

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет робототехніки та штучного інтелекту
Кафедра автоматизації та безпілотних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

СИСТЕМА АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ
ШЛІФУВАННЯ НА ВЕРСТАТІ-АВТОМАТІ

ACTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE GRINDING PROCESS
ON AN AUTOMATIC MACHINE

спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Мікро- та наносистемна техніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи МНТ-41
ПАРХОМЧУК Іван Володимирович

(підпис)

Керівник:
К.т.н., доцент
ДЕНИСЮК Віктор Юрійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
К.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: *комп'ютерних та інформаційних технологій*

Кафедра: *автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій*

Ступінь вищої освіти: *бакалавр*

Галузь знань: *15 Автоматизація та приладобудування*

Спеціальність: *153 Мікро- та наносистемна техніка*

Освітня програма: *«Мікро- та наносистемна техніка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

д.т.н., професор Повстяной О. Ю.

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Пархомчуку Івану Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Система активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Денисюк Віктор Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р. № 307/01-04

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «25» травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Принцип дії: електронний, з використанням високочутливих вимірювальних перетворювачів переміщення. Метод вимірювання: порівняння з еталонною мірою (компараторий метод), що відповідає концепції прецизійних мікрОВимірювань. Ціна поділки: точна шкала – 1 мкм; груба шкала – 5 мкм. Діапазон показів: точна шкала – 80 мкм (від +60 до –20); груба шкала – 400 мкм (від +300 до –100). Кількість керуючих команд: 4. Система формує попередні та кінцеву команди у таких діапазонах регулювання (мкм): 1 – попередня: 290 (від +300 до +10); 2 – попередня: 190 (від +200 до +10); 3 – попередня: 90 (від +75 до –15); 4 – кінцева: 30 (від –15 до +15).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

Анотація. Вступ. 1. Загальнотехнічна частина. 2. Розрахунково-конструкторська частина.

3. Спеціальна частина. Висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

1. Загальний вигляд системи активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі (1 лист формату А1). 2. Функціональна схема системи активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі (1 лист формату А1). 3. Кінематична схема системи активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі (1 лист формату А1). 4. Складальне креслення пристрою вимірювального (1 лист формату А1) 5. Робочі креслення деталей (1 лист формату А1).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1 Загальнотехнічна частина</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Розділ 2 Розрахунково-конструкторська частина</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Розділ 3 Спеціальна частина</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Висновки</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Пташенчук В. В.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		3,46 %	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		

7. Дата видачі завдання «08» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми</i>	До 20.01.2026 р.	
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	До 25.01.2026 р.	
3.	<i>Розділ 1 Загальнотехнічна частина</i>	До 01.02.2026 р.	
4.	<i>Розділ 2 Розрахунково-конструкторська частина</i>	До 15.02.2026 р.	
5.	<i>Розділ 3 Спеціальна частина</i>	До 25.02.2026 р.	
6.	<i>Висновки</i>	До 10.03.2026 р.	
7.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	До 20.03.2026 р.	
8.	<i>Креслення загального вигляду системи активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі</i>	До 01.04.2026 р.	
9.	<i>Креслення функціональної схеми системи активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі</i>	До 10.04.2026 р.	
10.	<i>Креслення кінематичної системи активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі</i>	До 20.04.2026 р.	
11.	<i>Складальне креслення пристрою вимірювального</i>	До 01.05.2026 р.	
12.	<i>Робочі креслення деталей</i>	До 05.05.2026 р.	
13.	<i>Формування додатків (специфікацій)</i>	До 10.05.2026 р.	
14.	<i>Нормоконтроль</i>	До 15.05.2026 р.	
15.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	До 20.05.2026 р.	
16.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	До 25.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (Пархомчук І. В.)
 (підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (Денисюк В. Ю.)
 (підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пархомчук І. В. Система активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Мікро- та наносистемна техніка» спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026. Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

У загальнотехнічній частині описано технічну характеристику та службове призначення системи активного контролю. Проведено аналіз існуючих аналогів, а також описано принцип роботи та фізичні перетворення, які покладено в основу роботи систем активного контролю.

В розрахунково-конструкторській частині описано структурні схеми систем активного контролю, принцип роботи системи, призначення окремих елементів та їх взаємодія та кінематичну схему вимірювальної системи. Проведено розрахунки індуктивного перетворювача, точності приладу активного контролю та точності відліково-командного пристрою з адаптивною системою видачі команд.

У спеціальній частині представлено методику повірки приладів активного контролю, їх випробування та калібрування, методику визначення точності та стендові випробування приладів, лінеаризацію (калібрування) індуктивних приладів.

Ключові слова: система активного контролю, круглошліфувальний верстат, індуктивний перетворювач, точність вимірювання, лінеаризація, калібрування, адаптивне керування.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ		
Вим.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Система активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі		
Розробив	Пархомчук						
Перевірив	Денисюк						
Н. Контр.	Лапченко						
Затвердив	Гуменюк						
					Літера	Аркуш	Аркушів
					н	4	94
					ЛНТУ, кафедра АтаБС, гр. МНТ – 41		

ANNOTATION

Parkhomchuk I. Active control system for the grinding process on an automatic machine. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP «Micro- and nanosystems engineering» specialty 153 Micro- and nanosystems engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026. Bachelor's qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of used sources, and appendices.

The general technical part describes the technical characteristics and service purpose of the active control system. An analysis of existing analogues is carried out, and the principle of operation and physical transformations that are the basis for the operation of active control systems are also described.

The calculation and design part describes the structural diagrams of active control systems, the principle of operation of the system, the purpose of individual elements and their interaction, and the kinematic diagram of the measuring system. Calculations of the inductive converter, the accuracy of the active control device, and the accuracy of the reference and command device with an adaptive command issuing system are carried out.

The special part presents the methodology for verifying active control devices, their testing and calibration, the methodology for determining accuracy and bench testing of devices, linearization (calibration) of inductive devices.

Keywords: active control system, cylindrical grinding machine, inductive converter, measurement accuracy, linearization, calibration, adaptive control.

					BP 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Технічна характеристика та службове призначення системи активного контролю до круглошліфувального верстата-автомата	10
1.2 Аналіз існуючих аналогів, критичний огляд інформаційних джерел	13
1.3 Фізичні перетворення, які використовуються в системах активного контролю	32
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	43
2.1 Структурні схеми систем активного контролю	43
2.2 Принцип роботи системи активного контролю, призначення окремих елементів та їх взаємодія.....	47
2.3 Кінематична схема вимірювальної системи	51
2.4 Розрахунок точності приладу активного контролю	54
2.5 Розрахунок на точність відліково-командного пристрою з адаптивною системою видачі команд	56
2.6 Розрахунок індуктивного вимірювального перетворювача мікропереміщень	59
РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	62
3.1 Методика перевірки приладів активного контролю	62
3.2 Випробування і калібрування приладів	63
3.3 Визначення точності приладів активного контролю в процесі обробки	79
3.4 Стендові випробування приладів.....	82
3.5 Лінеаризація (калібрування) індуктивних приладів	83
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
ДОДАТКИ.....	95

ВСТУП

У галузі мікро- та наносистемної техніки забезпечення високої точності виготовлення деталей є визначальним чинником якості та функціональної надійності виробів. Сучасні прилади, сенсорні системи, мікромеханічні та прецизійні компоненти потребують обробки з мінімальними відхиленнями розмірів, форми та шорсткості поверхні. За таких умов традиційний післяопераційний контроль є недостатньо ефективним, оскільки не запобігає виникненню браку на етапі формування параметрів деталі.

Одним із перспективних напрямів підвищення точності технологічних процесів є впровадження систем активного контролю, що інтегруються безпосередньо в структуру металорізального обладнання. Такі системи поєднують вимірювальні перетворювачі, електронні модулі обробки сигналів і керуючі пристрої, забезпечуючи безперервний або періодичний моніторинг параметрів обробки. Отримана вимірювальна інформація використовується для оперативного коригування положення інструменту чи режимів різання, що дозволяє забезпечити стабільне досягнення розмірів у межах заданих допусків.

Особливої актуальності системи активного контролю набувають у процесах фінішної абразивної обробки, зокрема при шліфуванні, де вимоги до точності можуть досягати мікрометрового та субмікрометрового рівня. Використання високочутливих датчиків переміщення, індуктивних, ємнісних або оптичних вимірювальних перетворювачів, а також цифрових засобів обробки сигналів відповідає сучасним тенденціям розвитку мікро- та наносистемної техніки.

Таким чином, розроблення системи активного контролю процесу шліфування на верстаті-автоматі є актуальним інженерним завданням, що поєднує принципи прецизійних вимірювань, сенсорики та автоматизованого керування й спрямоване на підвищення точності, стабільності та ефективності високотехнологічного виробництва.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Об'єкт дослідження – технологічний процес фінішної абразивної обробки (шліфування) деталей на верстаті-автоматі з інтегрованою системою вимірювання параметрів обробки.

Предмет дослідження – методи, засоби та алгоритми активного контролю геометричних параметрів деталей у процесі шліфування, а також структурна та функціональна побудова системи активного контролю з використанням прецизійних вимірювальних перетворювачів.

Мета кваліфікаційної роботи – розроблення та дослідження системи активного контролю для круглошліфувального верстата-автомата з підвищеними показниками точності, стабільності та адаптивності на основі індуктивних вимірювальних перетворювачів мікропереміщень.

Для досягнення мети у кваліфікаційній роботі бакалавра потрібно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати технічні характеристики та службове призначення системи активного контролю, що застосовується на круглошліфувальному верстаті-автоматі;
- провести критичний аналіз існуючих аналогів і сучасних технічних рішень у сфері активного контролю лінійних розмірів деталей;
- описати принцип роботи систем активного контролю та фізичні перетворення, покладені в основу вимірювання лінійних розмірів;
- розробити структурну схему системи активного контролю та визначити функціональні зв'язки між її основними вузлами;
- проаналізувати принцип роботи системи та встановити взаємодію вимірювального, обробного і командного блоків;
- побудувати кінематичну схему вимірювального вузла з урахуванням вимог до мінімізації люфтів та підвищення жорсткості конструкції;
- виконати комплексний розрахунок точності системи активного контролю, що включає визначення сумарної похибки приладу з урахуванням метрологічних, механічних і температурних складових, розрахунок точності

відліково-командного пристрою з адаптивною системою формування керуючих сигналів, а також визначення параметрів індуктивного вимірювального перетворювача мікропереміщень із оцінюванням його чутливості, лінійності та стабільності;

– розробити методику повірки приладів активного контролю відповідно до вимог нормативної документації;

– провести аналіз методів випробувань і калібрування вимірювальних перетворювачів та дослідити точність роботи системи активного контролю безпосередньо в процесі обробки деталей;

– розробити та обґрунтувати програму стендових випробувань системи активного контролю із визначенням критеріїв оцінювання результатів, а також запропонувати метод лінеаризації (калібрування) індуктивного вимірювального перетворювача для зменшення систематичної похибки та підвищення точності вимірювання.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технічна характеристика та службове призначення системи активного контролю до круглошліфувального верстата-автомата

Система активного контролю, призначена для встановлення на круглошліфувальному верстаті-автоматі (рис. 1.1), забезпечує прецизійний контроль посадочного діаметра зовнішніх кілець і діаметра доріжки кочення внутрішніх кілець підшипників безпосередньо в процесі шліфування [1].

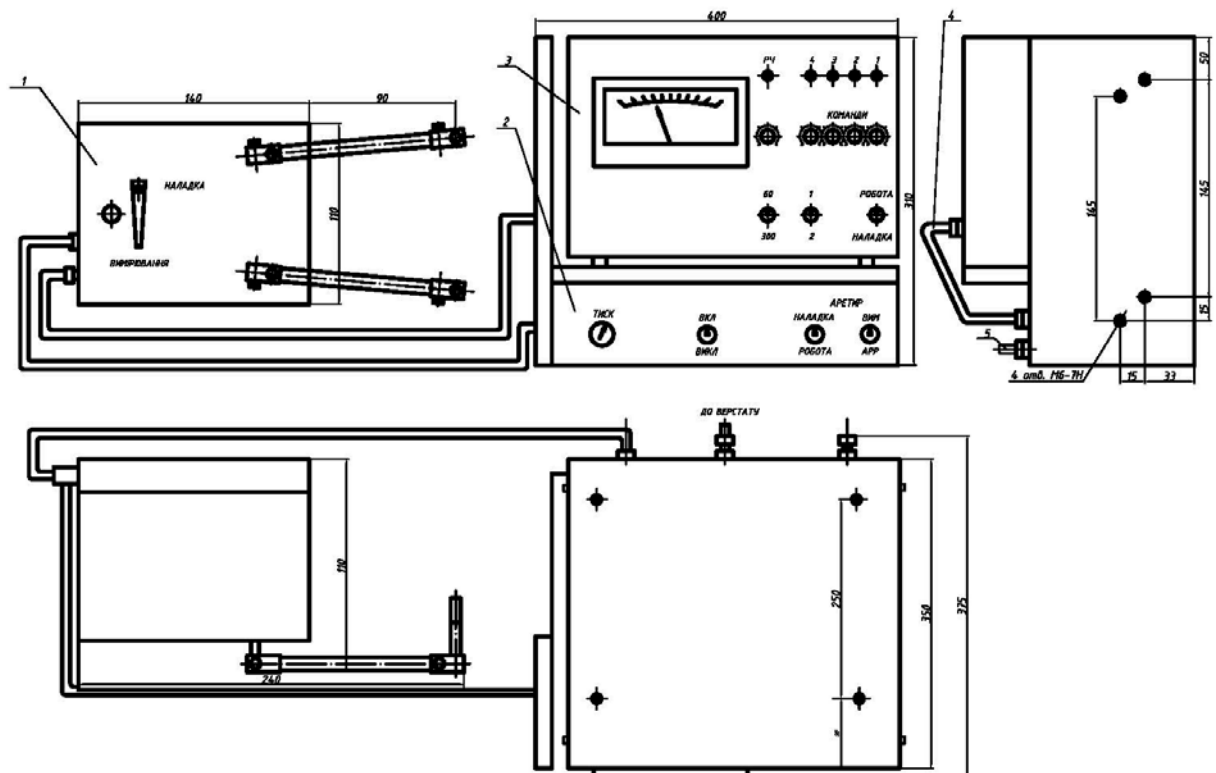


Рисунок 1.1 – Система активного контролю до круглошліфувального верстата-автомата

Система реалізує функції безперервного мікрометричного вимірювання з подальшою обробкою сигналу та формуванням чотирьох керуючих команд, які передаються до системи керування верстатом для автоматичного коригування процесу обробки або його зупинки при досягненні заданого розміру.

З позицій мікро- та наносистемної техніки дана система є інтегрованим вимірювально-керуючим модулем, що поєднує первинні сенсорні перетворювачі мікропереміщень, електронні блоки підсилення та фільтрації сигналу, порогові компаратори й виконавчі елементи системи керування технологічним обладнанням [2].

Залежно від моделі верстата та величини аретування (відведення вимірювальних наконечників) передбачено чотири модифікації системи. Кожна модифікація комплектується спеціалізованими алмазними вимірювальними наконечниками, геометрія та конструкція яких адаптовані до типорозмірів кілець підшипників і забезпечують стабільний контакт із контрольованою поверхнею при мінімальному впливі на процес обробки.

Технічні характеристики.

Контрольовані параметри:

- зовнішній посадочний діаметр;
- діаметр доріжки кочення.

Розміри контрольованих деталей: визначаються відповідною технічною документацією на конкретний тип підшипника.

Вимоги до деталей: припуск на обробку, геометрична форма, стан поверхні заготовки, а також параметри базових поверхонь повинні відповідати вимогам нормативної документації на операцію шліфування. Це забезпечує коректність роботи вимірювальної підсистеми та відтворюваність результатів.

Принцип дії: електронний, з використанням високочутливих вимірювальних перетворювачів переміщення.

Метод вимірювання: порівняння з еталонною мірою (компараторний метод), що відповідає концепції прецизійних мікровимірювань.

Ціна поділки:

- точна шкала – 1 мкм;
- груба шкала – 5 мкм.

Діапазон показів:

- точна шкала – 80 мкм (від +60 до –20);
- груба шкала – 400 мкм (від +300 до –100).

Діапазон вимірювання та величина аретування: визначаються конструктивними параметрами конкретної модифікації відповідно до технічної документації.

Кількість керуючих команд: 4.

Система формує попередні та кінцеву команди у таких діапазонах регулювання (мкм):

- 1 – попередня: 290 (від +300 до +10);
- 2 – попередня: 190 (від +200 до +10);
- 3 – попередня: 90 (від +75 до –15);
- 4 – кінцева: 30 (від –15 до +15).

Метрологічні характеристики:

- нестабільність спрацювання кінцевої команди – не більше 0,5 мкм;
- нестабільність спрацювання попередніх команд – не більше 1,5 мкм;
- зміщення налаштування після 1500 умовних вимірювань (але не більше ніж за 4 години роботи) – не більше 1,5 мкм;
- похибка показів (точна шкала): ± 1 поділка на ділянці ± 10 поділок, ± 5 поділок по всій шкалі;
- похибка показів (груба шкала): ± 1 поділка на ділянці ± 10 поділок, ± 8 поділок по всій шкалі;
- похибка налаштування – не більше 1 мкм.

Зазначені параметри відповідають вимогам до вимірювальних систем мікрометрового рівня точності, характерних для мікро- та наносистемної техніки.

Вимірювальне зусилля на кожному наконечнику: 400 ± 50 Н·с, що забезпечує стабільність контакту без суттєвого впливу на формування мікрогеометрії поверхні.

Час спрацювання реле часу: $1 \pm 0,5$ с.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Максимальний тиск повітря в механізмі аретування: 2 кгс/см² (0,2 МПа).

Електричні параметри:

– опір ізоляції мережі живлення відносно корпусу – не менше 5 Ом при температурі +(10-52) °С та відносній вологості до 80 %;

– електрична міцність ізоляції – витримує випробувальну напругу 500 В;

– споживана потужність – не більше 50 Вт.

Габаритні розміри: відповідно до рисунка 1.1.

Маса: не більше 4,8 кг.

1.2 Аналіз існуючих аналогів, критичний огляд інформаційних джерел

1.2.1 Конструктивні схеми систем активного контролю зовнішнього діаметра при круглому шліфуванні

При обробці деталей типу тіл обертання на центрових круглошліфувальних верстатах широко застосовуються пристрої активного контролю зовнішнього діаметра безпосередньо в процесі врізного шліфування. Використання таких вимірювальних систем дозволяє здійснювати безперервний моніторинг розміру деталі та оперативно коригувати технологічний процес, що особливо важливо при забезпеченні мікрометрової точності. Для контролю зовнішнього діаметра застосовують різні конструктивні схеми вимірювання, які класифікують за кількістю контактних та базових наконечників, що взаємодіють із поверхнею деталі [3, 4].

У пристроях, що працюють за триконтактною схемою (рис. 1.2), вимірювальна скоба 8 оснащена двома жорстко закріпленими наконечниками – контактним 1 і базуючим 9. Вони спираються на оброблювану поверхню та забезпечують фіксоване взаємне положення осі деталі 2 відносно корпусу скоби. Третій контактний наконечник з'єднаний зі стержнем 5, який має можливість переміщення відносно скоби.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

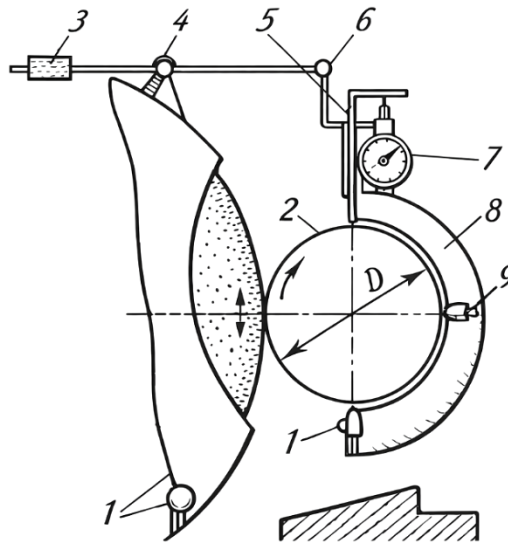


Рисунок 1.2 – Схема триконтактної скоби [4]

Зміна діаметра D сприймається чутливим елементом – штоком індикатора 7 або індуктивного (лінійного) перетворювача переміщення, жорстко пов'язаного зі скобою. Цей перетворювач виконує функцію первинного сенсора мікропереміщень, який перетворює механічну зміну розміру в електричний сигнал, придатний для подальшої обробки.

Зазвичай скоба кріпиться до кожуха шліфувального круга за допомогою ручного підвідного механізму. Це забезпечує зручність встановлення та знімання деталі, оскільки бабка шліфувального круга може відводитися на значну відстань. Така схема є ефективною при послідовному шліфуванні декількох шийок валу одним кругом. Конструкція вузла кріплення передбачає наявність шарнірів, які забезпечують необхідні ступені вільності для самоустановки скоби на поверхні деталі. Підтискання контактних наконечників до поверхні здійснюється вантажем або пружним елементом. Це дозволяє мінімізувати похибки, пов'язані з перекосами та неточностями базування.

Для контролю деталей великого діаметра, особливо при обробці в люнетах, застосовують вимірювальні пристрої з призмою (наїзником) (рис. 1.3). У такій схемі деталь спирається на опорні поверхні призми, а вимірювальний індикатор розташовується по діагоналі кута між ними.

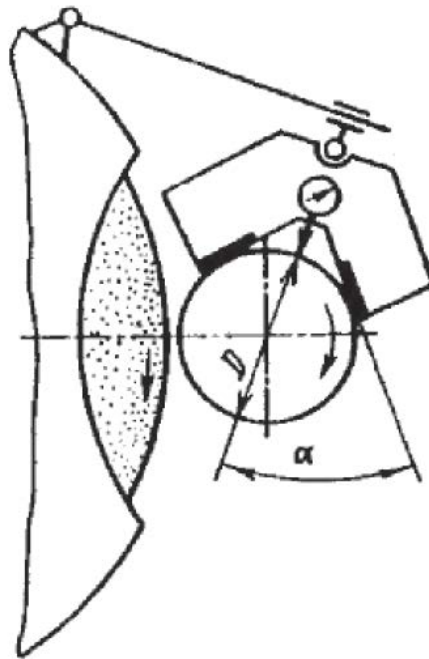


Рисунок 1.3 – Схема призми (наїзника) [4]

Недоліком цієї схеми є висока чутливість до відхилень форми – овальності, огранювання та інших похибок геометрії. Такі відхилення можуть суттєво впливати на результати вимірювання, що обмежує застосування призматичних схем випадками, коли форма деталі відповідає підвищеним вимогам точності. З позицій метрології мікросистем це пов'язано з тим, що вимірюється не лише розмір, а й інтегральний вплив похибок форми.

Найбільшого поширення на круглошліфувальних верстатах набули двоконтактні вимірювальні скоби (рис. 1.4). У такій конструкції контактні наконечники 1 і 3 закріплені на рухомих каретках або важелях 5 і 6, що дозволяє їм відстежувати зміну діаметра D деталі 2. З однією кареткою пов'язаний індуктивний перетворювач 4, а з іншою – упор 7.

Особливістю цієї схеми є те, що випадкові осьові переміщення деталі вздовж лінії вимірювання, викликані силами різання або тепловими деформаціями, практично не впливають на результат контролю. Переміщення, перпендикулярні до лінії вимірювання, також частково компенсуються, особливо на завершальному етапі обробки, коли сила різання зменшується [5].

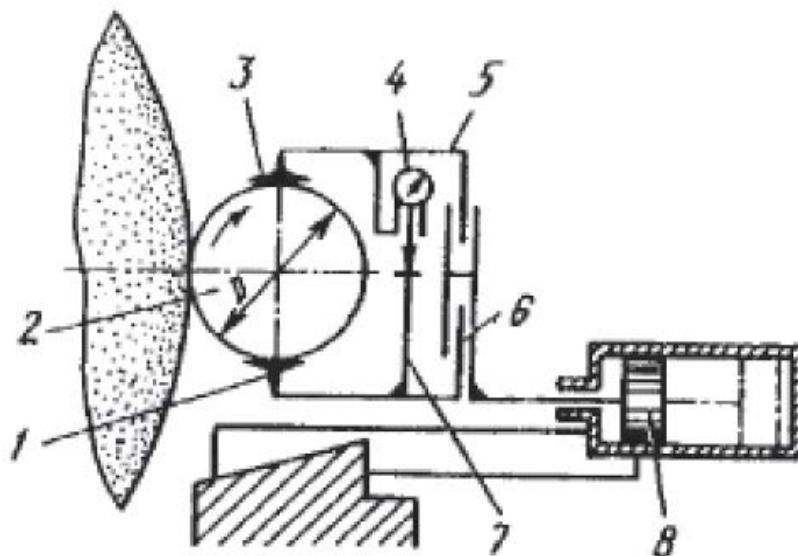


Рисунок 1.4 – Двохконтактна вимірювальна скоба [5]

Двоконтактні скоби з двома рухомими каретками та одним перетворювачем реалізують принцип механічного сумування переміщень. У поєднанні з високочутливими індуктивними або іншими мікропереміщувальними сенсорами це забезпечує підвищену точність вимірювання на рівні одиниць мікрометрів, що відповідає вимогам мікро- та наносистемної техніки.

Зазвичай така скоба закріплюється на столі верстата за допомогою підвідного пристрою та контролює розмір деталі в одному поперечному перерізі. Прямолінійна траєкторія введення і виведення скоби значно спрощує автоматизацію цього процесу та інтеграцію вимірювального вузла до загальної системи керування верстатом.

Таким чином, двоконтактні та триконтактні вимірювальні схеми є основою побудови систем активного контролю при шліфуванні. Вони являють собою приклади інтегрованих сенсорних підсистем, що забезпечують перетворення механічних мікропереміщень у електричні сигнали з подальшою обробкою та формуванням керуючих впливів для забезпечення високоточної обробки деталей.

1.2.2 Мікропроцесорний прилад активного контролю для круглошліфувальних верстатів БВ-4305

Мікропроцесорний прилад активного контролю БВ-4305 з настільною двоконтактною скобою (рис. 1.5) призначений для автоматизованого керування процесом шліфування валів із безперервною циліндричною поверхнею на центрових круглошліфувальних верстатах-автоматах, напівавтоматах та верстатах із ЧПК [6].



Рисунок 1.5 – Прилад БВ-4305 з настільною двоконтактною скобою [6]

Цей прилад являє собою інтегровану вимірювально-керуючу мікросистему, що забезпечує перетворення мікрометричних переміщень у цифрові та аналогові сигнали з подальшим формуванням керуючих впливів на технологічне обладнання в режимі реального часу. Передбачено три виконання приладу БВ-4305, представлених у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Виконання приладу БВ-4305 [6]

Позначення виконання приладу	Діапазон вимірювання скоби, мм	Робочий хід гідроциліндра, мм
БВ-4305	2,5-40	60
БВ-4305-01	10-80	60
БВ-4305-02	40-125	100

Ці прилади відрізняються діапазоном вимірювання та ходом гідроциліндра, що дозволяє адаптувати систему до різних типорозмірів валів (2,5-125 мм). Така модульність відповідає принципам побудови масштабованих вимірювальних мікросистем.

Прилад БВ-4305 складається з наступних функціональних вузлів:

- електронного цифрового блоку управління БВ-6425;
- двохконтактної скоби БВ-3268;
- індуктивного перетворювача БВ-6240;
- гідроциліндра БВ-3326.

Технічні характеристики приладу БВ-4305 представлено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики приладу БВ-4305 [6]

Діаметр шліфованих валів, мм	від 2,5 до 125
Квалітет допуску діаметра за ГОСТ 25346-89	від 5 до 9
Діапазон показів за аналоговою шкалою, мкм	від –100 до +500
Ціна поділки шкали, мкм	1,0 і 10,0
Діапазон показів цифрового відліку, мкм	±999,9
Дискретність цифрового відліку, мкм	0,1
Кількість команд керування	4
Діапазон настройки команд, мкм	від –100 до +500
Межа допустимої похибки спрацьовування кінцевої команди, мкм	не більше 0,2
Межа допустимої похибки спрацьовування попередніх команд, мкм	не більше 1,2
Межа допустимої похибки зміщення настройки кінцевої команди, мкм	не більше 0,8
Аналоговий вихідний сигнал постійного струму – чутливість, мВ/мкм – діапазон, В	20 від +10 до –2
Кодовий вихідний сигнал	RS232
Діапазони електричної коригування нуля, мкм	200 (±100)
Вимірювальне зусилля наконечників скоби, Н	4,0 + 0,5
Споживана потужність, ВА	10
Габарити електронного блоку, мм	296x226x122
Маса електронного блоку, кг	3,8

У структурному відношенні система реалізує повний цикл вимірювання: механічне мікропереміщення → первинний індуктивний сенсор → аналогова обробка → АЦП → цифрова обробка → формування дискретних команд керування [7].

Індуктивний перетворювач забезпечує дискретність цифрового відліку 0,1 мкм, що відповідає вимогам високоточного машинобудування та мікрометричного контролю. Межа допустимої похибки спрацьовування кінцевої команди не перевищує 0,2 мкм, що фактично переводить систему в клас прецизійних вимірювальних засобів. Наявність аналогового виходу (20 мВ/мкм) і цифрового інтерфейсу RS-232 забезпечує інтеграцію приладу в комп'ютеризовані системи моніторингу та збору даних, що відповідає сучасним концепціям кіберфізичних виробничих систем [8].

Контроль зміни діаметра валу в процесі обробки забезпечується двохконтактною скобою 1 (рис. 1.6), забезпеченою індуктивним перетворювачем БВ-6240. За допомогою кронштейна 2 скоба встановлена на каретці 3, що має можливість налагоджувальних переміщень для установки контактних наконечників скоби на найбільший діаметр шліфованої заготовки.

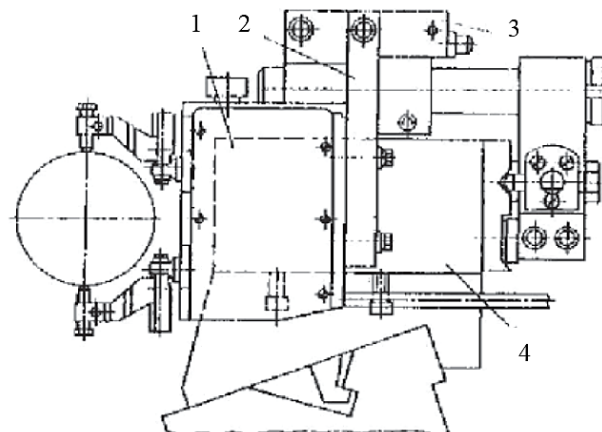


Рисунок 1.6 – Прилад активного контролю з двохконтактною настільною індуктивною скобою [8]

Автоматизація підведення скоби до заготовки, її стабільна орієнтація і повернення в початкове положення забезпечуються гідравлічним циліндром 4 моделі БВ-3326. Двохконтактна скоба БВ-3268 не герметизована і забезпечена вставним герметичним індуктивним перетворювачем БВ-6240.

Робочий цикл шліфування з застосуванням двохконтактною скоби

здійснюється наступним чином. У початковій фазі циклу скоба 1 і шліфувальна бабка займають вихідне положення (відведені від оброблюваної деталі). Для виключення видачі неправдивих команд від приладу активного контролю (ПАК) в неробочому положенні скоби з електричної схеми верстата в блок управління приладу надходить сигнал, що забезпечує блокування ланцюгів видачі команд управління. Після установки заготовки на позиції обробки здійснюються прискорене підведення шліфувального круга і перехід на форсовану або чорнову подачу. У момент, попередній зняттю чорнової частини припуску, масло надходить від гідросистеми верстата до гідроциліндра 4. Завдяки цьому двохконтактна скоба 1 плавно переміщається до заготовки. Одночасно для зняття з блокування командних ланцюгів управління схема верстата формує сигнал, який виконує запуск електронного реле часу (РЧ) в блоці управління. РЧ забезпечує включення командних ланцюгів ПАК з затримкою, що перевищує на 1,5-2 с. час, який необхідний для установки скоби в робоче положення (контактні наконечники знаходяться на деталі). Тепер командні ланцюги приладу можуть видавати керуючі сигнали в систему управління верстата [9].

В процесі обробки індуктивний перетворювач сприймає переміщення вимірювальних кареток скоби. Вихідний сигнал перетворювача перетворюється описаним вище чином в аналоговий і цифрові сигнали для показуючого пристрою блоку і в дискретні команди, що надходять в схему управління верстата [10].

Попередні команди приладу забезпечують перехід від форсованої до чорнової та чистової подачам абразивного круга. На завершальній фазі циклу в режимі чистового або доводочного шліфування з заготовки знімається решта припуску. У момент досягнення заданого розміру формується кінцева команда для відводу шліфувальної бабки і двохконтактною скоби на вихідну позицію.

Конструкція сучасної двохконтактною скоби (типу БВ-3352) показана на рисунку 1.7.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

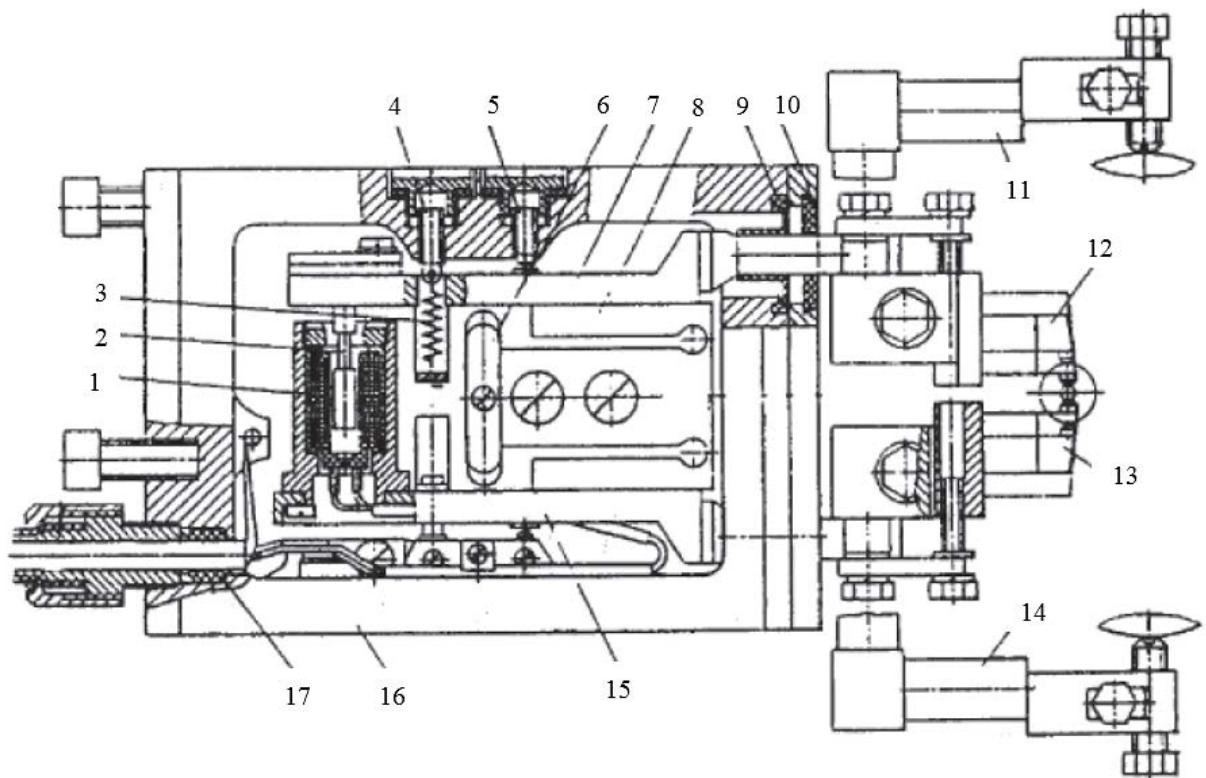


Рисунок 1.7 – Конструкція двохконтактної скоби [10]

У герметичному корпусі 16 кріпиться шарнір 8, виконаний у вигляді цільної металевої пластини з двома пружними перемичками. До шарніру підвішені двохплечі вимірювальні важелі 7 і 15. Осі повороту важелів проходять через середини перемичок шарнірів, що мають мінімальну товщину.

На верхньому вимірювальному важелі встановлений якір 2, що взаємодіє з магнітною системою диференціального індуктивного перетворювача 1, прикріпленого до нижнього важеля. Змінні вимірювальні ніжки 11 і 14 служать для настройки скоби на діапазон діаметрів валів 10-80 мм. Для настройки в діапазоні 2,5-10 мм скоба оснащена комплектом ніжок 12 і 13. Контактні наконечники виконані з синтетичних алмазів зі сферичною формою контактної поверхні.

Контактне зусилля, що створюється пружинами 3, регулюється за допомогою гвинтів 4. Регульовані упори 5, що обмежують поворот вимірювальних важелів, служать в якості баз при налаштуванні скоби. Для запобігання від пошкоджень індуктивного перетворювача і пружних шарнірів

передбачені жорсткі упори 6. Герметизація скоби забезпечена ущільненням 9, 10 і 17 з м'якої маслобензостійкої гуми.

Недоліками двохконтактних скоб в одному корпусі є велике вимірювальне зусилля, велика маса рухомих частин і обмежений діапазон вимірювання. Тому домінуюча тенденція останнього часу – використання двох невеликих одноконтактних головок, з яких збирається скоба (рис. 1.8).

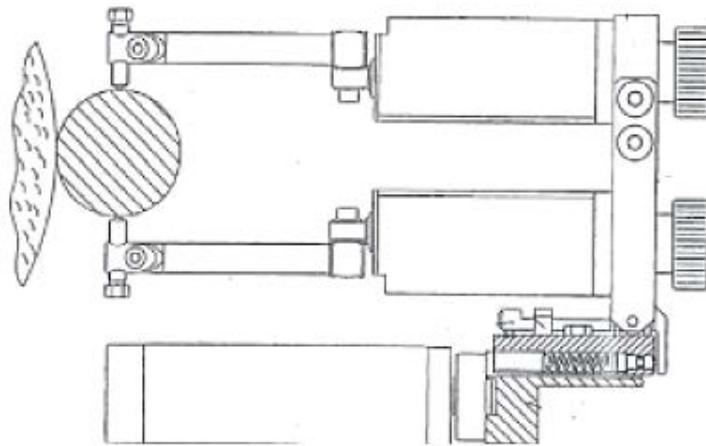


Рисунок 1.8 – Скоба з двох головок [10]

Таке компонування дозволяє збирати скоби для зовнішніх і внутрішніх вимірювань будь-якого розміру, а також вимірювання довжини шийки валу або двостороннього центрування торців валу відносно шліфувального круга.

У блоці ПАК з двома головками проводиться точне електричне підсумовування сигналів індуктивних перетворювачів, так як індуктивні перетворювачі мають лінійні характеристики, а цифровий блок дозволяє їх лінеаризувати.

1.2.3 Прилад активного контролю для деталей з переривчастою поверхнею БВ-4306

Прилад БВ-4306 (рис. 1.9) є мікропроцесорним засобом активного контролю, призначеним для використання на круглошліфувальних верстатах під час обробки деталей із переривчастою поверхнею (шліцьові вали, деталі з пазами, канавками, зубчастими елементами тощо) [6, 11].



Рисунок 1.9 – Прилад для контролю деталей з переривчастою поверхнею БВ-4306 [6]

На відміну від стандартних систем контролю безперервних циліндричних поверхонь, БВ-4306 адаптований до умов, коли вимірювальні наконечники періодично виходять із контакту з деталлю. Це потребує спеціальних алгоритмів цифрової фільтрації, компенсації ударних впливів і коректної інтерпретації сигналів первинного перетворювача [11].

Прилад БВ-4306 являє собою інтелектуальну сенсорну систему, що поєднує:

- високочутливий індуктивний (або інший мікропереміщувальний) перетворювач;
- мікропроцесорний блок обробки сигналів;
- програмні алгоритми виділення корисної складової сигналу;
- систему формування дискретних керуючих команд для верстата.

В умовах переривчастого контакту сигнал вимірювального перетворювача має імпульсний характер і містить високочастотні складові. Тому в електронному блоці реалізовано:

- цифрову фільтрацію;
- часову селекцію вимірювальних інтервалів;

– алгоритми усереднення та компенсації динамічних похибок.

Це дозволяє забезпечити стабільність показань навіть за наявності періодичних розривів контакту та вібрацій, що є типовими для шліфування деталей складного профілю.

Технічні характеристики приладу БВ-4306 наведені в таблиці 1.3 та визначають його метрологічні можливості, діапазон вимірювань, точність формування керуючих команд і параметри інтеграції в систему керування верстата [6].

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики приладу БВ-4306 [6]

Діаметр шліфованих валів, мм	від 10 до 125
Діапазон показів за шкалою, мкм	від -100 до +500
Ціна поділки аналогової шкали, мкм	1,0 і 10,0
Діапазон показів цифрового відліку, мкм	±999,9
Дискретність цифрового відліку, мкм	0,1
Кількість команд керування	4
Діапазон настройки команд, мкм	від -100 до +500
Контактне зусилля наконечників скоби, Н	1,0+0,5
Межа допустимої похибки спрацьовування кінцевої команди, мкм	не більше 0,8-1,0
Межа допустимої похибки спрацьовування попередніх команд, мкм	не більше 1,5
Межа допустимої похибки зміщення настройки кінцевої команди, мкм	не більше 1,0
Габарити електронного блоку, мм	296x226x122
Маса електронного блоку, кг	3,8

Прилад БВ-4306 складається з наступних функціональних вузлів:

- мікропроцесорного блоку БВ-6425-02;
- вимірювального оснащення (скоби або двох одноконтактних головок);
- гідроциліндра БВ-3326.

Кінематична схема двоконтактної скоби показана на рисунку 1.10.

У герметичному корпусі скоби встановлені два автономних, ідентичних за конструкцією вимірювальних пристроїв. Для підвіски рівноплечого вимірювального важеля 1 застосований пружний інтегральний шарнір 15, виконаний у вигляді цільної пластини з виїмкою, окресленої по дузі кола [11].



Внутрішня порожнина скоби або головок заповнена в'язкою поліметилсілоксановою демпфуючою рідиною, наприклад, ПМС2500 (ГОСТ 13032-77) з кінематичною в'язкістю 1500-2500 сСт, що служить для гасіння вібрацій вимірювальних важелів і зменшення відриву контактних наконечників від оброблюваної поверхні валу. Скоба містить два індуктивних перетворювачі,

електричне підсумовування сигналів яких здійснюється в цифровому блоці. У разі зміщення центру оброблюваного валу уздовж лінії вимірювання на ± 150 мкм сумарний вихідний сигнал залишається постійним, а похибка алгебраїчного підсумовування не перевищує 1,0 мкм.

У процесі шліфування валу, що має переривчасту поверхню, на вхід електронної схеми приладу надходять сигнали, які чергуються – корисні, пропорційні розміру валу за виступами, і хибні при западанні контактних наконечників у западини. Електронна схема блоку БВ-6425-02 містить програмний пристрій, що дозволяє сприймати тільки корисну інформацію (розмір виступів), не пропускаючи хибних сигналів, що надходять від западин.

Сигнал a , що відповідає діаметру шліфованої заготовки, надходить від індуктивних перетворювачів A і B на вхід цифрового блоку. Графік зміни амплітуди сигналу $a = f(t)$, показаний на рисунку 1.11, збігається з траєкторією руху контактного наконечника скоби по переривчастій поверхні. Сигнал a в процесі зняття припуску буде містити ряд послідовно зменшених значень $a_1, a_2, \dots, a_n$. У блоці сигнал перетворюється в двійкові коди, які відповідають поточному значенню рівня сигналу за даний цикл вимірювання [12].

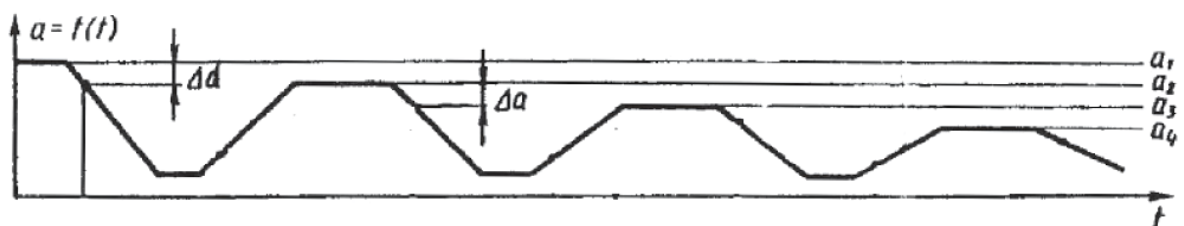


Рисунок 1.11 – Графік зміни амплітуди сигналу $a = f(t)$ [12]

Програмний пристрій блоку вибирає кілька значень кодів за заданою ознакою, наприклад, однакових кодів, що відповідають розміру виступу, які усереднюються. Усереднені значення відповідають розміру оброблюваної деталі за цикл вимірювання. Програмне пристрій дозволяє в процесі налагодження за допомогою клавіш передньої панелі вибирати значення часу t_1

(рис. 1.12) підйому наконечника на виступ деталі, часу t_2 відриву і заспокоєння наконечника і часу t_3 положення наконечника, що відповідає розміру виступу деталі.

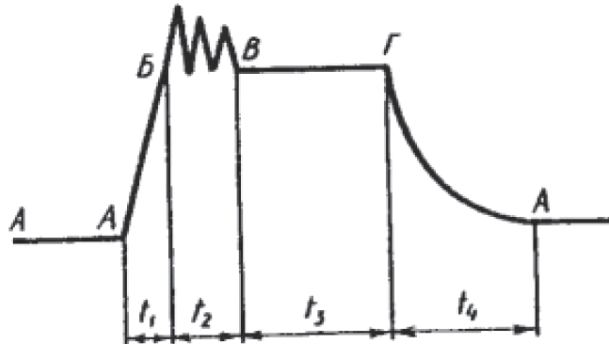


Рисунок 1.12 – Траєкторія переміщення контактної наконечника переривчастої поверхні [12]

Сигнали, що надходять за час t_1 і t_2 , ігноруються, а сигнали, що надходять за час t_3 , усереднюються і перетворюються в цифрові покази і вихідні команди блоку управління. Підбором параметрів часу t_1 , t_2 і t_3 можна легко переналаштовувати програмний пристрій блоку на контроль деталі з різною переривчастою поверхнею. У вихідному (відведеному від деталі) положенні скоби її електромагніти аретування знеструмлені, а контактні наконечники розведені.

Таким чином, БВ-4306 є прикладом сучасної промислової вимірювальної мікросистеми з елементами цифрової обробки сигналів, що демонструє практичне застосування принципів сенсорики, мікропроцесорної техніки та інтелектуального керування в умовах складних динамічних процесів обробки.

1.2.4 Прилад активного контролю БВ-4309

Прилад активного контролю БВ-4309 (рис. 1.13) призначений для автоматизованого керування процесом спряженого шліфування валів із безперервною циліндричною поверхнею, які забезпечують заданий зазор або натяг при встановленні в попередньо оброблені отвори корпусів чи гільз [13].



Рисунок 1.13 – Прилад для спряженого шліфування БВ-4309 [13]

Технічні характеристики приладу БВ-4309 представлено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики приладу БВ-4309 [13]

Діаметр шліфованих валів і спряжених отворів, мм	від 2,5 до 125
Параметри шорсткості Ra за ГОСТ 2789-73, мкм	від 0,025 до 0,2
Квалітет за ГОСТ 25346-89, який визначає найменше значення допуску зазору в спряженні	2
Сталість діаметра валу і отвору в поперечному перерізі в зоні контакту з наконечниками, у відсотках від допуску зазору	25-30%
Допуск отвору, мкм	не більше 50
Припуск під шліфування валу на діаметр, мм	від 0,03 до 0,05
Кількість команд керування	4
Діапазон регулювання рівнів спрацьовування команд, мкм	від -50 до +50
Діапазони електричного коригування нуля, мкм	± 10
Діапазон показань за шкалою, мкм	± 50
Ціна поділки шкали, мкм	1
Діапазон показів цифрового відліку, мкм	$\pm 999,9$
Дискретність цифрового відліку, мкм	0,1
Межа допустимої похибки спрацьовування кінцевої команди, мкм	не більше 0,2
Межа допустимої похибки спрацьовування попередніх команд, мкм	не більше 1,0
Межа допустимої похибки зміщення настройки кінцевої команди, мкм	не більше 0,8
Допустима похибка підсумовування, мкм	
– в діапазоні ± 10 мкм від нуля шкали	0,30
– в діапазоні ± 50 мкм від нуля шкали	0,50
Точність отримання зазору в спряженні при шліфуванні, мкм	2-4
Контактне зусилля наконечників, Н	
– скоби	1,0 + 0,5
– пристрою для отворів	0,5 + 0,25
Габарити електронного блоку, мм	292x226x122
Маса електронного блоку, кг	3,8

Прилад БВ-4309 (рис. 1.13) складається з наступних функціональних вузлів:

- цифрового блоку БВ-6425-03;
- скоби БВ-3352 або скоби з двох головок;
- вимірювального оснащення для контролю діаметра отвору;
- гідроциліндра БВ-3326.

Його застосування орієнтоване на центрові прецизійні круглошліфувальні напівавтомати та верстати з числовим програмним керуванням, де необхідна стабільна реалізація посадок із мікрометричною точністю. Прилад БВ-4309 є високоточною інтегрованою вимірювально-керуючою мікросистемою, яка забезпечує:

- вимірювання мікропереміщень у процесі формування розміру;
- перетворення механічної величини у цифровий інформаційний сигнал;
- алгоритмічну обробку даних із урахуванням допусків посадки;
- формування керуючих команд для завершення обробки при досягненні заданого натягу або зазору.

На відміну від стандартного контролю абсолютного розміру, у випадку спряженого шліфування визначальним параметром є не лише діаметр вала, а й забезпечення функціональної посадки в системі «вал-отвір». Це передбачає:

- урахування допусків обох елементів спряження;
- забезпечення стабільності кінцевого розміру в межах одиниць мікрометрів;
- мінімізацію температурних та силових деформацій у процесі шліфування.

Прилад реалізує принцип замкненого керування розміром, коли сигнал із первинного сенсора (індуктивного або іншого високочутливого перетворювача переміщення) обробляється мікропроцесорним блоком і використовується для адаптивного регулювання режимів подачі шліфувального круга.

Структурно БВ-4309 можна розглядати як складову кіберфізичної

виробничої системи, що включає:

- сенсорний рівень – прецизійний вимірювальний вузол мікропереміщень;
- рівень обробки сигналів – цифрова фільтрація, компенсація похибок, програмна лінеаризація;
- рівень прийняття рішень – формування команд переходу між режимами шліфування та видача кінцевої команди зупинки;
- інтерфейсний рівень – інтеграція з системою ЧПК.

Така багаторівнева структура повністю відповідає сучасним підходам мікро- та наносистемної техніки, де сенсорика, електроніка та програмне забезпечення функціонують як єдиний інтегрований комплекс.

Забезпечення стабільного натягу або гарантованого зазору є критично важливим для вузлів тертя, підшипникових посадок, гідравлічних систем і прецизійних механізмів. Завдяки високій роздільній здатності вимірювання та мінімальній похибці спрацьовування прилад БВ-4309 дозволяє:

- підвищити повторюваність посадок;
- зменшити вплив людського фактора;
- забезпечити стабільну якість продукції при серійному виробництві.

Таким чином, БВ-4309 є прикладом практичної реалізації принципів мікропроцесорної сенсорної техніки та адаптивного керування технологічними процесами у сфері прецизійної механічної обробки.

Проведений аналіз приладів активного контролю типів БВ-4305, БВ-4306 та БВ-4309 показав, що сучасні системи вимірювання, інтегровані в круглошліфувальні верстати, еволюціонували від простих механічних індикаторних пристроїв до інтелектуальних мікропроцесорних вимірювально-керуючих мікросистем.

Спільними рисами розглянутих аналогів є:

- використання високочутливих індуктивних перетворювачів мікропереміщень;

- мікропроцесорна обробка сигналів із можливістю цифрової лінеаризації;
- формування дискретних керуючих команд у замкненому циклі;
- інтеграція з системами ЧПК та автоматизованими виробничими комплексами;
- забезпечення мікрометричного рівня точності (до 0,1 мкм дискретності).

Водночас кожен із приладів орієнтований на специфічні технологічні задачі:

- БВ-4305 – універсальний контроль безперервних циліндричних поверхонь;
- БВ-4306 – адаптований до вимірювання деталей із переривчастою поверхнею та динамічними навантаженнями;
- БВ-4309 – спеціалізований для забезпечення спряжених посадок із заданим натягом або зазором.

Аналіз показав, що основними напрямками розвитку аналогічних систем є:

- зменшення маси та інерційності вимірювальних вузлів;
- підвищення чутливості сенсорів;
- впровадження цифрової фільтрації та адаптивних алгоритмів;
- розширення інтерфейсних можливостей для інтеграції у кіберфізичні виробничі системи.

Розглянуті аналоги є прикладами промислових сенсорних мікросистем, у яких реалізовано повний цикл перетворення фізичної величини (мікропереміщення) в інформаційний сигнал із подальшим керуванням технологічним процесом.

Таким чином, досліджені прилади демонструють високий рівень розвитку вимірювальної техніки в галузі прецизійної обробки та формують технічну базу для подальшого вдосконалення інтелектуальних мікро- та наносистем активного контролю.

1.3 Фізичні перетворення, які використовуються в системах активного контролю

Автоматизовані системи активного контролю призначені для вимірювання геометричних параметрів деталей безпосередньо в процесі їх механічної обробки та формування керуючих впливів на технологічне обладнання за результатами цих вимірювань. Такі системи є інтегрованими сенсорно-керуючими комплексами, що реалізують замкнений цикл перетворення фізичної величини (лінійного розміру) в інформаційний сигнал із подальшим автоматичним регулюванням процесу оброблення [14].

Контроль розмірів може здійснюватися:

- у робочій зоні верстата – операційний контроль (рис. 1.14);
- поза зоною обробки – виносний контроль.

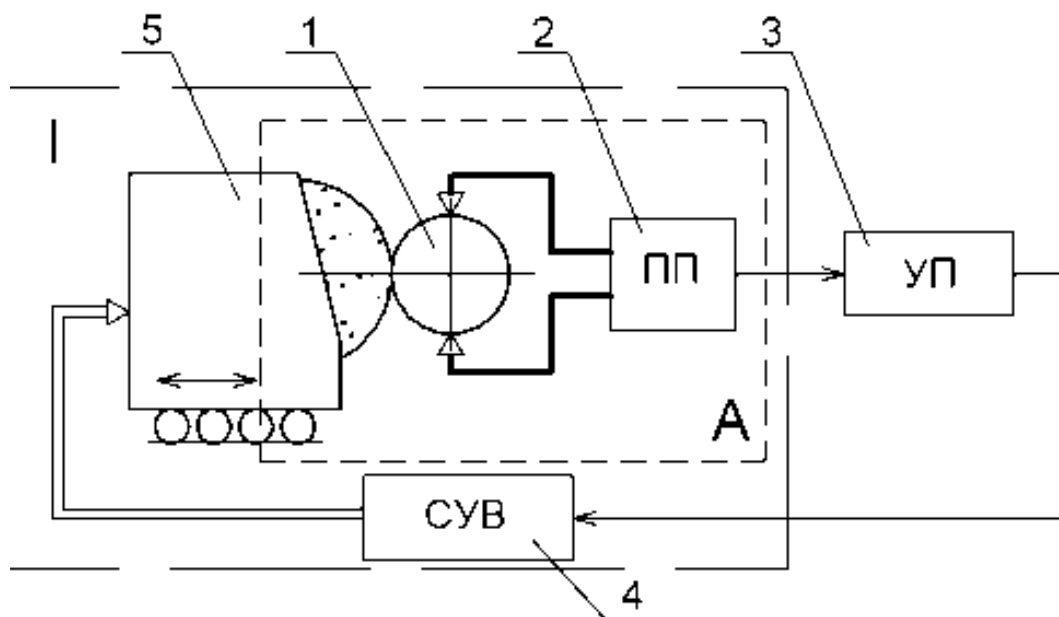


Рисунок 1.14 – Схема операційного контролю: I – верстат. 1 – деталь, що оброблюється; 2 – первинний вимірювальний перетворювач;
3 – управляючий пристрій; 4 – схема управління верстатом;
5 – виконавчий орган верстата; А – робоча зона оброблення [14]

Операційний контроль забезпечує вимірювання параметра безпосередньо в зоні різання, що дозволяє відстежувати зміну розміру в реальному масштабі часу та оперативно коригувати режим обробки.

У схемі операційного контролю первинний вимірювальний перетворювач 2 встановлюється в робочій зоні та безпосередньо контактує з оброблюваною поверхнею. Він перетворює лінійний розмір (наприклад, зовнішній діаметр) у проміжний електричний сигнал. Сигнал обробляється в управляючому приладі 3, на виході якого формуються команди управління верстатом. Команди управління поступають у схему верстата і реалізуються виконавчими органами верстата, які, у свою чергу, переміщують різальний інструмент. Тобто реалізується послідовність: розмір деталі → сенсор → вимірювальний пристрій → блок формування команд → система керування верстатом → виконавчі органи → зміна положення інструмента.

Таким чином формується замкнений контур автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком, у якому об'єктом регулювання є геометричний розмір деталі.

Переваги операційного контролю:

- можливість аналізу динаміки процесу обробки;
- формування керуючих впливів на будь-якому етапі циклу;
- швидка компенсація випадкових збурень (температурних, силових, вібраційних).

Це відповідає принципам адаптивного керування та реального часу (real-time control).

Незалежно від типу верстата, система активного контролю будується за типовою структурною схемою, представленою на рисунку 1.15. Ця структура відповідає архітектурі автоматизованої вимірювально-керуючої мікросистеми, де поєднуються сенсорний, електронний та програмний рівні. Якщо система використовується на верстаті з ЧПК, функції формування закону регулювання доцільно реалізувати засобами мікропроцесорної системи керування верстатом.

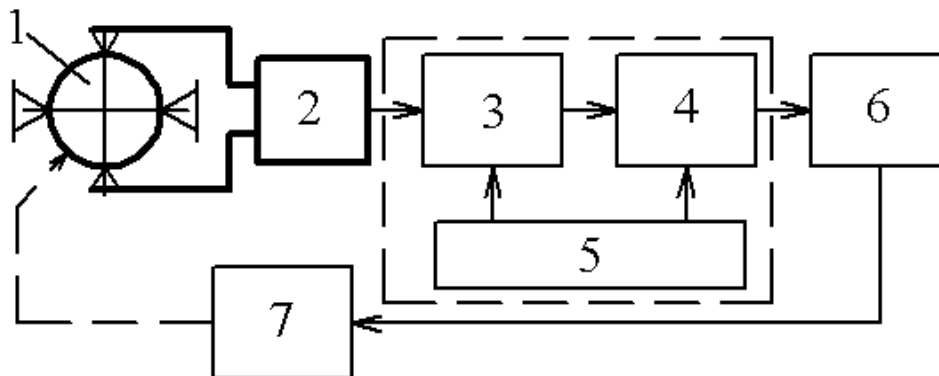


Рисунок 1.15 – Структурна схема засобу активного контролю: 1 – деталь, розміри якої контролюються (об’єкт регулювання); 2 – вимірювальний перетворювач; 3 – вимірювальний пристрій; 4 – пристрій формування команд управління; 5 – блок живлення; 6 – схема управління верстатом; 7 – виконавчий орган верстату [14]

Це забезпечує:

- гнучкість алгоритмів,
- програмну адаптацію до типу деталі,
- цифрову компенсацію похибок,
- інтеграцію у виробничі інформаційні мережі.

У зв’язку з визначальним впливом на кінцевий розмір такі комплекси часто називають системами керування точністю оброблення.

Прилади активного контролю, як правило, фіксують не повний розмір деталі, а величину припуску на оброблення. Повний розмір задається жорстким механічним налаштуванням вимірювальної оснастки (калібруванням). Діапазон вимірювання зазвичай перевищує максимальний припуск на 50-100 %, що забезпечує резерв для стабільного функціонування системи.

Основним вузлом, від якого залежить точність системи, є первинний вимірювальний перетворювач. Саме він визначає метрологічні характеристики, чутливість, діапазон вимірювання, стабільність роботи в умовах виробництва.

За принципом дії використовують резистивні, пневматичні, індуктивні, ємнісні, комбіновані (наприклад, пневмоелектроконтактні) [15].

Найбільшого поширення набули індуктивні перетворювачі, зокрема диференціальні. Вони характеризуються високою лінійністю, діапазоном вимірювання до 1000 мкм, стабільністю параметрів, технологічною надійністю.

У сучасних системах сигнал з перетворювача піддається аналого-цифровому перетворенню та цифровій фільтрації, що дозволяє підвищити точність та зменшити вплив шумів.

За видом вихідного сигналу перетворювачі поділяються на аналогові та дискретні, а за способом взаємодії з деталлю на контактні та безконтактні [16].

Конструктивно первинний перетворювач може бути виконаний як окремий сенсор або як інтегрований вузол, що включає вимірювальний механізм, оснастку, механізм арретування, елементи кріплення та регулювання (рис. 1.16).

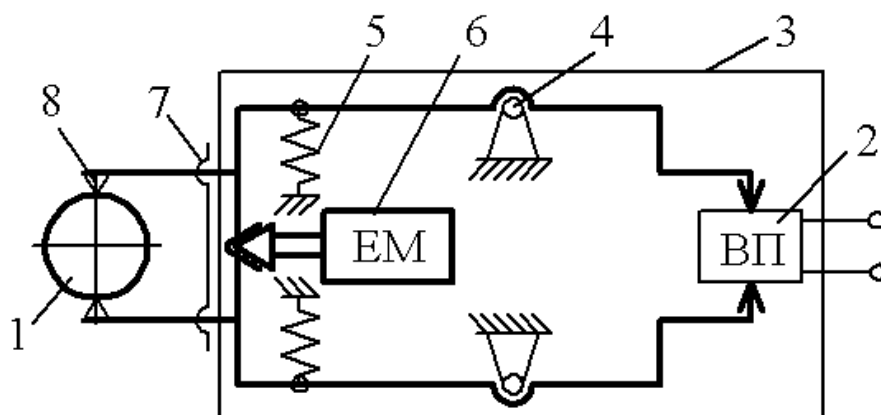


Рисунок 1.16 – Схема первинного перетворювача: 1 – деталь, діаметр якої контролюється; 2 – вимірювальний перетворювач; 3 – корпус; 4 – шарнірні опори; 5 – пружини для створення вимірювального зусилля; 6 – механізм арретування; 7 – ущільнюючий елемент; 8 – вимірювальні наконечники [16]

Перед проектуванням вимірювальної оснастки враховують геометрію поверхні деталі, діапазон та розмірами вимірювального перетворювача, компоновку верстата, вимоги до жорсткості та термостабільності.

Автоматизовані системи активного контролю є прикладом промислових мікросистем, у яких реалізовано:

- високоточну сенсорику мікропереміщень;
- електронне та цифрове перетворення сигналів;
- програмне формування закону регулювання;
- інтеграцію в замкнений контур керування.

Необхідно також враховувати деякі специфічні особливості конструкції:

- люфти у механічних передачах не допускаються;
- кількість регулюючих елементів повинна бути мінімальною;
- вплив температури, вібрації, інших механічних дій повинні бути або компенсовані, або прийняті міри по захисту від них;
- для роботи вимірювального перетворювача, механізму арретування слід використовувати тільки ті види енергії, які присутні у схемі технологічного обладнання.

Залежно від умов використання формуються вимоги до вимірювальних перетворювачів, але існує ряд загальних вимог:

- лінійність перетворення;
- висока чутливість і точність;
- стабільність характеристик у часі;
- висока надійність, зручність в експлуатації;
- висока вибірність і захист від шумів;
- простота та технологічність конструкції;
- стандартизація та взаємозамінність елементів конструкції.

Пристрої формування команд (відліково-командні або керуючі прилади) призначені для приймання та обробки інформаційного сигналу, що надходить від первинного вимірювального перетворювача, з подальшим генеруванням керуючого впливу для системи управління технологічним обладнанням. Фактично вони виконують функцію проміжної ланки між сенсорним рівнем і виконавчими механізмами верстата, забезпечуючи перетворення

вимірювальної інформації у сигнали, придатні для реалізації автоматичного регулювання процесу обробки [17].

Структурна схема управляючого приладу (рис. 1.17) визначається типом застосованого вимірювального перетворювача, особливостями технологічного процесу та характеристиками обладнання, з яким інтегрується система. Іншими словами, архітектура приладу формується з урахуванням фізичного принципу перетворення сигналу, вимог до точності та швидкодії, а також способу взаємодії з системою керування верстата (традиційною або з ЧПК). Це забезпечує оптимальне узгодження сенсорного, електронного та виконавчого рівнів у складі автоматизованої вимірювально-керуючої системи.

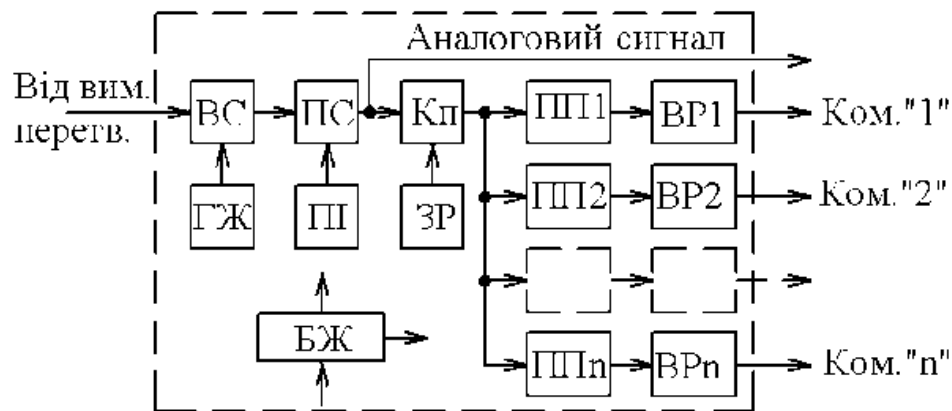


Рисунок 1.17 – Структурна схема управляючого приладу:

ВС – вимірювальна схема; ПС – попередній підсилювач струму;

Кп – пороговий підсилювач (компаратор); ГЖ – генератор живлення вимірювальної схеми; ПІ – пристрій індикації; ЗР – задавач рівня команд;

ПП1-ПП_n – підсилювачі потужності; ВР1-ВР_n – вихідні реле;

БЖ – блок живлення [17]

Сигнал з вимірювального перетворювача поступає у вимірювальну схему приладу ВС і підсилюється попереднім підсилювачем ПС. Для стабільної роботи вимірювальної схеми використовується додатковий стабілізатор живлення ГЖ. З попереднього підсилювача сигнал поступає на стрілочний,

цифровий або сигнальний пристрій індикації і на пороговий підсилювач Кп, у якому формуються рівні спрацювання вихідних дискретних команд. Ці сигнали підсилюються підсилювачами потужності ПП1...ПП_n і приводять до спрацювання вихідних реле. Вихід управляючого приладу з'єднується з схемою управління верстатом. Якщо прилад встановлюється на верстаті з ЧПК, то у ньому повинен бути додатковий вихід з нормованим електричним сигналом, наприклад, 0-5 мА або 0-1 В. Живлення всіх елементів схеми приладу забезпечується блоком живлення БЖ.

Якщо вихідний сигнал первинного вимірювального перетворювача має неелектричну природу (наприклад, пневматичну), до складу вимірювальної схеми обов'язково вводиться проміжний перетворювач, зокрема пневмoeлектричний. Він забезпечує трансформацію фізичної величини у стандартизований електричний сигнал, придатний для подальшого підсилення, аналого-цифрового перетворення та цифрової обробки.

Керуючі (відліково-командні) прилади зазвичай виконуються у вигляді автономних функціональних модулів. У більшості випадків вони мають універсальний характер застосування: можуть інтегруватися з різними типами металорізальних верстатів та працювати з вимірювальними перетворювачами одного класу (аналоговими, індуктивними, пневматичними тощо). Така уніфікація спрощує модернізацію обладнання та забезпечує гнучкість виробничих систем [18].

Вимірювальна схема керуючого приладу повинна відповідати підвищеним метрологічним вимогам і забезпечувати:

- максимальну чутливість до малих змін контрольованого параметра;
- високу лінійність передатної характеристики;
- стабільність порогів формування керуючих команд;
- ефективний захист від зовнішніх збурень (температурних, електромагнітних, механічних).

У сучасних системах це досягається шляхом застосування малошумних

підсилювачів, екранування, цифрової фільтрації та алгоритмічної компенсації похибок. Таким чином, керуючий прилад виступає центральною ланкою вимірювально-керуючої мікросистеми, забезпечуючи надійне перетворення сенсорної інформації у стабільний керуючий вплив на технологічний процес [19].

Найбільш поширені вимірювальні схеми для роботи з індуктивними перетворювачами – мостові схеми змінного струму, що працюють у режимі врівноваження, або у режимі відхилень (неврівноважені мости). Суть фізичних перетворень полягає у наступному: зміна розміру деталі приводить до зміни індуктивності L котушки у вимірювальному перетворювачі, що приводить до зміни реактивного опору котушки x_L від проходження через неї змінного струму, а відповідно, і до зміни повного опору $z = x_L + r_a$.

Мостові схеми і служать для вимірювання опору. Вимірювальний міст – це послідовне кільцеве з'єднання чотирьох опорів, які називаються плечами моста, та утворюють дві діагоналі: ac – діагональ живлення і bd – діагональ навантаження (вимірювальна) (рис. 1.18). Міст буде врівноваженим – струм I_B у вимірювальній діагоналі не протікає – $I_B = 0$, за умові рівності добутку опорів протилежних плеч: $z_1 \cdot z_4 = z_2 \cdot z_3$.

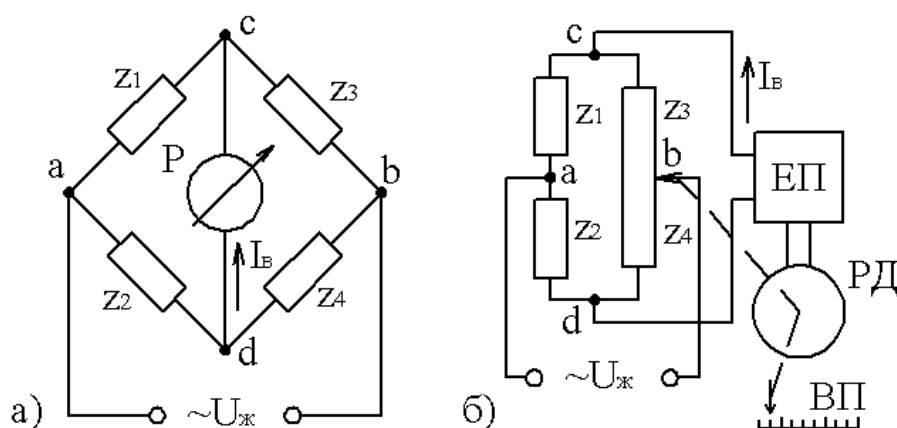


Рисунок 1.18 – Схема неуврівноваженого (а) та уврівноваженого (б) автоматичних вимірювального мостів [19]

Для вимірювання, у одне з плеч моста включають елемент, наприклад, котушку індуктивного перетворювача, опір якого необхідно визначити. Зміна опору z_x викличе відповідну зміну струму у вимірювальній діагоналі неврівноваженого моста – $I_B = f(z_x)$.

Для узгодження вхідного опору навантаження – показуючого приладу (рис. 1.18, а) чи вимірювального підсилювача (рис. 1.18, б), – з загальним опором моста, необхідно, щоб виконувалась умова (1.1):

$$z_H = \frac{z_1 \cdot z_2}{z_1 + z_2} + \frac{z_3 \cdot z_4}{z_3 + z_4}. \quad (1.1)$$

У автоматичних врівноважених мостах (рис. 1.18, б) плечі z_3 і z_4 утворені одним змінним резистором (реохордом), середньою точкою якого є движок, механічно з'єднаний з валом реверсивного двигуна РД. У вимірювальну діагональ включено підсилювач ЕП, навантаженням якого і є реверсивний двигун. При розбалансуванні моста – змінюється опір вимірювального плеча z_x , на вході підсилювача з'являється сигнал неузгодження і починає обертатись вал двигуна РД в ту або іншу сторону, переміщуючи движок реохорда до того часу, доки не відновиться баланс схеми. Вал двигуна РД механічно зв'язаний зі стрілкою відлікового пристрою ВП, по якому і проводиться зчитування показів.

У приладах активного контролю переважно використовуються схеми неврівноважених мостів змінного струму, з частотою живлення 5-20 кГц. У одне з плеч моста включається котушка індуктивного перетворювача, а у решті плеч встановлюються постійні резистори з еквівалентним активним опором (рис. 1.19, а).

З метою збільшення діапазону вимірювання і лінеаризації передатної характеристики широко застосовуються диференціальні вимірювальні схеми (рис. 1.19, а), а також схеми з трансформаторним зв'язком (рис. 1.19, б).

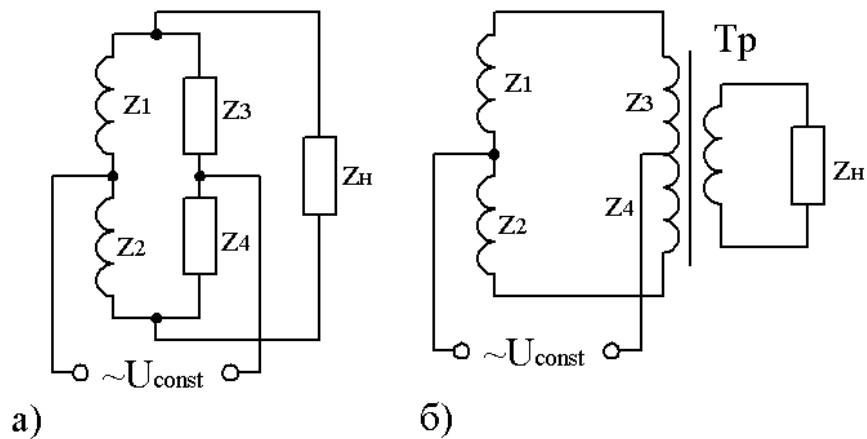


Рисунок 1.19 – Схема вимірювального моста з диференціальною котушкою (а) і з трансформатором (б) [19]

У схемах високоточних індуктивних приладів, з метою підвищення чутливості, між вимірювальним мостом і вихідним показуючим приладом встановлюють додатково підсилювачі струму, а для отримання на виході приладу аналогового сигналу – нормуючі підсилювачі. У цьому випадку опір навантаження R_n – вхідний опір електронного підсилювача, буде доволі значним.

У якості показуючих пристроїв у індуктивних приладах для лінійних вимірювань, в основному використовуються мікроамперметри і мілівольтметри магнітоелектричної системи, які через підсилювач струму з'єднуються з вимірювальною діагоналлю моста.

У вихідних каскадах для видачі управляючих дискретних команд використовуються електромагнітні реле. Їх кількість рівна кількості вихідних команд. Вихідні реле підключаються до вимірювальної схеми через підсилювач потужності.

Для розділення вихідних команд за рівнем вимірювального сигналу служать компаратори напруги – електронні ключі, які спрацьовують дискретно, коли вхідний сигнал стає рівним опорній напрузі. А опорна напруга виставляється регулятором рівня спрацювання команди. Таким чином, спрацювання вихідного реле відбувається у заданий момент, тобто, за

досягнення значення розміру необхідної, наперед заданої величини. Спрацювання останньої команди в управляючих приладах завжди відбувається, коли стрілка показуючого пристрою доходить до відмітки «0» шкали і не може бути зміщена.

Високі вимоги висуваються до блоків живлення, які, як правило, живляться від мережі змінного струму 220 В. Вихідна напруга повинна бути високо стабілізованою та незмінної протягом тривалого часу роботи.

Для захисту від електричних наводок та високочастотних завад у схемах живлення використовуються комбіновані LC – фільтри.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Структурні схеми систем активного контролю

Системи активного контролю реалізують повний комплекс функціональних операцій, необхідних для визначення фактичного значення контрольованого параметра та його порівняння із заданим (номінальним) значенням. На основі результатів такого порівняння формується керуючий вплив, що забезпечує коригування режимів оброблення і досягнення необхідної точності виготовлення деталі. Інакше кажучи, система виконує послідовність дій: вимірювання → перетворення сигналу → обробка та аналіз → порівняння з еталоном → формування керуючої команди → вплив на технологічний процес.

Системи активного контролю є інтегрованими вимірювально-керуючими мікросистемами, у яких поєднані сенсорні елементи, електронні вузли обробки сигналів і програмні алгоритми прийняття рішень у режимі реального часу.

Незалежно від типу технологічного обладнання (традиційні верстати, напівавтомати, верстати з ЧПК), такі системи будуються за узагальненою структурною схемою (рис. 2.1) що складається з окремих вузлів, які призначені для виконання відповідних задач [20].

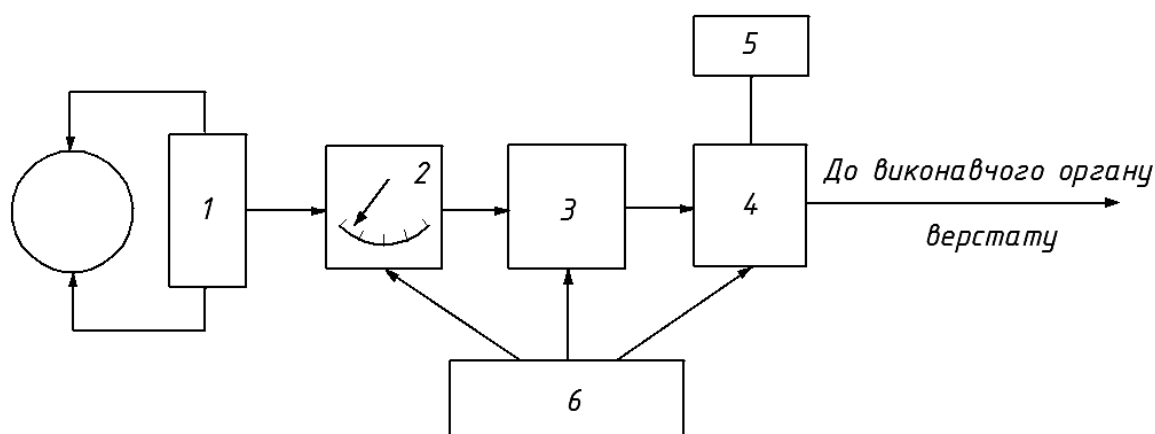


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи активного контролю [20]

Така уніфікована структура забезпечує можливість модульної побудови систем, їх адаптацію до різних умов експлуатації та інтеграцію в автоматизовані та кіберфізичні виробничі комплекси.

Вимірювальна оснастка 1 складається з необхідних щупових механізмів в вигляді скоб, призм, важільних пристроїв тощо, рухомі елементи яких сприймають зміну контрольованого розміру і перетворюють в зручне для подальшого вимірювання переміщення однієї або декількох своїх ланок. Ці перетворення зазвичай виконуються без підсилення, а в деяких випадках навіть з пониженням чутливості. До вимірювальної оснастки відносять також механізми підводу і відводу щупових пристроїв на позицію контролю, а також механізми зв'язку цих пристроїв з верстатом. Основна задача даних механізмів – максимально знизити вплив на результати контролю випадкових переміщень деталі, яка контролюється відносно вузлів верстату, що викликані силами різання, тертя і тепловими явищами.

Для одержання інформації про стан контрольованого параметра у вигляді показів на шкалі переміщення елементів вимірювальної оснастки трансформуються у переміщення стрілки індикатора, проградуєваної у встановлених одиницях вимірювання. Зазначену функцію реалізує вимірювальний прилад 2.

Вимірювальну інформацію, подану у формі аналогового сигналу, перетворюють на дискретний електричний сигнал-команду. Після досягнення контрольованим розміром заданого значення за допомогою сформованих сигналів-команд реалізується автоматичне керування технологічним процесом.

У низці випадків для підвищення точності та надійності дискретний сигнал формують без зміни фізичної природи вимірювальної інформації. Зокрема, у пневматичних приладах, де носієм вимірювальної інформації є тиск стисненого повітря, за допомогою спеціальних пристроїв його перетворюють на дискретний сигнал у вигляді стрибка тиску. Лише після цього здійснюється перетворення в електричний дискретний сигнал-команду. Функцію

формування дискретного сигналу-команди виконує командний пристрій 3.

Реалізація команд приладу на верстаті здійснюється шляхом комутації силових електричних кіл, що забезпечують приведення в дію його виконавчих механізмів. У зв'язку з цим електричний сигнал-команду попередньо підсилюють, а комутацію зовнішніх вихідних електричних ланцюгів виконують за допомогою електромагнітних реле. Сукупність зазначених елементів утворює окремий блок підсилення командних сигналів 4. Для індикації факту виконання команди призначено блок сигналізації 5.

Системи активного контролю обов'язково оснащуються джерелом живлення, а в окремих випадках – двома (зокрема у пневматичних приладах). Для забезпечення та стабілізації заданих параметрів застосовують спеціальні блоки живлення 6.

Розглянута схема побудови системи активного контролю вирішує всю сукупність поставлених задач. Однак у деяких випадках (наприклад, у дрібносерійному виробництві, де технологічне обладнання не пристосовано для сприйняття команд і їх реалізації) не потрібно виконання всіх задач; системи контролю спрощують за рахунок виключення окремих вузлів. Побудова системи активного контролю з окремих самостійних вузлів економічно вигідна і зручна [21].

В якості вимірювальних приладів, широко використовують в системах активного контролю, застосовують механічні, електроконтактні, пневматичні, індуктивні та інші прилади. Вибір того чи іншого приладу залежить від задач, що вирішує система активного контролю, а також від технологічного обладнання, що використовується для обробки деталі [20, 22].

Вимірювальна система з пневматичним приладом (рис. 2.2) володіє високою точністю (забезпечує контроль деталей з допуском 1-го класу точності), дозволяє вести безконтактне вимірювання і, що дуже важливо, може бути побудована з нормалізованих блоків серійного виробництва. Ця вимірювальна система включає в себе командний пристрій в вигляді

електроконтактного перетворювача, тому підсилювачі командних сигналів, блоки живлення і блоки сигналізації використовують ті ж самі, що і для електроконтактного вимірювального засобу.

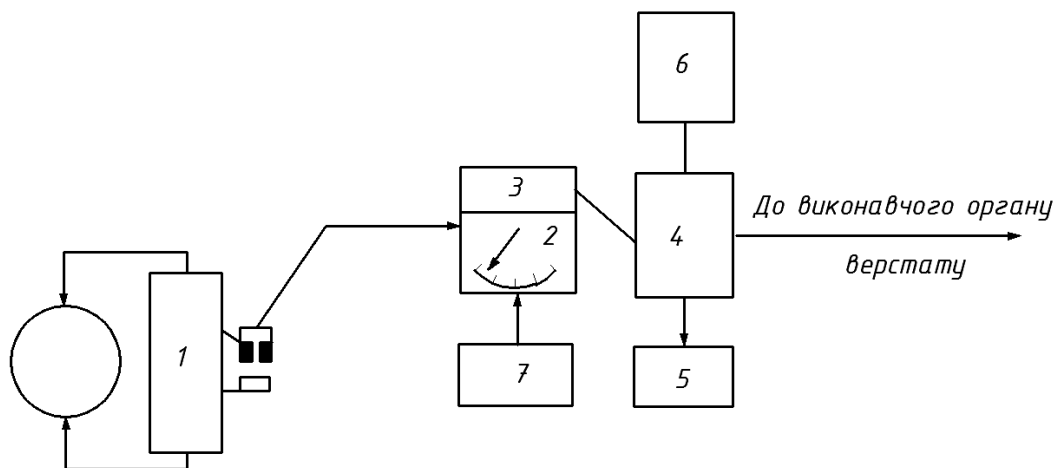


Рисунок 2.2 – Структурна схема вимірювальної системи з пневматичним приладом: 1 – вимірювальна оснастка; 2 – пневматичний прилад зі шкалою; 3 – командний пристрій; 4 – підсилювач командних сигналів; 5 – блок сигналізації; 6 – блок живлення електричною напругою; 7 – блок живлення стисненим повітрям [20]

Блок живлення стисненим повітрям містить стабілізатор тиску та фільтр очищення повітря, які можуть постачатися як окремими вузлами, так і у вигляді інтегрованого модуля. Існують також пневматичні прилади, що поєднують у своїй конструкції всі необхідні елементи для формування повної схеми системи активного контролю.

Застосування пневматичних приладів дає змогу створювати просту та компактну вимірювальну оснастку, що є особливо важливим під час контролю у важкодоступних зонах. Це зумовлено тим, що з вимірювальною оснасткою взаємодіє лише вихідне сопло приладу. Крім того, такі прилади малочутливі до вібрацій і не потребують спеціальної герметизації.

Водночас до їхніх недоліків належить необхідність підвищеного контролю під час експлуатації за станом пристроїв підготовки стисненого

повітря.

Вимірювальний засіб з індуктивним перетворювачем (рис. 2.3) характеризується високою точністю та низькою чутливістю до вібрацій; при цьому габаритні розміри вимірювальної оснастки є істотно меншими порівняно з оснасткою на основі електроконтактного перетворювача.

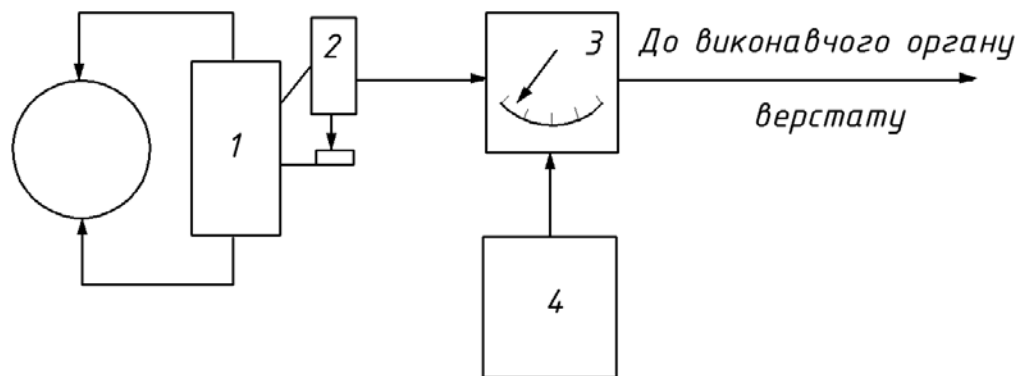


Рисунок 2.3 – Структурна схема вимірювальної системи

з індуктивним перетворювачем: 1 – вимірювальна оснастка;

2 – індуктивний перетворювач; 3 – командно-показуючий прилад;

4 – блок живлення [20]

Індуктивні прилади зазвичай виготовляють у вигляді інтегрованого модуля, що об'єднує всі необхідні функціональні блоки. Разом із тим експлуатація такої системи потребує висококваліфікованого технічного обслуговування.

2.2 Принцип роботи системи активного контролю, призначення окремих елементів та їх взаємодія

Автоматичний цикл роботи верстата ініціюється натисканням кнопки «Пуск», розташованої на пульті керування. Після завантаження кілець здійснюється поворот підвідного пристрою, внаслідок чого наконечники вимірювальної скоби вводяться в контрольовану деталь. Фіксація скоби у

вимірювальному положенні забезпечується путовим вимикачем ВП-1 електричної схеми верстата. Після його спрацювання піноль шліфувальної бабки переміщується з вихідного у робоче положення. Досягнувши робочої позиції, механізм подачі здійснює швидке переміщення шліфувальної бабки в напрямку деталі [16, 22].

У режимі форсованої подачі шліфувальний круг врізається в заготовку; за досягнення відповідного значення потужності шліфування спрацьовує реле максимального струму, після чого обробка продовжується в режимі чорнової подачі. Коли шліфувальна бабка досягає заданого положення, активується путовий вимикач ВП-8, у результаті чого подається напруга на електропневматичний клапан. Клапан спрацьовує та припиняє подачу повітря до механізму аретування, вимірювальні наконечники розаретовуються і вступають у контакт із поверхнею оброблюваної деталі (рис. 2.4).

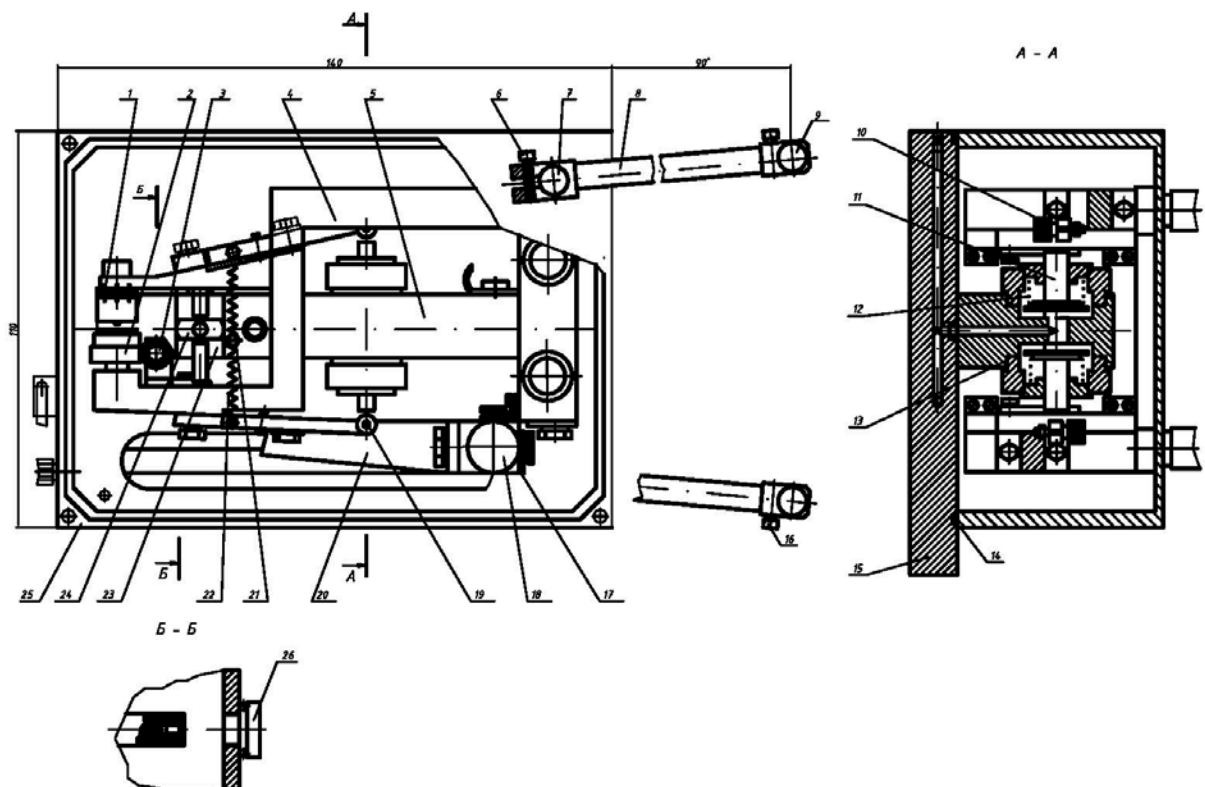


Рисунок 2.4 – Вимірювальний пристрій

Величина сигналу, що знімається з індуктивного перетворювача 1,

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

визначається величиною зазору між магнітопроводом і якорем 2, який, своєю чергою, залежить від розміру контрольованої деталі. У процесі обробки прилад формує керувальні сигнали, що забезпечують управління циклом шліфування.

Після подачі команди на завершення обробки механізм подачі верстата здійснює швидкий відвід шліфувального круга від деталі, а піноль повертається у вихідне положення. У момент відскоку спрацьовує відповідний путовий вимикач, за сигналом якого з електропневматичного клапана знімається напруга, і повітря подається до мембранного механізму аретування. Внаслідок цього відбувається аретування вимірювальних наконечників та вмикається сигнальна лампа на передній панелі пневматичного блока. Після досягнення заданого тиску в лінії між клапаном і механізмом аретування спрацьовує реле тиску, замикання контактів якого ініціює виведення вимірювального пристрою з отвору оброблюваної деталі. Підвідний пристрій повертається, звільняючи зону розвантаження та завантаження.

Вимірювальна система включає такі функціональні елементи: вимірювальний пристрій, пневматичний блок і електронний відліково-командний пристрій.

Вимірювальний пристрій призначений для визначення розміру деталі в процесі обробки. В його конструкції застосовано індуктивний перетворювач із феритовою пластиною-якорем, який перетворює переміщення вимірювальних наконечників в електричні сигнали, що надходять до відліково-командного пристрою. У вимірювальному пристрої передбачено аретування вимірювальних наконечників, яке виконується механізмом пневматичного мембранного аретиру. Керування його роботою здійснюється електропневматичним клапаном, розміщеним у пневматичному блоці. За відсутності напруги на обмотці клапана стиснене повітря надходить до аретира, який зводить вимірювальні наконечники. Живлення на клапан подається від електросхеми верстата.

Електронний відліково-командний пристрій забезпечує вторинне

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

перетворення сигналів індуктивного перетворювача та формування керувальних команд для верстата. Вимірювальна система реалізує як візуальний, так і автоматичний контроль розміру деталі безпосередньо під час обробки. Візуальний контроль здійснюється за шкалою приладу, автоматичний – шляхом подачі електричних команд для зміни режимів роботи. Контроль спрацювання команд виконується за допомогою світлового табло на передній панелі пристрою.

Блок пневматики БВ-4222.01.000 призначений для підготовки та регулювання потоку стисненого повітря, що подається до аретира вимірювального пристрою. До його складу входять регулятор тиску, два реле тиску, електропневматичний клапан, манометр і тумблерний кран, розміщений на лицьовій панелі. Усі елементи блоку пневматики змонтовано в корпусі, який за допомогою спеціальних петель кріпиться до пульта керування верстатом. Реле тиску контролює значення тиску в мембранній коробці аретира. Після перекриття клапана повітря з мембранної коробки через випускний отвір виходить в атмосферу, що спричиняє спрацювання контактів реле тиску та формування відповідного сигналу в електросхемі верстата.

Після завершення циклу шліфування скоба залишається у вимірювальному положенні до моменту подачі тиску в лінію аретування та спрацювання реле тиску, яке ініціює виведення скоби з деталі. Реле спрацьовує у разі зниження тиску на виході нижче 3,2 кгс/см².

Електронний відліково-командний пристрій БВ-6119.01.00.000 призначений для вторинного перетворення вимірювального сигналу та формування коду керування поперечною подачею верстата. На його лицьовій панелі розміщено показувальний прилад, сигнальні лампи, рукоятки та тумблери. Показувальний прилад має дві шкали з ціною поділки 1 і 5 мкм та діапазонами вимірювання відповідно 80 мкм (від +20 до –60 мкм) і 400 мкм (від +100 до –300 мкм).

Усі механізми вимірювального пристрою змонтовані на плиті 15 із трьох

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

різьбовими отворами М6 для кріплення до привідного механізму. На плиті закріплено основу 5, до якої за допомогою шарніра на плоских пружинах 17 підвішені важелі 4 і 20. Через цапфи 7 і 18 вони з'єднані із зовнішніми важелями 8, у яких встановлено вимірювальні наконечники 9 з алмазними вставками. У важелі 20 розміщено якор 2 індуктивного перетворювача, а у важелі 4 – магнітопровід і котушки 1. Регулювання положення якоря здійснюється черв'яком 3.

Вимірювальне зусилля на кожному наконечнику становить 400 ± 50 Н і створюється пружинами 21 і 22. Аретування наконечників виконується штовхачами 11 через опорний ролик 10 при подачі повітря до мембранних коробок; у вихідне положення штовхачі повертаються під дією пружини 12. Подача повітря здійснюється через штуцер 26. Внутрішня порожнина вимірювального пристрою та електричні виводи перетворювача виконані герметичними.

2.3 Кінематична схема вимірювальної системи

Вимірювальна система включає три основні функціональні складові: вимірювальний пристрій, пневматичний блок та електронний відліково-командний пристрій. Її кінематичну схему наведено на рисунку 2.5.

Вимірювальний пристрій призначений для визначення розміру деталі в процесі обробки. У його складі використовується індуктивний перетворювач (датчик) з феритовою пластиною-якорем, який забезпечує перетворення переміщень вимірювальних наконечників на електричні сигнали, що надходять до відліково-командного пристрою. Конструкцією передбачено механізм аретування вимірювальних наконечників, реалізований на базі пневматичного мембранного аретира. Керування роботою аретира здійснюється електропневматичним клапаном, розташованим у пневматичному блоці [22].

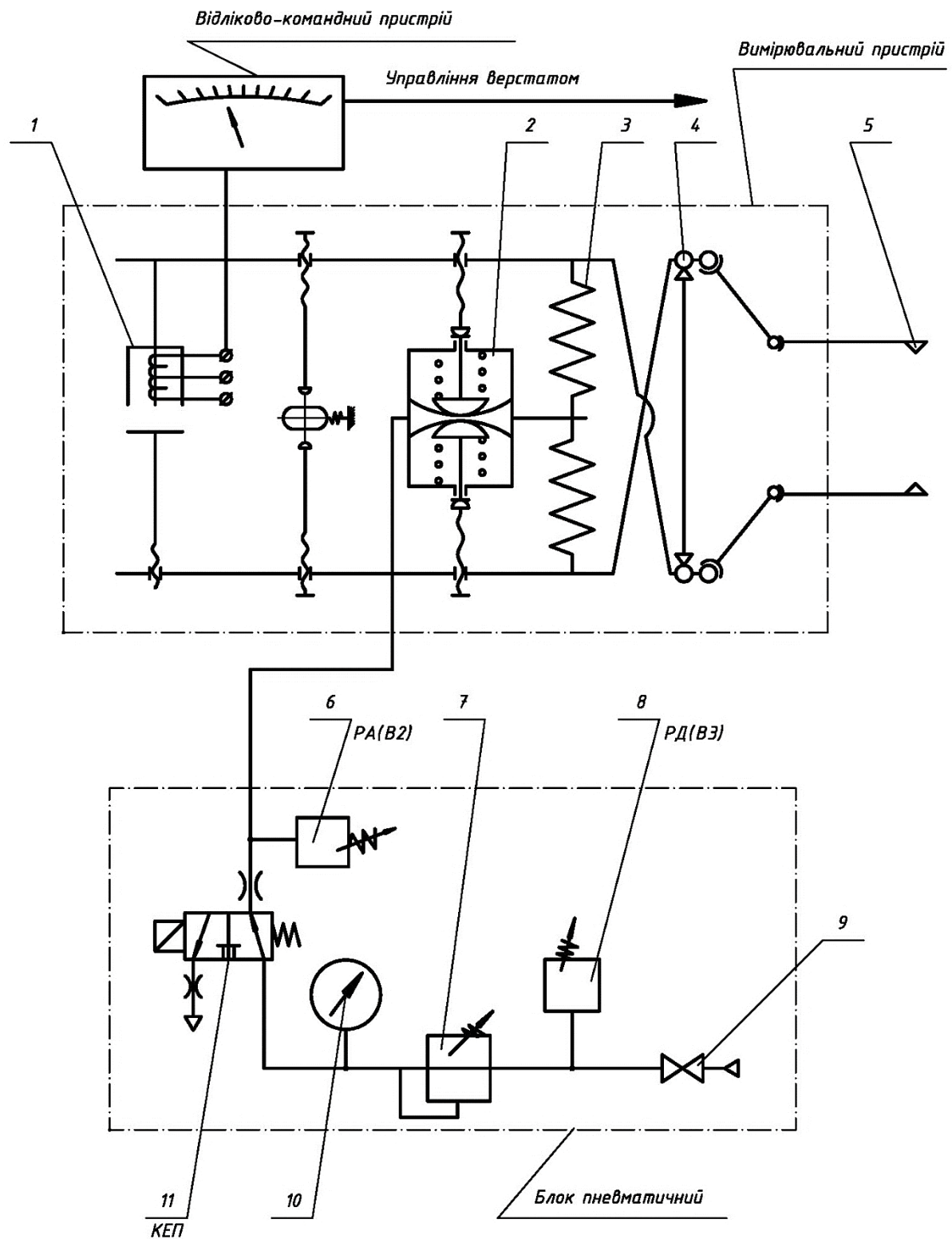


Рисунок 2.5 – Кінематична схема вимірювальної системи

За відсутності напруги на котушці клапана стиснене повітря подається до аретира, що забезпечує зведення вимірювальних наконечників 5. Живлення на клапан подається від електросхеми верстата. Електронний відліково-

Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

ВР 507.00.00.000 ПЗ

Лист

командний пристрій призначений для оброблення сигналів індуктивного перетворювача 1 та формування керувальних команд для верстата.

Вимірювальна система забезпечує як візуальний, так і автоматичний контроль розміру деталі безпосередньо під час обробки. Візуальний контроль здійснюється за показами шкали відліково-командного пристрою, а автоматичний – шляхом подачі електричних сигналів для коригування режимів обробки. Контроль спрацювання команд виконується за допомогою світлового табло, розміщеного на передній панелі пристрою.

Пневматичний блок БВ-4222.01.000 призначений для підготовки та регулювання потоку повітря, що подається до аретира 2 вимірювального пристрою. До його складу входять регулятор тиску 7, два реле тиску 6 і 8, електропневматичний клапан (КЕП) 11, манометр 10 та тумблерний кран 9, розташований на лицьовій панелі. Усі елементи змонтовано в корпусі, який за допомогою спеціальних петель кріпиться до пульта керування верстатом. Під час налаштування пневмосистеми регулятор тиску 7 встановлюють на рівні $1,7 \pm 0,2$ кгс/см².

Реле тиску 6 контролює тиск повітря в мембранній коробці аретира 2 та блокує механізм повороту скоби, запобігаючи її введенню або виведенню з контрольованого отвору до досягнення необхідного тиску та зведення наконечників. Схема підключення клапана 11 передбачає, що при знеструмленій котушці повітря подається в механізм аретування і наконечники зведені. Після перекриття клапана 11 повітря з мембранної коробки через випускний отвір виходить в атмосферу, що спричиняє спрацювання контактів реле тиску 6 і формування відповідної команди для електросхеми верстата. Після завершення циклу шліфування скоба залишається у вимірювальному положенні до моменту подачі тиску в систему аретування та спрацювання реле тиску 6, яке подає команду на виведення скоби з деталі. Реле тиску 8 спрацьовує при зниженні вихідного тиску повітря нижче 3,2 кгс/см².

Електронний відліково-командний пристрій БВ-6119.01.00.000

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

забезпечує вторинне перетворення вимірювального сигналу та формування коду керування поперечною подачею верстата. На його лицьовій панелі розміщено показувальний прилад, сигнальні лампи, рукоятки та тумблери.

Показувальний прилад має дві шкали з ціною поділки 1 і 5 мкм та діапазонами вимірювання відповідно 80 мкм (від +20 до –60) і 400 мкм (від +100 до –300).

2.4 Розрахунок точності приладу активного контролю

Під час шліфування кілець підшипників із подовжньою подачею керувальні сигнали, сформовані вимірювальною системою, обробляються схемою автоматики верстата наприкінці кожного подовжного переміщення стола. Робота двоконтактних засобів контролю кілець підшипників базується на прямому методі вимірювання. Вимірювальні наконечники приладу 6 і 9 безпосередньо визначають діаметр D деталі 7 (рис. 2.6). Плаваюча скоба 5 шарнірно закріплена на плоскій пружині 3, яка встановлена на стійці 2 пристрою, змонтованого на станині 1 верстата [23].

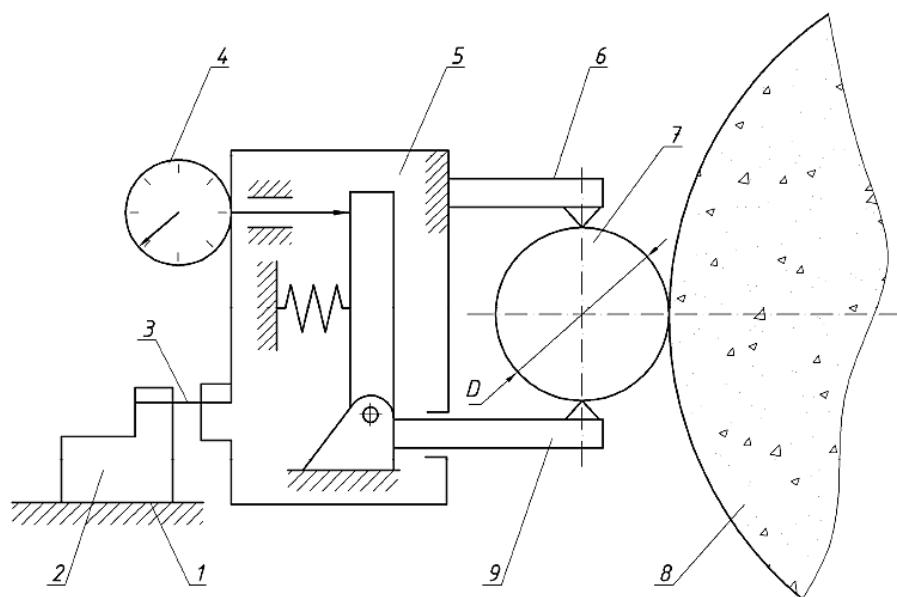


Рисунок 2.6 – Схема системи активного контролю кілець підшипників [23]

Базовою поверхнею під час вимірювання є поверхня оброблюваної деталі, встановленої в центрах верстата. Застосування засобів контролю, побудованих за такою схемою, забезпечує практично повну компенсацію систематичних і випадкових похибок, зумовлених тепловими та силовими деформаціями верстата, зношуванням шліфувального круга, а також пружними деформаціями деталі [24].

Під час розрахунку точності засобів автоматизованого контролю необхідно виконання умови (2.1):

$$\Delta_{\Sigma i} \leq 0,2T_p, \quad (2.1)$$

де $\Delta_{\Sigma i}$ – сумарна похибка вимірювання;

T_p – допуск на розмір.

Сумарна похибка вимірювання $\Delta_{\Sigma i}$ визначається за виразом (2.2):

$$\Delta_{\Sigma i} = E_y + \Delta_p + \Delta_E + \Delta_n, \quad (2.2)$$

де E_y – похибка установаження контрольованого об'єкта під час використання вимірювального пристрою;

Δ_p – похибка, зумовлена неточністю виготовлення передавальних механізмів вимірювального пристрою (для обраної схеми вона приймається незначною $\Delta_p \approx 0$);

Δ_E – похибка налаштування контрольно-вимірювального пристрою за еталонним зразком ($\Delta_E = 0,5$ мкм);

Δ_n – похибка, обумовлена точністю відлікового пристрою ($\Delta_n = 1$ мкм).

Похибку установаження E_y визначають за залежністю, аналогічною до формули розрахунку похибки встановлення заготовки у верстатному

пристосуванні (2.3):

$$E_y = E_{\delta} + E_z + E_n, \quad (2.3)$$

де $E_{\delta} = e(\Delta_{p\delta})$ – похибка базування заготовки. Припускається, що вона зумовлена радіальним биттям $D_{p\delta} = 0,5$ мкм, тому $E_{\delta} = 0,5$ мкм;

$E_z = 0$ – похибка закріплення заготовки;

$E_n = 0,5$ – похибка вимірювального пристосування.

$$E_y = 0,5 + 0 + 0,5 = 1 \text{ мкм.}$$

$$[D_{\Sigma i}] = 0,2 \cdot 13 = 2,6 \text{ мкм.}$$

$$D_{\Sigma i} = 1 + 0 + 0,5 + 1 = 2,5 \text{ мкм} < [D_{\Sigma i}].$$

З урахуванням прийнятих значень складових сумарна похибка не перевищує встановленого допуску, отже застосування даної схеми автоматизованого контролю (вимірювання) є допустимим і доцільним з точки зору забезпечення необхідної точності.

2.5 Розрахунок на точність відліково-командного пристрою з адаптивною системою видачі команд

Підвищення вимог до розмірної точності та якості поверхні на завершальному етапі шліфування може бути забезпечене застосуванням адаптивних систем формування керувальних команд (рис. 2.7).

У таких системах завершення оброблення із заданою кінцевою швидкістю знімання припуску досягається незалежно від змінних чинників, зокрема початкової величини припуску, значення подачі та ріжучих властивостей шліфувального круга [25].

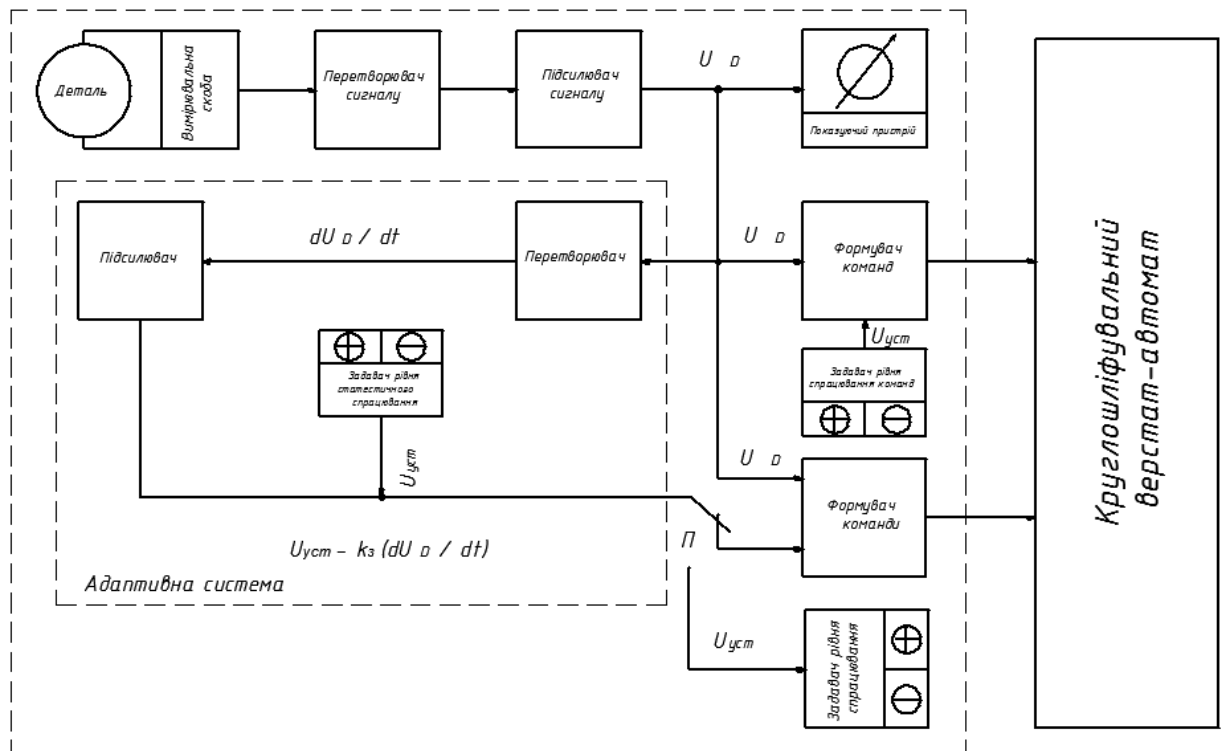


Рисунок 2.7 – Схема пристрою з адаптивною системою видачі команд

У схемах з адаптивними пристроями момент подачі команди на перехід до заключного етапу – режиму виходжування, визначається поточним значенням швидкості знімання припуску. Між швидкістю знімання припуску v_n та припуском на виходжування ΔD_θ існує лінійна залежність (2.4):

$$\Delta D_\theta = T_p (v_\theta - v_k), \quad (2.4)$$

де v_θ – швидкість знімання припуску в момент увімкнення виходжування;

v_k – швидкість знімання припуску наприкінці оброблення;

$T_p = tg\alpha$ – стала різання для даного верстата.

Для забезпечення сталої кінцевої швидкості знімання припуску v_k кожному початковому значенню швидкості v_θ повинна відповідати певна величина припуску на виходжування ΔD_θ .

Отже, команда на перехід до виходжування має подаватися за умови (2.5):

$$\Delta D_{\epsilon} + \Delta D_{уст0} - T_p v_{\epsilon} = 0, \quad (2.5)$$

де $\Delta D_{уст0}$ – встановлене під час налагодження значення припуску, при якому $v_n=0$.

Переходячи до поточних значень припуску ΔD та швидкості знімання v_n , можна виділити два стани системи:

– режим шліфування з подачею (2.6)

$$\Delta D + \Delta D_{уст0} - T_p v_n > 0; \quad (2.6)$$

– режим виходжування (2.7), при якому подача вимкнена

$$\Delta D + \Delta D_{уст0} - T_p v_n \leq 0. \quad (2.7)$$

У наведеній схемі (рис. 2.7) контроль оброблюваної деталі здійснюється вимірювальною скобою з індуктивним перетворювачем як чутливим елементом. Сигнал із датчика обробляється вимірювальною схемою та підсилюється. Напруга, пропорційна поточному припуску $U_{\Delta D}$, надходить на відліковий пристрій і на вхід формувача команди.

Формувач порівнює сигнал $U_{\Delta D}$ із опорним сигналом $U_{уст}$, що задається регулятором рівня спрацювання. Якщо $U_{\Delta D} \leq U_{уст}$, формувач перебуває у неактивному стані; при $U_{\Delta D} > U_{уст}$ спрацьовує командне реле і сигнал керування передається в електросхему верстата.

До виходу підсилювача підключено перетворювач, який виконує диференціювання сигналу $U_{\Delta D}$, і сигнал $\frac{dU_{\Delta D}}{dt}$, який передається на підсилювач, буде пропорційний поточній швидкості зняття припуску.

На виході підсилювача, з коефіцієнтом підсилення k_3 , змінюється

полярність сигналу і дорівнює $-k_3 \frac{dU_{\Delta D}}{dt}$. Цей сигнал поступає на формувач команди. На цей же вхід подається напруга $U_{уст0}$ з задавача статичного рівня спрацювання. На інший вхід формувача подається сигнал з виходу підсилювача $U_{\Delta D}$. Сигнали, які поступають на вхід формувача, відповідають лінійним величинам, що входять в (2.6) і (2.7). Якщо умова виконується, формувач видає команду на припинення подачі. Таким чином, формування команди на перехід до режиму виходжування здійснюється не лише за поточним значенням розміру, а й з урахуванням швидкості знімання припуску.

Описана схема реалізує замкнений контур зворотного зв'язку за швидкістю знімання припуску на завершальному етапі шліфування, що відповідає режиму «відслідковуючої» подачі та забезпечує підвищену точність оброблення.

2.6 Розрахунок індуктивного вимірювального перетворювача мікропереміщень

2.6.1 Вихідні дані для розрахунку

Діапазон вимірювання: ± 500 мкм.

Необхідна роздільна здатність: 0,1 мкм.

Частота живлення: 5 кГц.

Напруга живлення: 6 В.

Діаметр осердя: 6 мм.

Початковий повітряний зазор: 0,5 мм.

Відносна магнітна проникність осердя: 2000.

Проведемо розрахунок індуктивного диференціального вимірювального перетворювача, що застосовується у складі системи активного контролю круглошліфувального верстата. Перетворювач призначений для вимірювання мікропереміщень у діапазоні ± 500 мкм з роздільною здатністю 0,1 мкм [19].

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

2.6.2 Визначення індуктивності котушки

Індуктивність соленоїда визначається за формулою (2.8):

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l}, \quad (2.8)$$

де: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – фізична константа, яка характеризує здатність вакууму проводити магнітне поле;

N – кількість витків;

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{– площа поперечного перерізу;}$$

l – довжина магнітного кола.

Площа поперечного перерізу осердя:

$$S = \frac{3,14 \cdot (0,006)^2}{4} = 2,83 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Приймаємо кількість витків $N = 1500$, довжину магнітного кола $l = 0,04$ м.

Тоді, розрахункове значення індуктивності становить:

$$L = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 2000 \cdot 1500^2 \cdot 2,83 \cdot 10^{-5}}{0,04} \approx 0,20 \text{ Гн.}$$

2.6.3 Визначення реактивного опору

Реактивний опір котушки визначається за формулою (2.9):

$$x_L = \omega L = 2\pi f L. \quad (2.9)$$

При частоті $f = 5$ кГц та індуктивності $L = 0,20$ Гн отримуємо:

$$x_L = 2\pi \cdot 5000 \cdot 0,2 \approx 6283 \text{ Ом.}$$

2.6.4 Оцінка чутливості перетворювача

Для малих переміщень зміна індуктивності пропорційна зміні повітряного зазору і описується залежністю (2.10):

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

$$\frac{\Delta L}{L} \approx -\frac{\Delta \delta}{\delta_0}. \quad (2.10)$$

При переміщенні 1 мкм зміна індуктивності становить:

$$\Delta L = -\frac{L \cdot \Delta \delta}{\delta_0} = -\frac{0,20 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-4}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Зміна реактивного опору визначається за формулою (2.11):

$$\Delta x_L = 2\pi f \Delta L. \quad (2.11)$$

$$\Delta x_L = 2\pi \cdot 5000 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 12,6 \text{ Ом/мкм.}$$

Таким чином, чутливість перетворювача становить приблизно 12 Ом/мкм.

2.6.5 Оцінка вихідного сигналу мостової схеми

Для неврівноваженого моста вихідна напруга за формулою (2.12):

$$U_{\text{вих}} = U \cdot \frac{\Delta Z}{4Z}. \quad (2.12)$$

При $Z \approx 6000 \text{ Ом}$ та $\Delta Z = 12,6 \text{ Ом}$, отримаємо:

$$U_{\text{вих}} = 6 \cdot \frac{12,4}{4 \cdot 6000} = 3,15 \text{ мВ/мкм.}$$

Для переміщення 0,1 мкм вихідна напруга становить приблизно 0,315 мВ, що є достатнім для подальшого підсилення та аналого-цифрового перетворення.

Розрахований індуктивний вимірювальний перетворювач забезпечує необхідний діапазон вимірювання $\pm 500 \text{ мкм}$ та роздільну здатність 0,1 мкм. Отримані параметри підтверджують можливість його застосування у складі системи активного контролю.

РОЗДІЛ 3

СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Методика повірки приладів активного контролю

Згідно з ГОСТ 16504-81, випробуваннями вважається експериментальне визначення параметрів і показників якості приладів у процесі їх функціонування, за умов імітації експлуатації або при відтворенні на них впливів за встановленою програмою [26].

Існує значна кількість видів випробувань. Частина з них має нормативний характер і проводиться з метою внесення приладу до Державного реєстру або його постановки на серійне виробництво. Інші випробування призначені для визначення основних характеристик приладів, зокрема точності, функціональних можливостей і надійності [27].

Під час проведення випробувань і калібрування допускається застосування не лише засобів контролю, передбачених нормативною документацією, а й інших засобів, що мають рівноцінні метрологічні характеристики [28].

Для приладів активного контролю (ПАК), що використовуються на центрових круглошліфувальних і плоскошліфувальних верстатах, діє ГОСТ 8517-90, відповідно до якого процедури калібрування та повірки регламентуються методикою контролю за ГОСТ Р 8.671-2009.

Відповідність вимогам щодо надійності встановлюється шляхом проведення контрольних випробувань згідно з ГОСТ 27.410-87, а також на підставі аналізу результатів підконтрольної експлуатації.

На етапі підготовки та безпосередньо під час калібрування повинні забезпечуватися нормальні умови застосування, зокрема:

- температура навколишнього повітря – у межах, установлених нормативною документацією (20^{+5}_{-2}) °C;
- відносна вологість повітря – (60 ± 20) %;

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- допустима зміна температури протягом 4 год – не більше 1,0 °С;
- швидкість зміни температури – не більше 0,6 °С/год.

Якщо в технічній документації відсутні спеціальні вимоги щодо контролю окремих параметрів, температурно-вологісний режим встановлюють відповідно до умов експлуатації УХЛ 4.2 за ГОСТ 15150-69.

Ступінь захисту приладів від зовнішніх впливів визначається згідно з ДСТУ 14254-96 та міжнародним стандартом DIN EN 60529 і може відповідати класам від IP43 до IP68.

У разі якщо перед визначенням характеристик точності прилад перебував в інших кліматичних умовах, його необхідно витримати до досягнення температури нормальних умов застосування, але не менше 2 годин.

Перед визначенням метрологічних характеристик повірочні засоби вимірювальної техніки та випробовувані пристрої, закріплені у відповідних затискних пристроях, витримують до 1 години для стабілізації механічних напружень у вимірювальному ланцюзі. Робочі поверхні контактних наконечників очищують від забруднень бензином або нафтовим розчинником. Додатково передбачено проведення попередньої обкатки приладу (імітації багаторазових вимірювань) [28].

Після підключення приладу до електричної мережі випробування дозволяється розпочинати лише після завершення періоду встановлення робочого режиму, який, як правило, становить від 5 до 15 хвилин.

3.2 Випробування і калібрування приладів

Під час введення в експлуатацію приладів для шліфувальних верстатів, після їх тривалого зберігання або проведення ремонту, виконують комплекс основних калібрувальних операцій відповідно до ДСТУ 671-2009. До них належать [29].

1. Контроль зовнішнього стану, перевірка комплектності та правильності

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

маркування.

2. Перевірка діапазону налаштування вимірювальної оснастки.
3. Оцінка вібростійкості та якості монтажу електрообладнання.
4. Контроль герметичності.
5. Перевірка електричної міцності ізоляції.
6. Вимірювання опору ізоляції.
7. Оцінка шорсткості робочих поверхонь алмазних або твердосплавних вимірювальних наконечників.
8. Перевірка коректності функціонування приладу та його окремих вузлів.
9. Контроль величини вільного ходу і параметрів аретування контактних наконечників.
10. Визначення контактного зусилля.
11. Вимірювання параметрів вихідного аналогового сигналу постійного струму та оцінка його похибки.
12. Визначення показників точності, зокрема:
 - похибки показів приладу;
 - похибки (розмаху) спрацьовування команд;
 - похибки налаштування остаточної команди;
 - похибки, спричиненої зсувом налаштування;
 - похибки алгебраїчного підсумовування сигналів двох індуктивних перетворювачів (для одноконтактних головок);
 - температурної похибки.
13. Перевірка тривалості безперервної роботи приладу.
14. Оцінка точності оброблення, що забезпечується системою «верстат-прилад».
15. Контроль стійкості приладу до впливів умов транспортування, а саме:
 - транспортної тряски;
 - зниженої або підвищеної температури;
 - підвищеної вологості.

Програма випробувань передбачає виконання значної кількості окремих процедур. Конкретний обсяг випробувань, перелік засобів вимірювальної техніки та інші вимоги для кожного типу приладу визначаються відповідними технічними умовами (ТУ).

3.2.1 Перевірка зовнішнього стану та комплектності

Під час зовнішнього огляду контролюють:

- якість механічної обробки поверхонь, захисних покриттів і фарбування;
- плавність переміщення регулювальних елементів;
- надійність затягування кріпильних з'єднань;
- правильність маркування кабелів і роз'ємів;
- наявність клеми захисного заземлення (для приладів з електронним блоком).

Комплектність перевіряють відповідно до відомості комплектації та експлуатаційної документації. Маркування повинно відповідати вимогам креслень і ГОСТ 13762-86.

3.2.2 Механічні випробування

Механічні випробування призначені для моделювання експлуатаційних навантажень механічного характеру. До них належать:

- вібраційні впливи;
- дорожня тряска (імітація транспортування);
- ударні навантаження;
- постійні прискорення;
- випробування на зносостійкість.

Випробування виконують на спеціалізованих стендах.

3.2.3 Вібраційні випробування

Метою є виявлення механічних дефектів і перевірка стабільності метрологічних характеристик під дією вібрацій. Вібрація характеризується амплітудою A , круговою частотою ω прискоренням. Випробування проводять при заданих частотах і амплітудах, яким відповідає визначене прискорення.

Розрізняють:

- перевірку на віброміцність – для виявлення дефектів складання, пайки та монтажу (обов’язкова для серійної продукції);
- перевірку на вібростійкість – для оцінки впливу вібрацій на точність вимірювання.

Зазвичай застосовують електродинамічні віброустановки з діапазоном частот 5-5000 Гц. Типовий режим перевірки: частота 50 Гц, амплітуда до 0,2 мм, тривалість 10 хв. Після випробувань не допускаються механічні пошкодження або відхилення нормованих характеристик.

3.2.4 Перевірка герметичності пневмосистеми та корпусу приладу

Герметичність пневмопроводів і їх з’єднань перевіряють при надлишковому тиску 0,6 МПа шляхом підключення манометра класу точності 2,5 на ділянці між входом у пневмосистему та стабілізатором тиску.

Після перекриття входу і виходу контрольованої ділянки стрілка манометра не повинна відхилятися від початкового положення протягом 1 хвилини, що свідчить про відсутність витоків.

Герметичність ділянки пневмосистеми від стабілізатора тиску до вимірювального оснащення перевіряють із застосуванням манометра класу точності 1,0. У цьому випадку в систему подають повітря під тиском 0,2 МПа. Після перекриття входу та виходу перевірюваної ділянки відхилення стрілки манометра від початкового положення не допускається протягом 3 хвилин.

Для приладів, механізми яких розміщені у герметичному корпусі зі ступенем захисту IP68, герметичність контролюють методом занурення у воду (рис. 3.1). У корпус подають повітря з надлишковим тиском у межах 0,01-0,015 МПа, після чого прилад занурюють у посудину з водою. Протягом 5 хвилин з моменту занурення не повинні з’являтися ознаки витoku повітря (бульбашки) [27].

Більш технологічним є метод контролю без занурення у воду. Випробування виконують за допомогою спеціального малопотужного

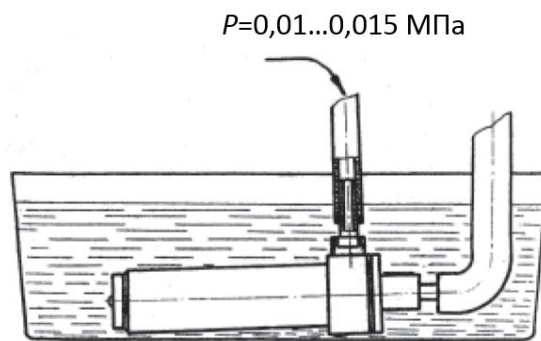


Рисунок 3.1 – Перевірка герметичності індуктивного перетворювача [27]

компресора, який створює в приладі надлишковий тиск, встановлений технічними умовами (ТУ).

Після припинення нагнітання повітря за допомогою секундоміра вимірюють час зниження тиску від початкового значення до величини, що становить 50 % від створеного надлишкового тиску. Отримане значення порівнюють із нормативом, установленим у ТУ.

3.2.5 Перевірка електричної міцності ізоляції

Електричну міцність ізоляції перевіряють між клемою «Земля», з'єднаною з корпусом електронного блоку (за наявності такого), та всіма вхідними і вихідними електричними колами, ізольованими від корпусу. На перевірювані кола подають випробувальну напругу змінного струму, яку плавно підвищують від нуля до значення, встановленого технічними умовами (ТУ), наприклад до 1,5 кВ протягом 5-10 с. Після досягнення заданого рівня напругу витримують протягом 1 хвилини, після чого її плавно знижують до нуля.

Прилад вважається таким, що витримав випробування, якщо протягом усього часу перевірки не відбулося пробоя або поверхневого перекриття ізоляції. Конкретне значення випробувальної напруги встановлюється відповідно до вимог ТУ для конкретного типу виробу.

Опір ізоляції між корпусом блоку та електричними колами, що підлягають випробуванню на електричну міцність, визначають у нормальних

умовах застосування за допомогою мегаомметра. До випробуваних кіл прикладають напругу постійного струму, значення якої встановлено ТУ (наприклад, 500 В). Вимірювання виконують після витримки 1 хвилини з моменту прикладення напруги. Відлік здійснюють за показами мегаомметра або за струмом витоку (при використанні мікроамперметра з подальшим перерахунком опору).

Прилад вважається таким, що витримав випробування, якщо виміряне значення опору ізоляції дорівнює або перевищує нормоване у ТУ.

В індуктивних перетворювачах опір ізоляції перевіряють:

- між корпусом і жилами кабелю, розпаяними на кабельну вилку;
- між корпусом і екраном кабелю.

Отримані значення опору ізоляції повинні бути не меншими за встановлені нормативними документами або технічними умовами.

3.2.6 Перевірка шорсткості робочих поверхонь контактних наконечників

Шорсткість робочих поверхонь контактних наконечників визначають шляхом візуального порівняння з еталонними зразками шорсткості відповідно до чинних нормативних документів. Оцінювання здійснюють за параметрами, установленими в технічних умовах (ТУ).

Якість функціонування вузлів приладу визначають шляхом проведення функціональних випробувань. Під час перевірки встановлюють:

- відсутність заїдань і надмірних люфтів при налагоджувальних переміщеннях елементів регулювання;
- плавність ходу рухомих частин;
- надійність фіксації елементів при встановленні їх у задане робоче положення.

Правильність функціонування приладу оцінюють шляхом відтворення взаємодії його основних систем – механічної, електричної та пневмогідравлічної. При цьому контролюють узгодженість роботи всіх функціональних вузлів, своєчасність спрацьовування вимірювальних та

командних елементів, а також відповідність параметрів сигналів установленим вимогам.

3.2.7 Перевірка контактного (вимірювального) зусилля

Контактне (вимірювальне) зусилля перевіряють із використанням [27]:

- ваг для статичного зважування з набором гир;
- спеціального пружинного динамометра (рис. 3.2);
- динамометра зі шкалою та стрілочним відліковим пристроєм (рис. 3.3).

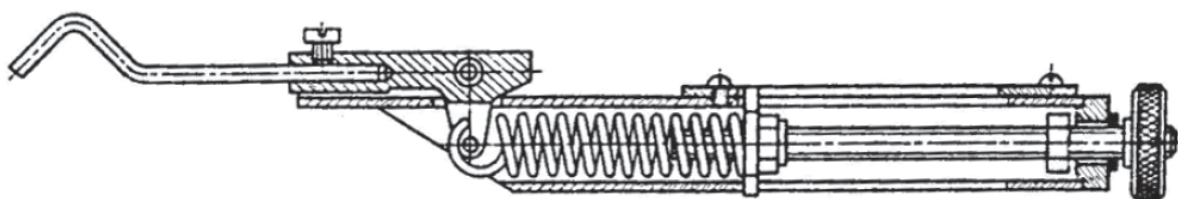


Рисунок 3.2 – Спеціальний пружинний динамометр для контролю малих контактних зусиль [27]



Рисунок 3.3 – Пружинний динамометр зі шкалою і стрілкою [27]

Пружинні динамометри зі шкалою та стрілочним відліковим пристроєм мають діапазон вимірювання від 5 до 50 сН при ціні поділки від 1,0 до 5,0 сН (рис. 3.3). Конкретні метрологічні характеристики приладу встановлюються відповідно до вимог технічних умов (ТУ).

3.2.8 Випробування на дорожню тряску

Прилад, що пройшов перевірку в нормальних умовах застосування та упакований у транспортну тару, піддають випробуванням на вплив дорожньої

тряски:

- або шляхом транспортування готових виробів у природних умовах на відстані, визначені ТУ, по дорогах із нерівним покриттям;
- або на спеціальному стенді, який імітує умови дорожньої тряски.

Режим руху транспортного засобу (швидкість, тип покриття, тривалість випробування) встановлюється ТУ.

Після завершення випробувань перевіряють:

- міцність і надійність кріплення нерухомих з'єднань;
- величину контактного зусилля;
- рівномірність ходу рухомих вузлів.

3.2.9 Випробування на удар

Випробування на удар проводять на спеціальних стендах, які забезпечують створення миттєвих прискорень відповідно до вимог ТУ.

Ударні навантаження характеризуються формою імпульсу, амплітудою, тривалістю та періодом коливань. Як правило, ударні впливи являють собою короткочасні імпульси з амплітудою до 10g (де g – прискорення вільного падіння) та відносно малим часом дії.

Прискорення створюється внаслідок удару вільно падаючого тіла об ковадло або об платформу, на якій закріплений прилад. Кінетична енергія падаючого тіла визначається його масою та висотою розташування центра тяжіння. Під час випробувань контролюють:

- міцність нерухомих з'єднань;
- рівномірність переміщення рухомих елементів;
- величину зусиль і моментів обертання;
- наявність залишкових змін параметрів та характеристик приладу.

Перелік контрольованих параметрів і допустимі відхилення встановлюються ТУ.

3.2.10 Випробування на прискорення

Випробування на вплив постійного прискорення виконують на стендах

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

типу центрифуг.

Центрифуги характеризуються:

- максимально допустимим перевантаженням;
- величиною створюваного прискорення;
- габаритними розмірами;
- конструктивним виконанням (дискові або консольні).

Дискова центрифуга являє собою круглу платформу, що обертається навколо осі та приводиться в рух електродвигуном. Прилад встановлюється на визначеній відстані від осі обертання. На такій самій відстані розміщують протизвагу, маса якої дорівнює масі приладу. Під час обертання платформи на прилад діє відцентрова сила, яка створює постійне прискорення.

Режим випробування на перевантаження встановлюють шляхом зміни частоти обертання n або зміни відстані приладу від центра обертання.

3.2.11 Кліматичні випробування

Відповідно до умов експлуатації та вимог ТУ прилади для шліфувальних верстатів призначені для роботи в закритих приміщеннях і повинні зберігати роботоздатність у діапазоні температур від +10 до +40 °С при відносній вологості повітря до 95 %.

Для проведення випробувань на нагрівання прилад розміщують у кліматичній камері, яка забезпечує заданий температурний режим відповідно до ТУ, зокрема:

- швидкість підвищення температури;
- температуру випробування;
- тривалість витримки приладу при заданій температурі;
- режим подальшого охолодження до температури нормальних умов.

Під час випробування контролюють:

- роботоздатність механізмів;
- відсутність витікання клею, мастила та ущільнювальних матеріалів;
- відсутність відшаровування лакофарбових покриттів;

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- відсутність запотівання внутрішніх елементів;
- зміни метрологічних характеристик, що перевищують установлені допуски.

Порушення плавності ходу, збільшення люфтів, зменшення крутних моментів на органах керування або зусиль переміщення кареток свідчать про недоліки складання рухомих з'єднань, неправильний вибір зазорів або конструктивні недосконалості.

Запотівання внутрішніх елементів може бути наслідком:

- недостатньої герметичності корпусу;
- перерозподілу вологи між матеріалами з різною теплопровідністю (металеві частини нагріваються швидше за неметалеві).

У разі виявлення запотівання прилад підлягає розбиранню, очищенню, сушінню, повторному складанню та герметизації.

Випробування на температурний перепад проводять у спеціальних кліматичних камерах, оснащених нагрівальними пристроями.

Температурний перепад є одним із найбільш несприятливих чинників впливу, оскільки спричиняє виникнення температурної похибки вимірювання через:

- різні коефіцієнти лінійного розширення матеріалів;
- зміну механічних зазорів;
- дрейф електричних параметрів.

Тому під час і після проведення випробувань обов'язково перевіряють метрологічні характеристики приладу та визначають величину температурної похибки.

3.2.12 Визначення метрологічних характеристик приладу

Визначення метрологічних характеристик (похибок) є найбільш відповідальною частиною випробувань і включає перевірку та калібрування приладу. Для кожного типу приладу порядок визначення похибок установлюється технічними умовами (ТУ). Для приладів масового виробництва

розробляються відповідні методики повірки та стандарти (ГОСТ, ДСТУ), що регламентують процедуру контролю.

Залежно від конструкції та призначення приладу застосовують:

- універсальні засоби вимірювань (зокрема, кінцеві міри довжини – КМД);
- спеціальні стенди та установки, розроблені для конкретного типу приладу.

Повірку і калібрування виконують методом порівняння з КМД або зразковими атестованими засобами вимірювальної техніки.

Калібрування за допомогою КМД потребує високої кваліфікації персоналу та є досить трудомістким процесом.

У сучасній практиці широко застосовують оптоелектронні вимірювальні прилади з дискретністю цифрового відліку 0,1 або 0,01 мкм і діапазоном вимірювання до 100 мм (наприклад, прилади типу METRO фірми Heidenhain).

Такі прилади зручно використовувати для калібрування:

- індуктивних приладів активного контролю;
- вимірювальних скоб;
- вимірювальних головок;
- індуктивних перетворювачів.

Перевагами оптоелектронних приладів і цифрових індикаторів є:

- широкий діапазон вимірювання;
- висока точність (похибка 0,2-0,3 мкм);
- можливість встановлення нуля в будь-якій точці діапазону;
- зручний цифровий відлік.

Цифрова індикація усуває суб'єктивну похибку відліку, що підвищує достовірність результатів повірки. Обов'язковою умовою калібрування із застосуванням зразкового оптоелектронного приладу є забезпечення плавних, однакових, долемікронних одночасних переміщень вимірювальних наконечників зразкового приладу та приладу, що калібрується. Це дає змогу

порівнювати їх покази та визначати похибку в будь-якій точці діапазону вимірювань [29].

Визначення похибки показів та інших характеристик точності приладів для шліфувальних верстатів (зокрема відповідно до ДСТУ 671-2009) виконують із застосуванням жорсткої стійки або спеціального пристосування (рис. 3.4).

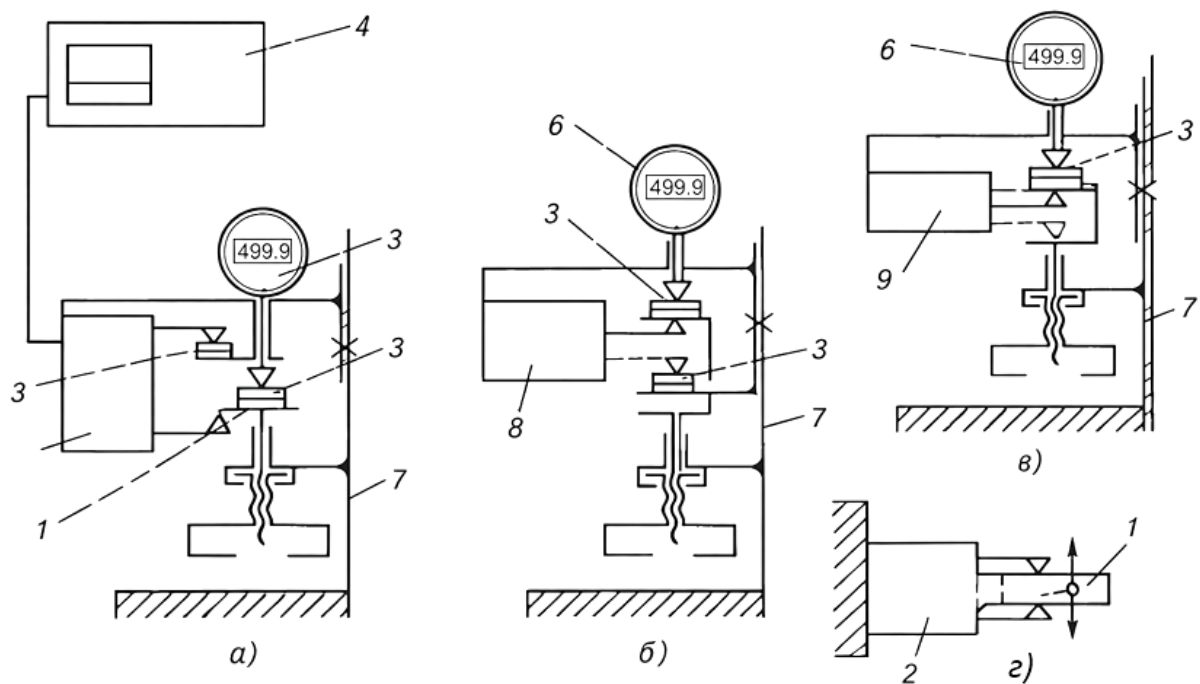


Рисунок 3.4 – Схема перевірки приладу: а, г – з двоконтактною скобою для валів; б – з двоконтактною скобою для отворів; в – з одноконтактною головкою [29]

Пристосування повинно бути оснащено:

- опорним столиком із можливістю точного переміщення;
- кронштейном для закріплення приладу, що перевіряється;
- кронштейном для встановлення зразкового цифрового індикатора (ємнісного, індуктивного або оптоелектронного).

Переміщення столика контролюють за показами зразкового індикатора, а різницю між його показами та показами приладу, що перевіряється, приймають за величину похибки в відповідній точці діапазону.

Стійка для повірки (рис. 3.4) оснащена столиком 1 з вузлом мікрометричної подачі, який забезпечує плавні долемікронні зворотно-поступальні безлюфтові переміщення. Двоконтактні скоби 2 і 8 або одноконтактну вимірювальну головку 9 закріплюють у робочому положенні на стійці 7 за допомогою кронштейнів. У стійці встановлюють зразковий цифровий індикатор або оптоелектронну головку 6. Під контактні наконечники розміщують блоки кінцевих мір довжини 3.

Прилад 4, що перевіряється, та зразковий індикатор 6 встановлюють у нульове положення. Плавним переміщенням столика 1 послідовно встановлюють покази приладу 4, що відповідають заданим контрольним точкам, і порівнюють їх із показами зразкового індикатора 6.

Як видно зі схеми (рис. 3.4), при переміщенні столика одна губка скоби переміщується разом зі столиком і наконечником індикатора 6, а інша губка залишається нерухомою. Для усунення впливу зазорів у кінематичному механізмі столика підведення до кожної контрольної точки здійснюють в одному напрямку.

У кожній контрольній точці відлік виконують тричі. Похибку показів визначають відносно нульового значення як найбільшу за абсолютним значенням різницю між показами приладу 4 та зразкового індикатора 6 серед трьох вимірювань. Отримані значення порівнюють з нормованими межами, установленними ТУ або стандартом.

Параметри вихідного аналогового сигналу постійного струму та його похибку визначають за схемою, наведеною на рисунку 3.4, (а).

До аналогового виходу блоку управління 4 підключають цифровий вольтметр 5. Відповідно до номінальної чутливості вихідного сигналу, вираженої у В/мм або мВ/мкм, покази вольтметра перераховують у лінійні переміщення (мкм).

Похибку аналогового виходу в контрольній точці визначають як різницю між переміщенням, виміряним зразковим індикатором 6, і еквівалентним

значенням, отриманим за напругою. Похибку відраховують від нульового рівня.

Сучасні блоки управління оснащені цифровим інтерфейсом (як правило, RS-232). Для перевірки працездатності цифрового каналу необхідні персональний комп'ютер, спеціалізоване програмне забезпечення та протокол обміну даними. За допомогою програми до блока надсилають команди з переліку дозволених і аналізують отриману відповідь. Програмне забезпечення та опис протоколу обміну зазвичай надаються виробником.

Живлення блока управління підводять через регулятор напруги для перевірки роботи при коливаннях напруги в межах, установлених ТУ. Кінцеву команду налаштовують поблизу нульового показу, попередні – у точках, визначених ТУ.

Контактні наконечники скоби або головки приводять у зіткнення:

- один – зі столиком стійки;
- другий (для двоконтактної скоби) – з нерухомою опорою.

Плавним переміщенням столика в одному напрямку забезпечують послідовне спрацювання попередніх і кінцевої команд. За показами зразкового індикатора 6 фіксують значення переміщення в момент спрацювання.

Для кожної команди виконують три серії по 10 спрацювань при номінальній напрузі, максимальній граничній, мінімальній граничній. Наприклад: 110; 121; 99 В або 220; 242; 198 В.

Розмах спрацювання визначають як найбільшу різницю з 30 отриманих відліків за зразковим індикатором.

3.2.13 Визначення похибки налаштування

Похибку налаштування визначають із використанням тієї ж вимірювальної схеми (рис. 3.4, а, б, в). Контактний наконечник підводять до столика так, щоб показ блока 4 був близьким до нуля. Клавіатурою блока встановлюють рівень спрацювання кінцевої команди, що відповідає

нульовому положенню. Це значення приймають за початкове X_n . Столик переміщують у додатному напрямку. Потім переміщують у зворотному напрямку та за показами зразкового індикатора 6 фіксують значення переміщення в момент спрацьовування команди (за індикацією світлодіода). Процедуру повторюють тричі. Середнє арифметичне значення визначають за формулою (3.1):

$$X_{01} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}. \quad (3.1)$$

За похибку налаштування в першій серії випробувань приймають різницю між початковим показом зразкового індикатора 6, при якому виконувалося налаштування X_{n1} , та середнім арифметичним значенням трьох відліків отриманих у процесі перевірки за шкалою індикатора (X_i).

Налаштування команди та визначення похибки налаштування виконують тричі. Для кожної серії визначають відповідні значення за формулами (3.2-3.4):

$$\delta_1 = X_{n1} - X_{01}; \quad (3.2)$$

$$\delta_2 = X_{n2} - X_{02}; \quad (3.3)$$

$$\delta_3 = X_{n3} - X_{03}. \quad (3.4)$$

За остаточну похибку налаштування δ_n приймають найбільше за абсолютним значенням із трьох отриманих результатів. Отримане значення порівнюють з допустимими межами, установленними ТУ.

Зміщення налаштування приладу після заданої кількості циклів роботи та спрацьовування всіх команд визначають на спеціальному обкатному стенді або безпосередньо на центровому круглошліфувальному верстаті із застосуванням контрольної та фасонної оправок (рис. 3.5, а, б). Номінальний діаметр оправок повинен відповідати приблизно середньому значенню діапазону налаштування

приладу, що забезпечує найбільш характерні умови його роботи. У процесі випробування виконують встановлену ТУ кількість циклів підведення та відведення вимірювальних наконечників, спрацьовування попередніх і кінцевих команд та імітацію робочого режиму [27].

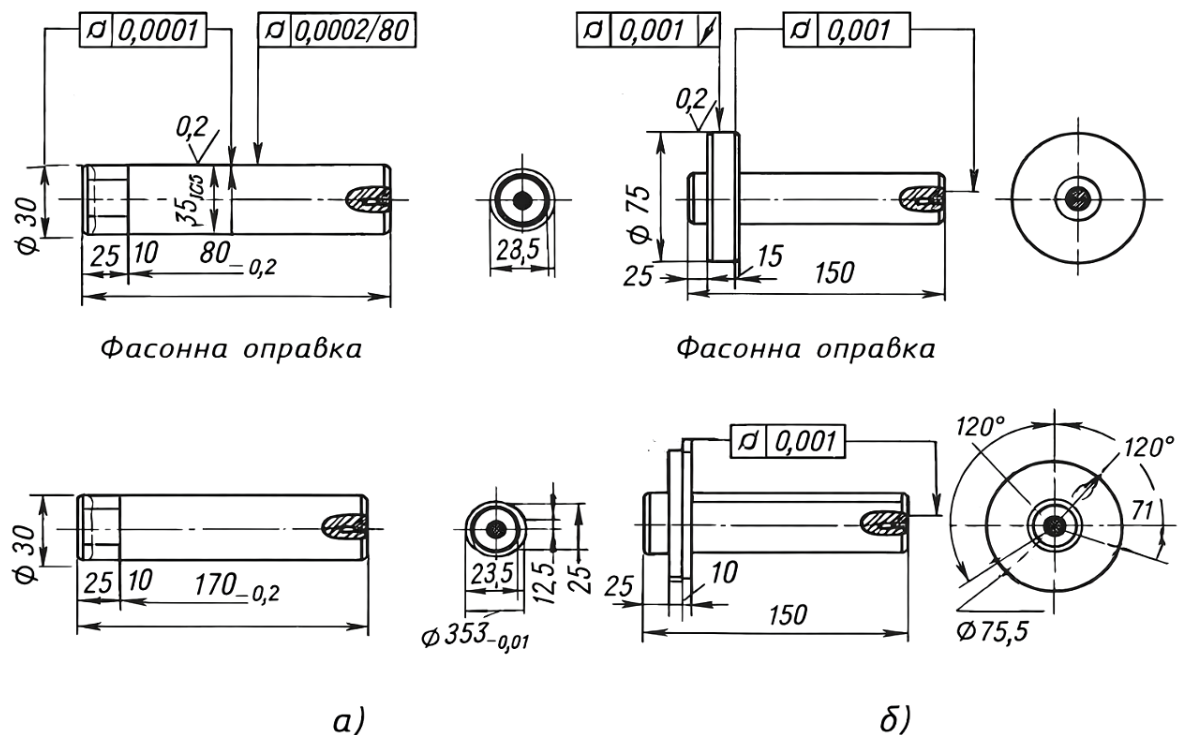


Рисунок 3.5 – Контрольна (вгорі) і фасонна оправки: а – для перевірки двохконтактних приладів; б – для перевірки одноконтактних приладів [27]

Як видно з рисунка 3.5, контрольна оправка має мінімальну похибку форми в поперечному перерізі та використовується для точного налаштування приладу. Фасонна оправка має спеціальні виступи, призначені для періодичного підйому контактних наконечників скоби, що імітує реальний цикл роботи приладу. Скобу або вимірювальну головку, що перевіряється, налаштовують за контрольною оправкою, встановленою в центрах стенду або верстата. Оправку приводять в обертання зі швидкістю 30-60 об/хв і виконують налаштування таким чином, щоб показ блоку управління був близьким до нуля.

Після початкового налаштування контрольну оправку замінюють фасонною. Фасонну оправку встановлюють у центри станку (або верстата), приводять в обертання та виконують 200 циклів попередньої обкатки.

За кожен цикл повинні:

- послідовно спрацьовувати всі попередні та кінцева команди;
- переміщатися контактні наконечники оснащення, що перевіряється;
- відпрацьовувати повний діапазон вимірювання (наприклад, до 500 мкм).

Таким чином імітується реальний технологічний цикл обробки деталі на верстаті.

Після завершення 200 циклів фасонну оправку замінюють контрольною, приводять її в обертання, виконують десятикратний підвід контактних наконечників до поверхні оправки та фіксують покази блоку управління при кожному підводі.

Початковий рівень налаштування перед повірочною обкаткою X_n визначають як середнє арифметичне значення серії з 10 відліків за формулою (3.5):

$$X_n = 0,1 \sum X_i, \quad (3.5)$$

де X_i – показ блоку управління при i -му підводі наконечників до контрольної оправки.

Надалі отримане значення використовують для визначення зміщення налаштування після виконання встановленої кількості циклів роботи.

3.3 Визначення точності приладів активного контролю в процесі обробки

Точність обробки, яку забезпечує система «шліфувальний верстат – прилад активного контролю», визначають безпосередньо в робочих умовах

експлуатації.

Перед початком випробувань перевіряють правильність функціонування всіх вузлів приладу, узгодженість роботи приладу та автоматики верстата, стабільність спрацьовування команд та відповідність режимів різання встановленим вимогам. Особливу увагу приділяють вибору режимів різання. Вони повинні забезпечувати відхилення геометричної форми оброблених поверхонь не більше ніж (25-50) % від допуску на розмір. Це необхідно для коректної оцінки роботи системи активного контролю.

Під час випробувань партію деталей обробляють в автоматичному або напівавтоматичному режимі. Основні параметри випробувань визначаються технічною документацією на прилад і верстат:

- кількість деталей у партії;
- режими різання;
- кількість випробовуваних приладів;
- умови післяопераційного контролю;
- засоби вимірювання оброблених деталей.

У ряді випадків за розмір обробленої деталі приймають півсуму найбільшого та найменшого значень діаметра в поперечному перерізі, що контролюється скобою. Такий підхід частково виключає вплив похибки форми деталі та дозволяє більш об'єктивно оцінити точність саме приладу активного контролю. Однак при визначенні точності всієї системи «верстат – прилад активного контролю» виключати похибку форми недоцільно, оскільки вона є складовою загальної похибки обробки.

Точність обробки, яку забезпечує верстат, оснащений ПАК, оцінюють за полем розсіювання розмірів партії оброблених деталей.

Для партії обсягом 100 і більше деталей поле розсіювання рекомендується визначати за формулою (3.6):

$$\omega = 4S, \quad (3.6)$$

де ω – поле розсіювання розмірів;

S – середньоквадратичне відхилення розмірів партії.

Середньоквадратичне відхилення при кількості деталей у партії $n = 100-150$ обчислюють за формулою (3.7):

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}}. \quad (3.7)$$

У разі наявності помітного зміщення рівня налаштування в процесі обробки партії деталей його необхідно враховувати при визначенні сумарної точності системи.

Зміщення рівня налаштування визначають за виразом (3.8):

$$\Delta_{zn} = |X_i - X_{max}|, \quad (3.8)$$

де X_i – значення центру розсіювання розмірів на початку обробки;

X_{max} – найбільше відхилення центру розсіювання миттєвої вибірки в процесі обробки від початкового значення X_i .

Якщо центри розсіювання розмірів зміщуються в часі за лінійною залежністю, загальне поле розсіювання ω рекомендується визначати як суму статистичної складової та складової зміщення за виразом (3.9):

$$\omega = \Delta_{zn} + 4S, \quad (3.9)$$

де S – середньоквадратичне відхилення розмірів;

$4S$ – статистичне поле розсіювання (за нормального закону розподілу);

Δ_{zn} – зміщення рівня налаштування.

Такий підхід дозволяє врахувати як випадкові похибки, так і систематичний дрейф процесу. Точність обробки вважається задовільною,

якщо поле розсіювання розмірів оброблених деталей не виходить за межі, встановлені документацією на прилад.

3.4 Стендові випробування приладів

Випробування приладів безпосередньо на верстаті є трудомісткими та потребують значних витрат часу. Тому виробники застосовують різноманітні спеціалізовані стенди та пристосування, призначені для перевірки приладів у цілому та їх окремих вузлів. Серед них особливе місце займають стенди для випробувань у динамічному режимі, максимально наближеному до реальних умов експлуатації.

Під час роботи на верстаті контактні наконечники приладу взаємодіють з обертовою або прямолінійно переміщуваною поверхнею деталі, що має відхилення від круглості, циліндричності або прямолінійності.

Основні експлуатаційні фактори:

- швидкість переміщення контрольованої поверхні – від 2 до 50 м/хв;
- відхилення форми – до декількох мікрометрів;
- швидкість зміни розміру під час зняття припуску – до 100 мкм/с на початку обробки та майже до нуля наприкінці циклу.

Таким чином, у зоні контакту наконечників одночасно відбуваються невеликі періодичні зміни розміру (через похибки форми) з частотою до 10 Гц та повільна безперервна зміна розміру внаслідок зняття припуску. Саме поєднання цих двох складових визначає складність адекватного відтворення реальних умов роботи приладу.

Під час стендових випробувань зазначені впливи імітують різними способами, зокрема:

- переміщенням контактних наконечників уздовж конічної оправки, що обертається;
- використанням овальної оправки;

– застосуванням шліцьових або поворотних оправок з лисками.

Такі рішення дозволяють відтворювати як періодичні зміни розміру, так і поступовий дрейф.

У серійному виробництві широко застосовують метод визначення похибки від зміщення налаштування, який полягає в обкатці приладу на поворотній оправці з лисками або на овальній оправці та періодичній перевірці за нерухомою або обертовою атестованою контрольною оправкою. Цей спосіб є технічно простим, зручним у застосуванні і таким, що не потребує складного випробувального обладнання.

Під час дослідних та приймальних випробувань нових зразків приладів перевірку їх характеристик у динамічному режимі часто здійснюють на спеціалізованому стенді з обертовою конусною оправкою. Такий стенд забезпечує:

- безперервну зміну контрольованого розміру;
- імітацію реального процесу зняття припуску;
- оцінку швидкодії, стабільності та стійкості до вібрацій;
- визначення динамічної похибки приладу.

3.5 Лінеаризація (калібрування) індуктивних приладів

У сучасних приладах активного контролю для шліфувальних верстатів застосовують мікропроцесорні або комп'ютеризовані цифрові блоки управління та індуктивні перетворювачі. Під час випуску приладу, його налагодження, а також після ремонту з заміною індуктивного перетворювача необхідно виконати процедуру лінеаризації (калібрування) [29].

Метою калібрування є:

- встановлення заданої дискретності цифрової індикації;
- налаштування діапазону вимірювання;
- забезпечення заданої чутливості;

– досягнення необхідної лінійності характеристики у всьому робочому діапазоні.

Мікропроцесорні блоки управління оснащені спеціалізованим програмним забезпеченням, яке дозволяє виконувати лінеаризацію характеристики індуктивного перетворювача шляхом введення калібрувальних точок.

У вимірювальному оснащенні ПАК застосовують диференціальні індуктивні перетворювачі (переважно), рідше – недиференціальні. Перетворювачі вбудовують безпосередньо у вимірювальне оснащення приладів (скоби, вимірювальні головки). Лінеаризацію виконують у зібраному вигляді – разом із механічними елементами оснащення – каретками, важелями, державками, контактними наконечниками.

Це принципово важливо, оскільки вимірювальне оснащення не завжди має передавальне відношення 1:1. Передавальне відношення кінематичних ланок може відрізнятися від одиниці, що впливає на реальну залежність «переміщення наконечника – вихідний сигнал».

Калібрувальні переміщення надають безпосередньо контактному наконечнику вимірювального оснащення (див. рис. 3.4), встановленому в робочому положенні. Таким чином, під час калібрування автоматично враховуються фактичні передавальні відношення важелів, люфти та пружні деформації кінематичних ланок, реальні умови встановлення перетворювача в оснащенні. Це дозволяє отримати характеристику, що відповідає дійсним умовам роботи приладу.

Процедура калібрування та лінеаризації полягає у введенні до мікропроцесорного блока управління заданих калібрувальних точок, які визначають «ідеальну» (заданого виду) характеристику приладу – як правило, лінійну, межі діапазону вимірювання, номінальну чутливість, дискретність індикації [29].

Калібрувальні значення вводять відповідно до встановлених параметрів,

наведених у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Калібрувальні точки [29]

Номер калібрувальної точки	11	22	33	34	55	66	77	78	79	10	11
Розмір, мкм	–100	–50	–10	0	10	50	100	200	300	400	500

На основі введених точок програмне забезпечення формує коригувальну функцію, що забезпечує максимальне наближення реальної характеристики перетворювача до заданої лінійної залежності в усьому робочому діапазоні.

Після введення до мікропроцесорного блока заданих калібрувальних точок виконують послідовне переміщення штока індуктивного перетворювача або наконечника вимірювального оснащення на визначені інтервали. У кожній заданій точці «ідеальної» (лінійної) характеристики наконечник встановлюють у відповідне положення, фіксують фактичний вихідний сигнал перетворювача, зберігають його значення в пам'яті блока управління. У результаті формується коригувальна функція, яка забезпечує наближення реальної характеристики приладу до заданої лінійної залежності в усьому діапазоні вимірювання.

Для лінеаризації кожного перетворювача вимірювальне оснащення, в яке він вбудований, встановлюють на стійку зі столиком (рис. 3.4) таким чином, щоб забезпечити точні калібрувальні переміщення наконечника за допомогою вузла тонкої подачі. Для контролю переміщень на стійці встановлюють цифровий індикатор із такими характеристиками:

- дискретність відліку – 0,1 мкм;
- діапазон вимірювання – не менше 2,0 мм (зазвичай 5-20 мм);
- допустима похибка – $\pm 0,2$ мкм.

Перед виконанням лінеаризації індуктивного перетворювача необхідно зняти його вихідну характеристику, тобто визначити залежність його вихідного сигналу від переміщення наконечника вимірювального оснащення. У цьому режимі сигнал надходить безпосередньо з перетворювача через аналого-цифровий перетворювач (АЦП), на дисплеї він відображається в умовних

одиницях (не в мкм). За плавністю зміни сигналу, його пропорційністю переміщенню, відсутністю стрибків або нелінійних ділянок можна зробити висновок про справність та попередню лінійність перетворювача.

Знята характеристика дозволяє визначити положення електричного нуля перетворювача, від якого надалі проводять калібрування. Визначення електричного нуля є принципово важливим, оскільки забезпечує роботу в центральній (найбільш лінійній) частині характеристики, запобігає виходу робочої точки за межі оптимальної ділянки, дозволяє перевірити справність перетворювача безпосередньо на верстаті.

Кількість калібрувальних точок визначається конструкцією перетворювача, кінематикою вимірювального оснащення, діапазоном вимірювання, вимогами до точності лінеаризації, необхідною точністю спрацьовування команд. Зменшення інтервалів між точками підвищує точність лінеаризації. Особливо важливо задавати менші інтервали калібрувальних точок у зоні підвищеної точності поблизу нуля, наприклад у діапазоні від -10 до $+50$ мкм, де пред'являються найжорсткіші вимоги до точності вимірювання та видачі команд.

При використанні недиференціальних індуктивних перетворювачів, що мають виражену нелінійність характеристики, призначають більшу кількість точок лінеаризації для забезпечення необхідної точності апроксимації. Диференціальні перетворювачі характеризуються достатньо високою лінійністю в межах робочої ділянки (зазвичай у діапазоні $\pm 0,5$ мм). Тому для їх калібрування в більшості випадків достатньо 5-7 калібрувальних точок.

Калібрування розпочинають із встановлення індуктивного перетворювача за допомогою столика стійки в положення електричного нуля – за значенням його вихідного сигналу в умовних одиницях. У цьому положенні на нуль встановлюють зразковий цифровий індикатор 6 (рис. 3.4), перевіряють стабільність показів, переконуються у відсутності механічних люфтів та нестабільності сигналу.

Зазвичай робоча ділянка характеристики ПАК становить 600-1000 мкм.

Типовий діапазон вимірювання приладу:

– загальний – від –100 до +500 мкм;

– підвищеної точності – від –10 до +50 мкм.

При цьому необхідно враховувати можливість електронного коригування нуля в межах ± 100 мкм, що потребує відповідного розширення калібрувального діапазону на цю величину. Це гарантує збереження лінійності при зміщенні робочої точки під час експлуатації.

Калібрування починають із першої точки обраної робочої ділянки характеристики – як правило, з мінусової граничної точки (наприклад, –100 мкм). Задану точку встановлюють шляхом переміщення столика стійки (рис. 3.4) за показами зразкового цифрового індикатора. Після точного встановлення положення фіксують відповідний вихідний сигнал перетворювача, зберігають його значення в пам'яті мікропроцесорного блока, переходять до наступної калібрувальної точки.

Після встановлення вимірювального наконечника в першу калібрувальну точку (наприклад, –100 мкм) у пам'ять блока управління вводять відповідний вихідний сигнал індуктивного перетворювача шляхом натискання кнопки «Введення». Далі послідовно за допомогою столика стійки, орієнтуючись на покази зразкового цифрового індикатора, переміщують вимірювальний наконечник на задані калібрувальні інтервали (відповідно до табл. 3.1). У кожній заданій точці фіксують і вводять у пам'ять блока управління відповідний вихідний сигнал перетворювача. Операцію повторюють до проходження всіх передбачених точок робочої ділянки характеристики.

Після введення всіх калібрувальних точок і збереження відповідних значень вихідного сигналу перетворювача формується коригувальна характеристика приладу. У результаті прилад отримує лінійну характеристику в заданому діапазоні вимірювання, встановлену чутливість, необхідну дискретність цифрової індикації.

Після завершення процедури пам'ять блока автоматично блокується. Введені калібрувальні дані зберігаються навіть при вимкненні живлення та не можуть бути змінені без введення пароля. Це забезпечує захист налаштувань від несанкціонованого втручання.

Точність калібрування залежить насамперед від точності переміщення вимірювального наконечника на задані інтервали, похибки зразкового цифрового індикатора, відсутності люфтів і пружних деформацій у кінематичних ланках, стабільності електричного сигналу перетворювача.

Слід враховувати, що при застосуванні методу кусочно-лінійної апроксимації, ідеальна лінійність забезпечується лише у калібрувальних точках, між сусідніми точками зберігається притаманна індуктивному перетворювачу нелінійність.

Проте за умови достатньої кількості калібрувальних точок ця залишкова нелінійність є значно меншою, ніж початкова нелінійність повної характеристики перетворювача, і, як правило, не перевищує допустимих меж, установлених технічною документацією.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у розробленні та комплексному дослідженні системи активного контролю для круглошліфувального верстата-автомата з підвищеними показниками точності, стабільності та надійності вимірювання лінійних розмірів деталей в умовах реального виробництва.

1. Проаналізовано технічні характеристики та функціональне призначення систем активного контролю, що застосовуються на круглошліфувальних верстатах-автоматах. Підтверджено, що їх використання забезпечує автоматичну компенсацію похибок обробки, підвищення продуктивності праці та суттєве зменшення кількості браку завдяки безперервному контролю розмірів у процесі шліфування.

2. Виконано критичний огляд існуючих аналогів і сучасних технічних рішень у галузі активного контролю. Визначено їх сильні та слабкі сторони за показниками точності, завадостійкості, стабільності метрологічних характеристик, технологічності та можливості інтеграції у верстати з ЧПК. Обґрунтовано доцільність застосування індуктивних вимірювальних перетворювачів як раціонального рішення для серійного машинобудівного виробництва.

3. Розкрито принцип роботи систем активного контролю та фізичну сутність перетворень, що лежать в основі вимірювання лінійних розмірів. Показано, що зміна геометричного параметра деталі трансформується в зміну індуктивності вимірювального перетворювача, яка після вторинного електронного перетворення використовується для формування керуючих впливів на технологічний процес.

4. Розроблено структурну схему системи активного контролю та визначено функціональні зв'язки між її основними елементами: вимірювальним перетворювачем, вимірювальною схемою, блоком обробки сигналу та

відліково-командним пристроєм. Досліджено їх взаємодію в режимі реального часу та доведено реалізацію замкненого контуру керування процесом шліфування.

5. Детально проаналізовано роботу системи в межах автоматичного циклу верстата. Встановлено, що узгоджена взаємодія вимірювального пристрою, пневматичного блока аретування та електронного відліково-командного пристрою забезпечує стабільність вимірювання та своєчасне формування керуючих команд.

6. Побудовано кінематичну схему вимірювального вузла з урахуванням вимог мінімізації люфтів, підвищення жорсткості конструкції та термостабільності. Запропоновані конструктивні рішення дозволили зменшити механічну складову похибки та підвищити повторюваність результатів вимірювання.

7. Виконано комплексний розрахунок точності системи активного контролю з урахуванням метрологічних, механічних і температурних складових. Проведено розрахунок точності відліково-командного пристрою з адаптивною системою формування керуючих сигналів. Визначено основні параметри індуктивного вимірювального перетворювача мікропереміщень, оцінено його чутливість, лінійність і стабільність, що підтверджує можливість досягнення мікрометрового рівня точності.

8. Розроблено методику повірки приладів активного контролю відповідно до вимог чинної нормативної документації, що забезпечує підтримання метрологічних характеристик у процесі експлуатації.

9. Проаналізовано методи випробувань і калібрування вимірювальних перетворювачів та досліджено точність роботи системи безпосередньо під час обробки деталей. Обґрунтовано необхідність компенсації температурних і вібраційних впливів для забезпечення стабільності результатів.

10. Розроблено та обґрунтовано програму стендових випробувань системи активного контролю з визначенням критеріїв оцінювання її

ефективності. Запропоновано метод лінеаризації (калібрування) індуктивного перетворювача, що дозволяє зменшити систематичну похибку та підвищити точність вимірювання.

Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути використані під час модернізації існуючих або розроблення нових систем активного контролю для високоточного машинобудівного виробництва. Запропоновані технічні та методичні рішення сприяють підвищенню ефективності технологічних процесів і якості обробки деталей.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматичні засоби вимірювань. URL: <https://surl.li/qlwvza> (дата звернення: 15.01.2026).
2. Прилад активного контролю БВ-П.3156. URL: <https://surl.lt/zurcvv> (дата звернення: 20.01.2026).
3. Гоменюк Д. В., Романов Л. А., Шимановський М. М. Технології верстатних робіт: підручник. URL: <https://surl.li/rtqufr> (дата звернення: 25.01.2026).
4. Кирилович В. А., Мельничук П. П., Яновський В. А. Основи технологій обробки поверхонь деталей машин: підручник. URL: <https://surl.li/mpsyid> (дата звернення: 01.02.2026).
5. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Автоматизація виробничих процесів: підручник. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2022. 400 с.
6. Бабіченко А. К., Красніков І. Л., Бабіченко Ю. А., Вельма В. І., Лисаченко І. Г., Подустов М. О., Дзевочко О. М. Мікропроцесорні засоби в автоматизованих системах керування технологічними процесами. URL: <https://surl.li/woqaav> (дата звернення: 10.02.2026).
7. Бабіченко А. К., Красніков І. Л., Бабіченко Ю. А., Лисаченко І. Г., Шутинський О. Г. Технічні засоби автоматизації. навч.-метод. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. 183 с.
8. Бондаренко І. М., Бородин О. В., Карнаушенко В. П. Мікропроцесорні системи контролю та керування: навч. посіб. URL: <https://surl.lu/mspsni> (дата звернення: 15.02.2026).
9. Паливода Ю. Є., Дячун А. Є., Лещук Р. Я. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навч.-метод. посіб. URL: <https://surl.li/cicmig> (дата звернення: 20.02.2026).
10. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник. URL: <https://surl.li/lmxeij>

(дата звернення: 25.02.2026).

11. Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Базіло К. В. Автоматизація виробничих процесів. Технічні засоби автоматизації: навч.-метод. посіб. URL: <https://surl.li/bjsjat> (дата звернення: 01.03.2026).

12. Пушкар М. С., Проценко С. М. Проектування систем автоматизації: навч. посіб. URL: <https://surl.li/ywqzfn> (дата звернення: 05.03.2026).

13. Єремєєв І. С., Кисельов В. Б. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: навч. посіб. Одеса: «Гельветика». 2022. 324 с.

14. Схема засобів активного контролю. URL: <https://surl.li/larcke> (дата звернення: 10.03.2026).

15. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин: навч. посіб. URL: <https://surl.li/ikmjn> (дата звернення: 15.03.2026).

16. Денисюк В. Ю. Автоматизація виробничих процесів в приладобудуванні: електронний посіб. URL: <https://surl.li/dydera> (дата звернення: 20.03.2026).

17. Нестерчук Д. М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій. URL: <https://surl.li/agtkcm> (дата звернення: 25.03.2026).

18. Новіков Ф. В., Новіков Г. В., Жовтобрюх В. О. Безпека життєдіяльності та інноваційні технології виробництва навч. посіб. Дніпро: ЛПРА, 2023. 220 с.

19. Тимчик Г. С., Скицюк В. І., Ключко Т. Р. Перетворювачі автоматизованих систем: навч. посіб. URL: <https://surl.lu/abpkfy> (дата звернення: 01.04.2026).

20. Муляр Ю. І. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина II: навч. посіб. URL: <https://surl.li/ndvptf> (дата звернення: 05.04.2026).

21. Сиротюк С. В. Віртуальні контрольно-вимірювальні прилади і системи: навч. посіб. Львів: «Магнолія 2006». 2025. 128 с.

					ВР 507.00.00.000 ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		