формується лише при одночасному спрацюванні двох і більше давачів у зоні. Це суттєво знижує кількість помилкових запусків систем гасіння, що особливо важливо для дорогих газових установок.

Важливою складовою системи пожежної безпеки підприємства є забезпечення персоналу переносними первинними засобами пожежогасіння - вогнегасниками. На підприємствах приладобудування застосовуються переважно вогнегасники вуглекислотні (ВВК) для гасіння обладнання під напругою та

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

порошкові (ВП) для гасіння різних класів пожеж. Розміщення вогнегасників, навчання персоналу правилам їх використання та регулярна перевірка справності є обов'язковими вимогами пожежної безпеки, що регламентуються відповідними нормативними документами.

## ВИСНОВКИ

- У роботі проведено аналіз існуючих методів та засобів вимірювання діаметрів отворів і міжцентрової відстані між ними. Встановлено, що більшість традиційних методів контролю є ручними, трудомісткими та залежать від кваліфікації оператора, що знижує повторюваність результатів і продуктивність контрольних операцій. Обґрунтовано доцільність автоматизації процесу вимірювання.
- Розроблено конструкцію автоматизованого пристрою для вимірювання діаметрів і міжцентрової відстані отворів, яка забезпечує виконання вимірювань без участі оператора в автоматичному режимі.
- Визначено принцип роботи пристрою, що базується на контактному методі вимірювання з використанням переміщення вимірювального наконечника відносно поверхні отвору.
- Виконано розрахунок точності вимірювання пристрою. Проаналізовано складові похибки вимірювання, що включають похибки базування, пружної деформації елементів конструкції, тертя у напрямних повзуна та похибку перетворення. Результати розрахунку свідчать, що сумарна похибка пристрою знаходиться в межах допустимих значень для контрольних операцій даного класу точності.
- Обґрунтовано вибір елементної бази вимірювальних перетворювачів. Вибір обумовлений конструктивними розмірами пристрою та вимогами до точності вимірювання.
- Розроблений пристрій дозволяє суттєво скоротити час контрольної операції порівняно з ручними методами вимірювання та виключити вплив

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суб'єктивного фактору оператора на результат вимірювання. Це забезпечує підвищення продуктивності контролю та стабільності якості продукції на виробництві.

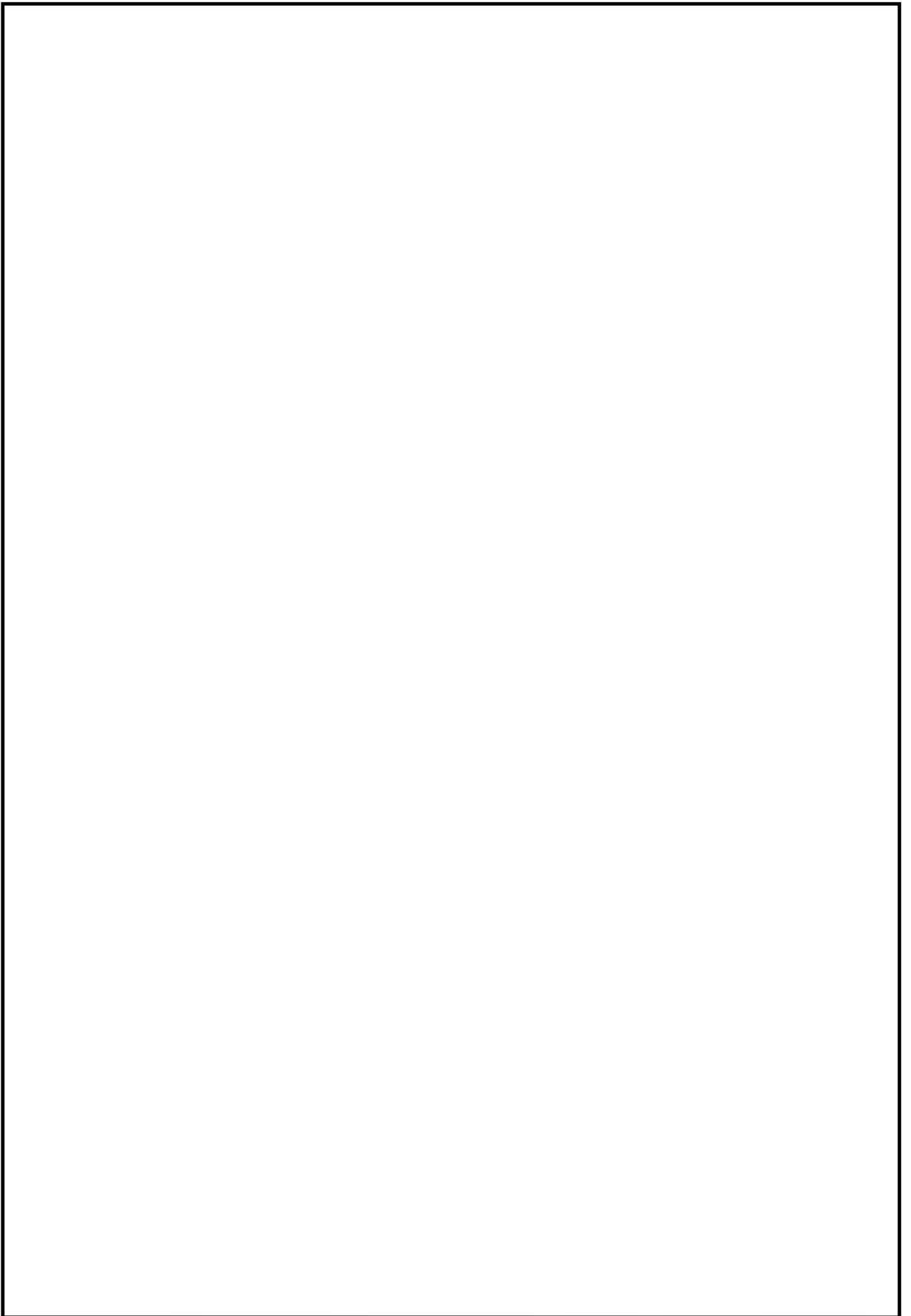
- Результати роботи можуть бути використані при проектуванні контрольних-вимірювальних пристроїв для деталей із системою отворів у машинобудівному виробництві, зокрема в умовах серійного та масового виробництва, де автоматизований контроль є економічно обґрунтованим і технічно необхідним.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. Підруч.- 2-ге вид. перероб. – Львів: Афіша, 2003 – 560с.
2. Григор'єв О. В. Основи метрології та вимірювальної техніки. – Київ: Либідь, 2018. – 352 с.
3. Кухарчук В. В., Куц Ю. В. Основи метрологія та електричних вимірювань. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 286 с.
4. Мархель І. І. Деталі машин : навчальний посібник. – Київ : Алерта, 2005. – 368 с.
5. Uicker J. J., Pennock G. R., Shigley J. E. Theory of Machines and Mechanisms. – 5th ed. – New York: Oxford University Press, 2017. – 977 p.
6. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. – 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.
7. Стрембіцький М.О. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. / М. О. Стрембіцький, М. І. Паламар, А. М. Паламар. – Тернопіль: вид-во Джура, 2018. – 150 с.
8. STMicroelectronics. STM32F103x8/xB Datasheet. – 2025. – 114 p.
9. Microchip Technology Inc. MCP6001 Operational Amplifier Datasheet. – 2019. – 50 p.
10. Novotechnik. TR/TRS Series Linear Position Transducers: Technical Data. – 2025. – 12 p.
11. Жидецький В.І. «Основи охорони праці» -Львів: Афіша, 2000.-356с.

					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66



					КРБ 030.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

## ДОДАТКИ

Керівник: Наконечний Ю.І. \_\_\_\_\_

Консультант: Наконечний Ю.І. \_\_\_\_\_

Консультант: Яворська М.І. \_\_\_\_\_

Консультант: Стрембіцький М.О. \_\_\_\_\_

Нормоконтроль: Апостол Ю.О. \_\_\_\_\_

Затвердив: Паламар М.І. \_\_\_\_\_

Рецензент: