

**Міністерство освіти і науки України**  
**Луцький національний технічний університет**  
**Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій**  
**Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**  
**ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОГЕОМЕТРІЇ**  
**НА БАЗІ ПРОФІЛОГРАФА-ПРОФІЛОМЕТРА 252**  
**EASURING COMPLEX FOR MICROGEOMETRY RESEARCH BASED ON**  
**PROFILOGRAPH-PROFILOMETER 252**

спеціальність 176 Мікро- та наносистемна техніка  
(шифр і назва спеціальності)

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

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи МНТм-21  
Кубай Андрій Миколайович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент  
ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.  
Гарант освітньої програми:  
к.т.н., доцент  
ЛАПЧЕНКО Юрій Сергійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет:** комп'ютерних та інформаційних технологій

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

**Ступінь вищої освіти:** магістр

**Галузь знань:** 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

**Спеціальність:** 176 Мікро- та наносистемна техніка

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., проф. О. ПОВСТЯНОЙ

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Кубаю Андрію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Вимірювальний комплекс дослідження мікрогеометрії на базі профілографа-профілометра 252

керівник роботи: к.т.н., доцент Пташенчук Віталій Віталійович

затверджені наказом закладу вищої освіти від «27» червня 2025 р. № 304/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: «17» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: матеріал – залізвуглецева сталь, висота нерівностей поверхні 0,8-50 мкм, похибка  $\pm 10\%$

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз задачі дослідження мікрогеометрії поверхонь деталей. Огляд літератури в сфері дослідження шорсткості поверхонь деталей після механообробки. Пошук шляхів реалізації завдання по дослідженні шорсткості після шліфування. Огляд та порівняння методів дослідження шорсткості поверхонь. Характеристика перетворювачів для дослідження шорсткості поверхонь контактним методом. Розробка вимірювальної системи дослідження шорсткості поверхонь на базі профілографа-профілометра 252. Дослідження шорсткості поверхонь деталей. Дослідження безконтактних методів вимірювання.

5. Перелік графічного матеріалу: Презентація кваліфікаційної роботи на 10 слайдах.

6. Консультант и розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз вихідних даних та шляхи вирішення поставленого завдання	Пташенчук В. В.		
Теоретична частина	Пташенчук В. В.		
Експериментально-розрахункова частина	Пташенчук В. В.		
Спеціальна частина	Пташенчук В. В.		
Нормоконтроль	Лапченко Ю. С.		
Гарант ОП	Лапченко Ю. С.		
Показник запозичень тексту	<b>14,95 %</b>		
Академічна доброчесність	Федік Л. Ю.		

7. Дата видачі завдання «26» червня 2025 р.

*КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН*

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Провести огляд літератури за тематикою кваліфікаційної роботи	до 15 вересня 2025 р.	
2	Провести аналіз загальної проблеми та вибір напрямків досліджень	до 25 вересня 2025 р.	
3	Описати теоретичну складову об'єкту дослідження	до 12 жовтня 2025 р.	
4	Провести розробку вимірювальної системи	до 12 листопада 2025 р.	
5	Провести експериментальні дослідження шорсткості поверхні деталей	до 25 листопада 2025 р.	
6	Нормоконтроль	до 02 грудня 2025 р.	
7	Інструментальна перевірка і експертне оцінювання рівня унікальності тексту	до 06 грудня 2025 р.	
8	Подати чистовий варіант кваліфікаційної роботи магістра на кафедру	до 10 грудня 2025 р.	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ Кубай А. М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Пташенчук В. В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Кубай А. М. Вимірювальний комплекс дослідження мікрогеометрії на базі профілографа-профілометра 252. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Мікро- та наносистемна техніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Кваліфікаційна робота магістра містить опис механізмів проведення досліджень мікронерівностей, шорсткості поверхні зокрема як контактними так і безконтактними методами вимірювань. Проведений порівняльний аналіз існуючих методів дослідження шорсткості поверхонь, наведені їхні слабкі та сильні сторони в сфері забезпечення точності, продуктивності та діапазонового інтервалу. Проведена розробка вимірювальної системи дослідження шорсткості поверхонь на базі профілографа-профілометра 252 з оцифрованою вимірювального сигналу з використанням аналого-цифрового перетворювача та відображення результатів вимірювань на персональному комп'ютері з використанням програмного забезпечення з можливістю їх аналізування та подальшої обробки.

Ключові слова: сталь, профілометрія, шорсткість, вимірювання, перетворювач.

## ANNOTATION

Kubay A. Measuring complex for studying microgeometry based on a profilograph-profilometer 252. Manuscript.

Master's qualification work in the educational program «Micro- and nanosystem technology». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's degree thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used and appendices.

Master's degree thesis contains a description of the mechanisms for conducting studies of microroughness, surface roughness, in particular, by both contact and non-contact measurement methods. A comparative analysis of existing methods for studying surface roughness is carried out, their weaknesses and strengths in the field of ensuring accuracy, productivity and range interval are given. A measuring system for studying surface roughness has been developed based on the profilograph-profilometer 252 with digitization of the measuring signal using an analog-to-digital converter and display of measurement results on a personal computer using software with the possibility of their analysis and further processing.

Keywords: steel, profilometry, roughness, measurement, converter.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОГО ЗАВДАННЯ	
1.1 Аналіз задачі дослідження шорсткості поверхонь оброблюваних деталей.....	10
1.2 Огляд методів дослідження шорсткості поверхні.....	12
1.3 Пошук шляхів реалізації завдання по підвищенню ефективності процесу дослідження мікронерівностей поверхні.....	21
1.4 Постановка завдань до кваліфікаційної роботи .....	22
Висновки до розділу .....	23
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	
2.1 Характеристика контактних приладів дослідження шорсткості.....	24
2.2 Характеристика профілографа-профілометра 252.....	30
Висновки до розділу .....	34
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	
3.1 Опис експериментальної установки .....	35
3.2 Зняття профілограм досліджуваних деталей та оцінка рівня шорсткості їх поверхонь .....	43
Висновки до розділу .....	46
РОЗДІЛ 4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	
4.1 Оптична та лазерна мікроскопія поверхні.....	48
4.2 Скануюча зондова мікроскопія .....	56
Висновки до розділу .....	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	63
ДОДАТКИ .....	66

## ВСТУП

Актуальність теми. Вимірювання величини шорсткості поверхонь деталей після механообробки є актуальним та важливим завданням по забезпеченню якості, надійності та довговічності виробів. Дослідження мікронерівностей поверхні є критично важливим у сфері виробництва, оскільки характеристики шорсткості функціональних поверхонь в значній мірі визначають їх зношення в ході тертя а також відповідність галузевим стандартам та технічним вимогам. Тому вдосконалення існуючих методів дослідження мікронерівностей та засобів контролю параметрів шорсткості залишається актуальним завданням сьогодення для забезпечення надійності роботи рухомих та відповідальних механізмів і пристроїв машинобудування, приладобудування та інших галузях.

Проблема дослідження. Мікронерівності поверхонь деталей механізмів та вузлів з рухомими елементами безпосередньо впливають на точність, надійність і довговічність машин і приладів, що робить контроль шорсткості ключовим аспектом в забезпеченні необхідного рівня їх якості [1]. Вимірювання шорсткості проводиться на різних стадіях виробництва для контролю якості обробки та зниження виробничих витрат, пов'язаних із дефектами. Актуальним завданням є розробка та вдосконалення приладів мікропрофілометрії, таких як профілометри та методів дослідження нерівностей поверхонь для більш точного та ефективного контролю параметрів шорсткості, що стимулює подальший розвиток у цій галузі.

Мета роботи – розробка вимірювальної системи дослідження мікронерівностей на базі профілографа-профілометра 252.

Об'єкт дослідження – шорсткість поверхонь залізобуглецевих сплавів.

Предмет дослідження – процеси дискретного перетворення сигналу стану шорсткості поверхні матеріалу.9

Методи дослідження. В процесі виконання даної роботи був використаний контактний метод дослідження шорсткості поверхні з використанням індуктивного давача для перетворення зміни положення

алмазного наконечника на досліджуваній поверхні в аналоговий електричний сигнал, основні методи аналого-цифрового перетворення з використанням АЦП, математичний апарат статистичної обробки результатів досліджень.

Завдання дослідження.

1. Провести аналіз методів дослідження мікрогеометрії поверхонь залізовуглецевих сплавів.

2. Здійснити розроблення комп'ютеризованої вимірювальної системи для оцінки стану шорсткості поверхні матеріалу на основі профілографа-профілометра моделі 252.

3. Провести калібрування вимірювального обладнання для покращення точності вимірювання шорсткості поверхонь виробів.

4. Отримати профілограми дослідних зразків на профілографі-профілометрі 252 в цифровій формі.

5. Провести дослідження методів діагностики стану шорсткості поверхні методами безконтактної профілометрії.

Теоретична значущість.

Описані процеси аналого-цифрового перетворення при побудові вимірювальної системи дослідження мікронерівностей на базі профілометра 252.

Практична цінність та галузь застосування.

1. Розроблена вимірювальна система визначення величини шорсткості поверхні після механообробки на базі профілографа-профілометра 252.

2. Проведені дослідження шорсткості поверхні модернізованим профілографом-профілометром 252 з цифровим вихідним сигналом стану мікронерівностей.

Наукова новизна роботи.

Наведені теоретичні та практичні аспекти побудови та калібрування вимірювальної системи на базі профілографа-профілометра 252 з

використанням аналого-цифрового перетворювача та програмного забезпечення моніторингу стану шорсткості досліджуваної поверхні.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи.

Кубай А. М. Вимірювальна система на базі профілографа-профілометра 252. *«Перспективні технології та прилади»* : зб. статей. Луцьк, 2025. Вип. 26. С. 107-112.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОГО ЗАВДАННЯ

### 1.1 Аналіз задачі дослідження шорсткості поверхонь оброблюваних деталей

Сучасні матеріали, вироби та технології їх отримання вимагають ефективних способів контролю параметрів якості деталей в ході їхнього виготовлення на основі існуючих або нових методів дослідження мікронерівностей. Моніторинг значень шорсткості поверхонь дає змогу вирішувати такі задачі як:

- дотримання технічних параметрів виробу;
- забезпечення заданої точності виробу в ході його виготовлення;
- забезпечення закладених та очікуваних експлуатаційних властивостей.

Параметри мікронерівностей деталі визначають такі властивості як герметичність виробу, стійкість до корозії, зношення та цілий ряд властивостей поверхні матеріалу, зокрема теплових, гідродинамічних, радіаційних, магнітоелектричних та оптичних [2]. До основних сучасних науково-інженерних розробок способів діагностики стану шорсткості поверхні відносяться атомно-силова мікроскопія, контактна профілометрія та оптична мікроінтерферометрія [3].

На основі наведених способів відбувається покращення методів контролю шорсткості поверхонь деталей та виробів та проводяться пошуки оптимальних методів по досягненню максимально-можливих значень шорсткості для різних типів оброблюваних поверхонь деталей найрізноманітніших матеріалів. Усі існуючі методи вимірювання величини шорсткості та мікронерівностей можна поділити на контактні і безконтактні (рис. 1.1). Методи контактного моніторингу величини шорсткості поверхні поділяються на щупові та методи зліпок. Безконтактні у свою чергу

поділяються на інтерференційні, світлового перетину, тіньової проекції, растрові та рефлектометричні [3].



Рисунок 1.1 – Методи визначення шорсткості поверхонь деталей [3]

Профілометри контактного принципу дії, які застосовують індуктивний щуповий датчик не пристосовані до проведення дистанційних вимірювань. Реєстрація мікронерівностей проводиться магнітоелектричним самопишучим механізмом (рис. 1.2) на паперовому носії інформації (рис. 1.3) термічним способом [4].

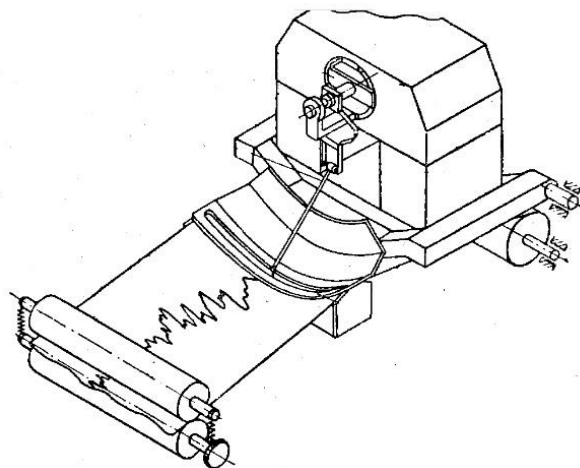


Рисунок 1.2 – Магнітоелектричний самопишучий механізм [4]



Рисунок 1.3 – Вигляд профілограми стану поверхні [5]

Отримання інформації про шорсткість поверхні в аналоговому вигляді та відображення мікронерівності електромеханічним способом є малоефективним через складність процесу обробки інформації. Для забезпечення ефективної обробки вимірювальної інформації стосовно величини мікронерівностей поверхні пропонується обладнати профілограф-профілометр аналого-цифровим перетворювачем, який буде обробляти сигнал від індуктивного перетворювача та за допомогою програмного забезпечення відображати значення шорсткості поверхні та профілограми нерівностей на екрані персонального комп'ютера, що дасть можливість легко та швидко оцінювати якість оброблюваної поверхні та проводити ефективний контроль її стану.

## 1.2 Огляд методів дослідження шорсткості поверхні

У сучасному технологічному виробництві в процесі виготовлення деталей та виробів дуже важливим є застосування систематичного контролю поверхні деталей виробу та якості самих матеріалів. Стан та якість поверхневого шару матеріалу суттєво впливає на експлуатаційні властивості деталей машин та механізмів визначаючи їхню зносостійкість, вібростійкість,

контактну жорсткість, міцність з'єднань та інші параметри надійності виробу. Одним з ключових параметрів, який визначає якість поверхневого шару матеріалу, є шорсткість його поверхні. Контроль шорсткості поверхні повинен забезпечувати високу точність, локальність та відтворюваність вимірювань. Важливим завданням при дослідженні шорсткості є створення автоматичних систем контролю з комп'ютерною обробкою результатів. Відповідно до вимог по шорсткості поверхні і точності розмірів оброблюваної деталі застосовується той чи інший метод контролю оброблюваної поверхні. В роботі розглянуті найчастіше застосовувані та сучасні методи контролю шорсткості поверхні деталей. Одними з часто застосовуваних приладів дослідження мікронерівностей поверхонь деталей є контактні вимірювальні засоби такі як профілографи та профілометри. Найбільшого поширення серед контактних методів контролю шорсткості поверхні деталей набули щупові прилади, які працюють за методом общування контрольованої поверхні алмазним наконечником. Принцип роботи профілографа полягає в послідовному общуванні досліджуваної поверхні алмазним щупом голкоподібної форми, який знаходиться в перпендикулярному положенні до контрольованої поверхні з подальшим перетворення коливань голки в оптичний або електричний сигнали, які записуються або відображаються на відліковому механізмі. Для зручності розшифрування профілограма викреслюється у збільшеному масштабі. Збільшення запису вимірювань висот нерівностей у вертикальному напрямку можливе в діапазоні від 400 до 200000 разів. Сучасні профілографи дозволяють вимірювати нерівності поверхні заввишки від 0,8 до 63 мкм. Похибка вертикального збільшення профілографа для різних видів приладів сягає від  $\pm 5$  до  $\pm 10$  %, а горизонтального – не більше ніж  $\pm 10$  % [6].

Порівняльний безконтактний метод дослідження шорсткості поверхонь ґрунтується на порівнянні вимірюваної поверхні із зразками або еталонами шорсткості (рис. 1.4). Стандарт поширюється на зразки шорсткості поверхонь, призначених для порівняння візуально та на дотик з поверхнями виробів,

отриманими обробкою різанням, поліруванням, електроерозійною, піскоструменевою обробкою.



Рисунок 1.4 – Міри шорсткості [7]

Цей метод є простим і доступним, забезпечує достовірність контролю по  $Ra > 1,25$  мкм і  $Rz > 10$  мкм та широко застосовується в цехових умовах [7]. Перевагами даного методу є простота вимірювання, до недоліків можна віднести високу похибку вимірювання, оскільки результати вимірювання безпосередньо залежать від суб'єктивних навичок і досвіду вимірювальника та високу втомлюваність людини.

Метод світлового перерізу проводиться за схемою (рис. 1.5), при якій пучок світлових променів, які надходять від джерела світла через вузьку щілину шириною близько 0,1 мм, направляється об'єктивом під кутом на контрольовану поверхню. Відбиваючись від цієї поверхні, промені через об'єктив переносять зображення щілини у площину фокусу окуляра. Якщо контрольована поверхня є ідеально рівною, то в окулярі щілина матиме вигляд прямої лінії, яка світиться. Якщо на поверхні є дефект, то в площині окуляра спостерігається викривлена лінія, яка світиться. Висота мікронерівностей вимірюється від візирної лінії (тонкої лінії окуляра) мікрометром. Різниця відліків при поєднанні цієї лінії з верхнім і нижнім краями нерівності зчитується з мікрометричного барабанчика і дозволяє визначати значення  $h_i$ , необхідні для розрахунку значень шорсткості по  $Ra$  і  $Rz$ .

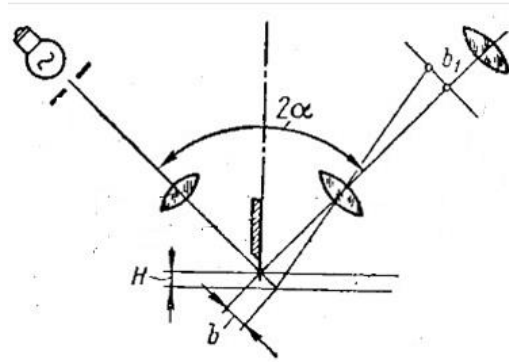


Рисунок 1.5 – Світловий принцип вимірювання шорсткості [8]

Вимірювання параметра  $b_1$  здійснюється за допомогою окулярного мікрометра, перехрестя якого переміщується на кут  $\beta=45^\circ$  і при цьому оцінюється параметр  $b_2$ . Якщо пучок світлових променів направити на контрольну поверхню під кутом  $\alpha=45^\circ$ , то  $b_2=b_1/\sin\beta=H\cdot(\sin\alpha\cdot\sin\beta)\cdot V$  та визначається висота нерівності за формулою (1.1) [8]:

$$H=b_2/2V, \quad (1.1)$$

де  $V$  – збільшення об'єктива мікроскопа.

Якщо на відстані 0,1 мм від контрольованої поверхні встановити лінійку зі скошеним ребром, то вона відсіче частину пучка світла, і на контрольованій поверхні буде видно тінь, яка відкидається лінійкою. Верхній край тіні відображає профіль досліджуваної поверхні який і розглядають в мікроскоп по методу тіньового перерізу (рис. 1.6) [8].

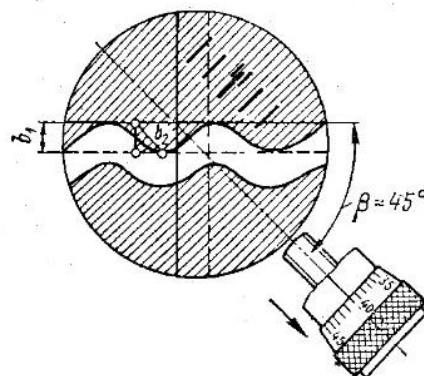


Рисунок 1.6 – Тіньовий принцип вимірювання шорсткості [8]

Сучасні прилади, які працюють за принципом світлового перерізу, дозволяють вимірювати нерівності поверхні заввишки від 0,8 до 63 мкм. Дані прилади дозволяють визначати параметри  $R_z$ ,  $R_{max}$  і  $S$ , а також фотографувати мікронерівності поверхні [8]. Залежно від окуляра прилади, які працюють за цим методом, дозволяють вимірювати висоти мікронерівності в діапазоні від 0,8 до 62,5 мкм.

Лазерний еліпсометричний метод заснований на аналізі зміни поляризації світла, яке пройшло або відбилось від досліджуваного об'єкта. На принципах еліпсометрії побудовано методи чутливих безконтактних досліджень поверхні різних речовин. В якості джерела світла в еліпсометричних вимірюваннях використовується монохроматичне випромінювання другої гармоніки (зелене світло), яке дає можливість досліджувати мікронерівності на поверхні досліджуваного об'єкта. Основним завданням еліпсометрії є дослідження відбиваючої системи та визначення її параметрів за допомогою аналізу змін стану поляризації світлового пучка в результаті відбиття. Кількісним параметром цих змін служать поляризаційні кути, які визначаються основним рівнянням еліпсометрії. Еліпсометрія не тільки використовується для дослідження металів та окисних плівок на них, а й широко застосовується для вивчення тонкоплівкових систем, виготовлених на основі напівпровідникових та діелектричних матеріалів [9].

Растрова електронна мікроскопія дозволяє отримувати зображення поверхні зразка з високою роздільною здатністю (кілька нанометрів) [10]. Тонкий електронний промінь, який генерується електронною гарматою, фокусується електронними лінзами. Електронні лінзи в сукупності з відхиляючими котушками утворюють систему яку називають електронною колоною. У сучасних растрових електронних мікроскопах зображення реєструється у цифровій формі [10]. Розмір електронного зонда та розмір області взаємодії зонда зі зразком набагато більші за відстань між атомами мішені. Проте, скануючий електронний мікроскоп має переваги, включаючи здатність візуалізувати порівняно велику область зразка, здатність

досліджувати масивні мішені, і навіть різноманітність аналітичних методів, дозволяють вимірювати фундаментальні характеристики матеріалу мішені [10]. Залежно від конкретного приладу та параметрів експерименту, можна отримати роздільну здатність від десятків до одиниць нанометрів. Перевагами растрової електронної мікроскопії є значна глибина різкості зображення (об'ємність), великі розміри об'єктів та простота системи електронної оптики, великий діапазон збільшення (від 3 до 150000 разів) [10].

Атомно-силова мікроскопія використовується для визначення рельєфу поверхні з роздільною здатністю від десятків ангстрем до атомарного. На відміну від скануючого тунельного мікроскопа, з допомогою атомно-силового мікроскопа можна досліджувати як провідні так і непровідні поверхні [10]. Принцип роботи атомно-силового мікроскопа ґрунтується на реєстрації силової взаємодії між поверхнею досліджуваного зразка та зондом. Як зонд використовується нанорозмірний наконечник, який розташовується на кінці пружної консолі (кантилевері). Сила, що діє на зонд з боку поверхні, призводить до згинання кантилевера. Поява височин або западин під вістрям призводить до зміни сили, яка діє на зонд, а значить, і зміни величини вигину кантилевера. Таким чином, реєструючи величину вигину, можна зробити висновок про рельєф поверхні. Залежно від характеру дії сили між кантилевером та поверхнею зразка, виділяють три режими роботи атомно-силового мікроскопа: контактний, напівконтактний, безконтактний [10]. Перевагами даного методу є можливість отримання знімків мікрорельєфу поверхні з високою роздільною здатністю (аж до атомарного) та можливість повної автоматизації процесу вимірювання. До недоліків атомно-силової мікроскопії можна віднести невеликий розмір поля сканування, низьку швидкість сканування, складність отримання зображення, спотворення зображення через нелінійність, гістерезис п'єзокераміки сканера [10].

Мікроінтерференційний метод реалізується за допомогою приладів МІ-4, МІ-5, МІ-15, МІ-9, МІ-10 призначених для лабораторних вимірювань параметрів Rz і S та фотографування мікронерівностей чистих поверхонь зі

значенням  $R_z$  від 0,03 до 1 мкм. Принцип роботи мікроінтерферометра дозволяє в полі зору мікроскопа збільшувати в потрібне число разів зображення інтерференційної картини і вимірювати координатним методом нерівності за допомогою звичайного гвинтового окулярного мікрометра. У місцях виступів та впадин на досліджуваній поверхні інтерференційні смуги викривляються. Ступінь викривлення смуг і характеризує нерівність поверхні. На рисунку 1.7 наведена інтерферограма поверхні.

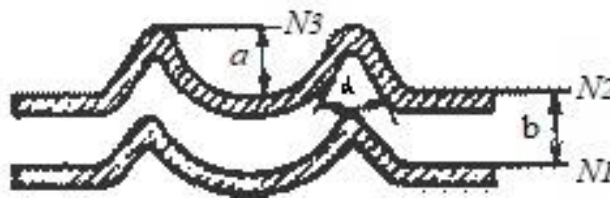


Рисунок 1.7 – Схема викривлення інтерференційних смуг [11]

Кожна інтерференційна смуга є зображенням профілю поверхні. Висоти мікронерівностей в мікрометрах визначаються шляхом вимірювання викривлення інтерференційної смуги  $a$  по відношенню до інтервалу смуг  $b$  (рис. 1.7) та визначається за формулою (1.2) [11]:

$$R=(a/b) \cdot (1/2)=0,275a/b, \quad (1.2)$$

де  $l$  – довжина світлової хвилі, найчастіше  $l=0,55$  мкм.

У тих випадках, коли необхідно визначити крок нерівностей, його підраховують за формулою (1.3) [11]:

$$S=2atg(\alpha/2), \quad (1.3)$$

де  $\alpha$  – кут профілю, який вимірюється за допомогою окулярного мікрогвинта.

Інтерферометричний метод. Оптична схема інтерферометра, яка дозволяє проводити дослідження нерівностей поверхні, представлена на рисунку 1.8. В основу цієї схеми покладено інтерферометр Майкельсона. Джерелом світла є

лазер (1) з довжиною хвилі 190 нм, який проходить через напівпрозору пластину (2) і розпадається на два пучки однакової інтенсивності. Перший пучок потрапляє на поверхню досліджуваного зразка (3) а розсіяне від нього випромінювання проходить через напівпрозору пластину та потрапляє на екран (5).

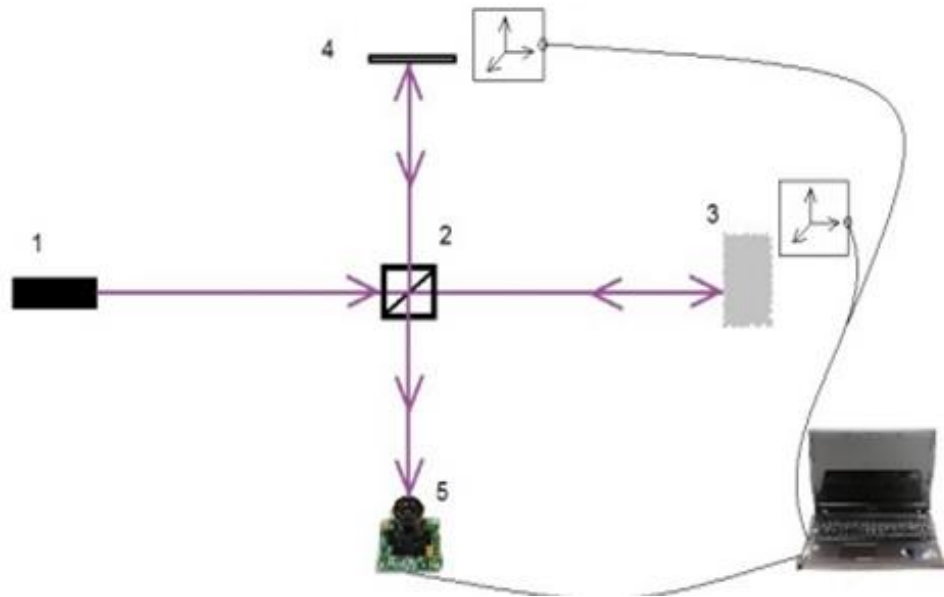


Рисунок 1.8 – Схема інтерферометра [10]:

1 – лазер; 2 – напівпрозора пластину; 3 – зразок;

4 – дзеркальна поверхня; 5 – екран

Другий світловий пучок, відбившись від напівпрозорої пластини, потрапляє на дзеркальну поверхню (4), відбитий пучок від якого, пройшовши назад через напівпрозору пластину, інтерферує з першим пучком і потрапляє на ССD-матрицю та проводиться цифрова обробка сигналів. Інтерферометри дуже чутливі до зовнішніх збурень, контроль яких здійснюється за допомогою п'єзоелектричних віброметрів, встановлених на зворотній поверхні відбиваючих дзеркал. Сигнал від п'єзоелектричних віброметрів за допомогою математичної обробки віднімається з результатів вимірювання та відбраковуються результати вимірювань при перевищених вібраційних впливах на прилад [10]. Підвищити точність вимірювань інтерферометрами можливо шляхом використання лазера з короткою довжиною хвилі та вузьким

спектром випромінювання, а також застосуванням цифрової обробки результатів вимірювань.

На основі наведених та розглянутих способів дослідження мікронерівностей поверхонь наведемо порівняння технічних параметрів основних методів контролю шорсткості поверхні деталей (таблиця 1.1). Основними критеріями порівняльної характеристики були прийняті діапазон вимірювань, складність проведення вимірювань та можливість подальшої цифрової обробки інформації.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз основних методів дослідження шорсткості поверхонь деталей

Метод дослідження	Діапазон вимірювання мікронерівностей (мкм)	Можливість цифрової обробки результатів вимірювань	Складність обробки результатів вимірювань	Режим: контактний «+» безконтактний «-»
Профілографічний	0,8–63	+	Низька	+
Порівняльний безконтактний метод	$R_a > 1,25$ $R_z > 10$	–	Низька	–
Метод світлового січення	0,8-62,5	–	Низька	–
Еліпсометрія	0,0003-0,0579	+	Висока	–
Растрова електронна мікроскопія	0,0004	+	Досить висока	–
Атомно-силова мікроскопія	$\geq 0,001$	+	Досить висока	+
Інтерферометрія	$\geq 0,019$	+	Середня	–

На основі проведеного аналізу існуючих способів моніторингу шорсткості поверхні деталей можна виділити профілографічний, еліпсометричний, растрово-електронної і атомно-силової мікроскопії та інтерферометричний метод дослідження шорсткості поверхні. У випадках дослідження шорсткості поверхні 1 мкм та вище доцільно застосовувати профілографічний метод який дає непогані результати з автоматичною обробкою результатів та менш складний у застосуванні на практиці.

### **1.3 Пошук шляхів реалізації завдання по підвищенню ефективності процесу дослідження мікронерівностей поверхні**

Для підвищення продуктивності вимірювання шорсткості профілометром необхідно оптимізувати процес налаштування приладу, використовувати високошвидкісні режими, проводити статистичну обробку даних і попередню підготовку поверхні. Важливо також вибрати оптимальний тип щупа, використовувати багатоточковий аналіз для підвищення точності та звертати увагу на застосування бездротових або автоматизованих систем для прискорення отримання та обробки даних. Оптимізація процесу налаштування та використання вимірювального обладнання має важливе значення, при цьому особливу увагу необхідно звертати на:

- попереднє налаштування та калібрування, що передбачає перед початком вимірювань забезпечення профілометра належним калібруванням та налаштуванням;

- вибір оптимального режиму залежно від типу поверхні та вимог до точності. Високошвидкісні режими можуть значно скоротити час вимірювання, але можуть вимагати більш частого калібрування.

- використання статистичних методів, що забезпечує швидку та надійну обробку результатів, отримання усереднених значень шорсткості та зменшення появи випадкових похибок.

– автоматизація та багатоточковий аналіз для проведення вимірювань у кількох точках поверхні, що дозволить отримати більш повну картину та знизити час вимірювання;

– використання сучасних або модернізація існуючих вимірювальних приладів, що забезпечить високу швидкість вимірювання та розширення функції, таких як автоматична обробка даних та можливість підключення до комп'ютера.

#### **1.4 Постановка завдань до кваліфікаційної роботи**

Дослідження мікронерівностей на сучасному етапі механообробки конструкційних матеріалів вимагає застосування вимірювального обладнання, спроможного проводити швидко та точну оцінку стану поверхні виробу з можливістю отримання масиву даних про об'єкт дослідження, обробки та аналізу інформації. Реалізація таких завдань вимагає застосування комп'ютеризованих вимірювальних систем з застосуванням елементів мікропроцесорної техніки. Для забезпечення ефективної оцінки параметрів шорсткості досліджуваних поверхонь виробів поставлені наступні завдання.

1. Провести аналіз методів дослідження мікрогеометрії поверхонь залізобуглецевих сплавів.

2. Здійснити розроблення комп'ютеризованої вимірювальної системи для оцінки стану шорсткості поверхні матеріалу на основі профілографа-профілометра моделі 252.

3. Провести калібрування вимірювального обладнання для покращення точності вимірювання шорсткості поверхонь виробів.

4. Отримати профілограми дослідних зразків на профілографі-профілометрі 252 в цифровій формі.

5. Провести дослідження методів діагностики стану шорсткості поверхні методами безконтактної профілометрії.

## Висновки до розділу 1

1. Вимірювання шорсткості поверхні деталей є актуальним завданням сьогодення, оскільки це ключовий параметр контролю якості в сучасній механообробці, який безпосередньо впливає на експлуатаційні властивості готових виробів. Точність таких вимірювань гарантує відповідність продукції стандартам та оптимізує технологічні процеси.

2. Дослідження шорсткості поверхонь можливо різними способами, такими як профілографічний, еліпсометричний, інтерферометричний, растрово-електронної та атомно-силової мікроскопії. Вибір методу необхідно узгоджувати з точністю та діапазоном досліджуваних значень мікронерівностей. У випадках дослідження шорсткості поверхні до 1 мкм доцільно застосовувати профілографічний метод, який забезпечує хороші результати з можливістю автоматичної обробкою результатів та менш складний у застосуванні на практиці.

3. Для підвищення ефективності процесу вимірювання шорсткості поверхонь профілометрами необхідно оптимізувати процес налаштування приладу, використовувати високошвидкісні режими, проводити статистичну обробку даних і попередню підготовку поверхні. використовувати багатоточковий аналіз для підвищення точності та звертати увагу на застосування автоматизованих систем для прискорення отримання та обробки результатів вимірювань.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Характеристика контактних приладів дослідження шорсткості

До контактних або щупових вимірювальних приладів дослідження мікронерівностей та шорсткості поверхонь матеріалу відносять профілографи-профілометри моделей 201, 202, 252 та профілометри моделей 240, 253 та інші. Принцип роботи таких приладів заснований на обшупуванні щупом у вигляді алмазного (карбидовольфрамового) наконечника (рис. 2.1) контрольованої поверхні та перетворення утворених нерівностями поверхні коливань щупа у пропорційні зміни напруг, величини яких можуть бути проградуєвані у величинах шорсткості, яка відтворюється на шкалі приладу або подається в записувальний механізм та реєструється на відповідних носіях інформації.



Рисунок 2.1 – Наконечник контактних вимірювачів шорсткості [10]

Контактні профілографи-профілометри та профілометри, які мають високу точність, застосовують для контролю поверхонь найбільш відповідальних деталей. Наконечник щупа приладу залишає слід на поверхні контрольованої деталі, тому дослідження шорсткості поверхонь деталей з м'яких матеріалів застосовувати не рекомендується.

Профілограф-профілометр моделі 201 (рис. 2.2) є високочутливим засобом дослідження шорсткості та хвилястості поверхонь деталей як зі сталі так і чавунів, кольорових конструкційних та неметалевих матеріалів.

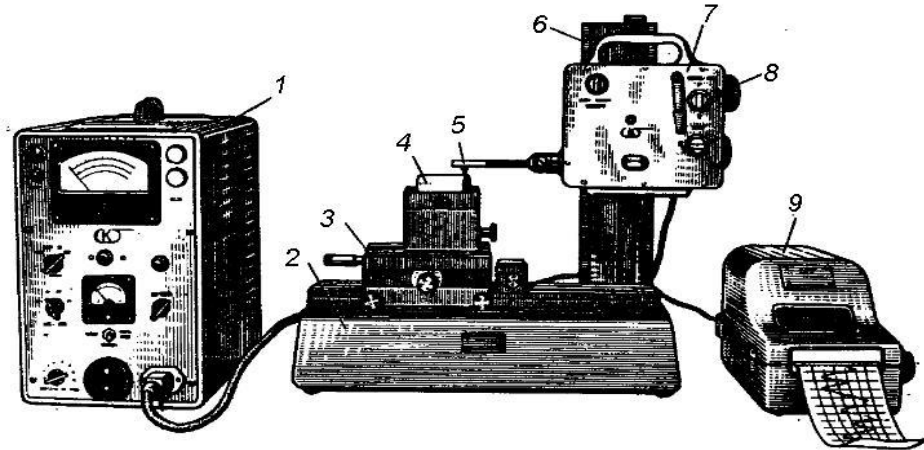


Рисунок 2.2 – Профілограф-профілометр моделі 201 [5]:

1 – електронний блок приладу; 2 – корпус приладу; 3 – універсальний столик приладу; 4 – контрольована деталь; 5 – давач індуктивний; 6 – стійка приладу; 7 – каретка приладу; 8 – маховик приладу; 9 – самописець електромеханічний з термічним записом

Раніше в електромеханічних щупових приладах використовувалися індукційні перетворювачі, у витках котушки яких наводилася електрорушійна сила при переміщенні в полі постійного магніту котушки під дією вимірювальної голки.

На сьогоднішній день переважного поширення набули індуктивні перетворювачі (прилади моделей 201, 202, 240 і 252, Телісурф-4, Телісурф-10, Перт-о-метр-34В, Профікордер та ін.).

Індуктивний перетворювач профілографа-профілометра моделі 201, електрична частина якого наведена на рисунку 2.3 включає електронний блок 7, показуючий 8 та записуючий механізм 9. Магнітна система датчика представляє сердечник 2 з двома котушками 1. Котушка датчика і дві половини первинної обмотки диференціального входного трансформатора 6 утворюють балансний міст, який живиться від генератора звукової частоти 5. При переміщенні датчика

щодо досліджуваної поверхні алмазна голка 4, повторюючи нерівності поверхні, змінює повітряні зазори між якорем та сердечником, а отже, і напругу на виході диференціального трансформатора, яка підсилюється електронним блоком 7, на виході якого підключені записуючий або показуючий прилади. Електронний механотронний перетворювач є електронною лампою з рухомим електродом (зазвичай анодом), на виведеному кінці якого закріплений наконечник, який досліджує поверхню виробу. У ряді конструкцій щупових приладів («Брюель і К'єр» у Данії, «Філіпс» у Голландії, «Тейлор-Гобсон-105» в Англії, «Швістул» у Швейцарії, «Хоммель-Тестер-Р» у Німеччині, «Сурфком-1» у Японії п'єзоперетворювач виконують у вигляді елемента, склеєного з двох пластин п'єзоелектрика (титанат барію, титанат цирконію, сегнетова сіль та інші) який має на кінці голку. Нормальні до досліджуваної поверхні зміщення голки викликають деформацію елемента, а внаслідок асиметрії кристалічної структури п'єзоелектрика – пропорційна цій деформації напруга на виході перетворювача.

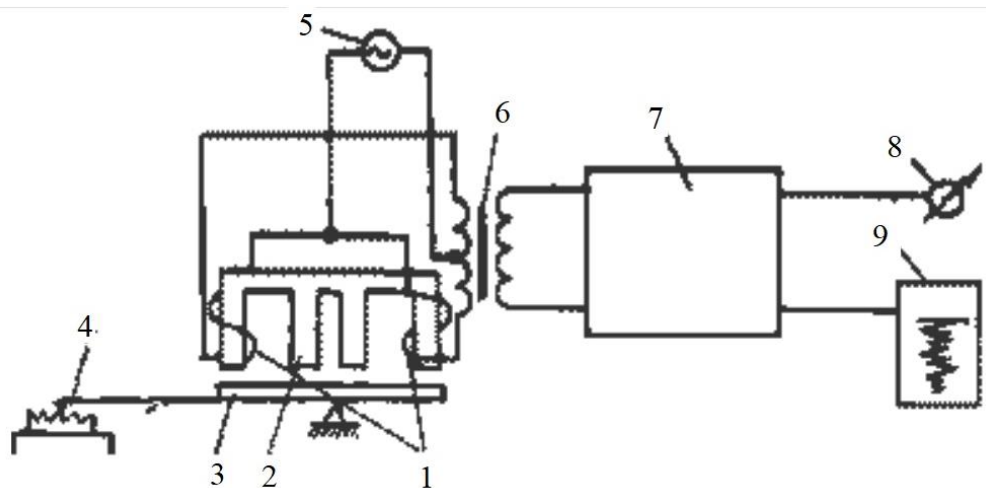


Рисунок 2.3 – Електрична схема профілографа-профілометра [8]:

- 1 – котушка, 2 – сердечник; 3 – наконечник; 4 – алмазна голка;  
 5 – генератор частоти; 6 – трансформатор; 7 – електронний блок;  
 8 – показуючий пристрій; 9 – записуючий механізм

В наш час у технологічних лабораторіях найчастіше використовуються профілографи-профілометри блокової конструкції (модель 201 та інші). Прилад

має мале вимірювальне зусилля (не більше 1 мН при градієнті до 5 мкН/мкм), завдяки чому можна вимірювати параметри шорсткості деталей з покриттями без їх пошкодження, деталей з кольорових металів, пластмас та інших неметалічних матеріалів. Прилад оцінює параметр шорсткості  $R_a$  в межах від 0,04 до 8 мкм на базових довжинах від 0,08 до 2,5 мм і записує профіль з висотою нерівностей від 0,05 до 20 мкм на прямолінійних трасах поверхонь. Похибка показань приладу вписується у  $\pm 10\%$ , а похибка запису  $\pm 4\%$  [5]. Він дозволяє зробити запис профілю плоскої та циліндричної поверхонь на довжині до 40 мм, в отворах діаметром 8-20 мм – на глибині до 10 мм, а в отворах діаметром 20-45 мм – до 100 мм. Прилад забезпечується пристроєм для запису хвилястості поверхні. За профілограмами, які записуються на електротермічному папері шириною 80 мм, можна визначити всі нормовані параметри шорсткості зазначених поверхонь. Профілограф-профілометр моделі 202 (рис. 2.4) більш універсальний. Цей прилад укомплектований спеціальними пристроями, які дозволяють записувати профіль і вимірювати параметр  $R_a$  на криволінійних поверхнях з радіусом не менше 50 мм, кульках та роликах діаметром 1...25 мм, зубцях зубчастих коліс, у малих отворах діаметром не менше 3 мм на глибині до 5 мм.

Профілограф-профілометр моделі 252 з цифровою індикацією результатів призначений для вимірювання параметрів шорсткості  $R_a$  (від 0,02 до 100 мкм),  $H_{\max}$  і  $H_{\min}$  (від 0,1 до 100 мкм),  $t_r$  (90-100%), числа кроків  $K_r$  (до 100). Найменший діаметр отвору, який перевіряється, становить 3 мм при глибині до 5 мм.

Профілометр моделі 240 являє собою переносний прилад для оцінки шорсткості поверхонь за параметром  $R_a$  (2,5...0,025 мкм) у цехових умовах.

Портативний профілометр моделі 253 призначений для вимірювання параметра  $R_a$  у цехових умовах. Діапазон вимірювання параметра шорсткості  $R_a$  складає від 0,04 до 2,5 мкм на базовій довжині 0,25; 0,8 та 2,5 мм. У приладі використано мехатронний перетворювач. Прилад використовується для вимірювання стандартних параметрів шорсткості та запису профілю поверхні.

Діапазон вимірювання висоти мікронерівностей складає від 0,5 до 400 мкм, базові довжини 0,08-25 мм, довжини трас 3-100 мм, швидкості трасування 3, 10, 30, 50, 100 мм/хв.

Профілометр портативний моделі 253 є високочутливим вимірювальним приладом для вимірювання шорсткості металевих та неметалічних (пластмаса, скло тощо) виробів без пошкодження їх поверхні. Він призначений для вимірювання шорсткості поверхні виробів у цехових умовах. Вимірювання шорсткості проводиться шляхом обшупування щупом досліджуваної поверхні і відліку результатів вимірювань за шкалою градуйованого приладу за параметром  $R_a$ . Дія приладу заснована на принципі обшупування алмазною голкою досліджуваної поверхні та перетворення коливань голки у зміни напруги за допомогою мехатронного перетворювача. Сигнал з датчика подається на електронний підсилювач, проходить через фільтри базових довжин і надходить на показуючий прилад, який одночасно є інтегруючим пристроєм. Шкала приладу відградуйована у значеннях  $R_a$ .

Профілометр портативний моделі 253 призначений для вимірювання параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь металевих та неметалічних деталей, а також поверхонь з покриттями. Параметри шорсткості визначають за профілограмою (запис профілю мікронерівностей у прямокутних координатах у збільшеному масштабі), або безпосередньо за аналоговим показуючим механізмом. Прилад дозволяє контролювати номінально прямолінійні профілі зовнішніх та внутрішніх поверхонь у режимі діапазону базових довжин 0,08, 0,25; 0,8 та 2,5 мм за довжини траси інтегрування 1,6; 3,2; 6,0 мм.

При поздовжньому переміщенні перетворювача щодо контрольованого профілю щуп коливається в поперечному напрямку, описуючи мікронерівності профілю. Коливання через важіль викликають поворот якоря перетворювача, змінюються повітряні проміжки між якорем і загальним осердям двох котушок індуктивності. Отриманий електричний сигнал посилюється електронним блоком і передається на записувальний або показуючий пристрій.

Профілометр 253 складається з корпусу, на який встановлюють універсальний столик та мотопривід з вимірювальним перетворювачем; електронного блоку з показуючим приладом та записуючого електротермічного пристрою (рис. 2.4).

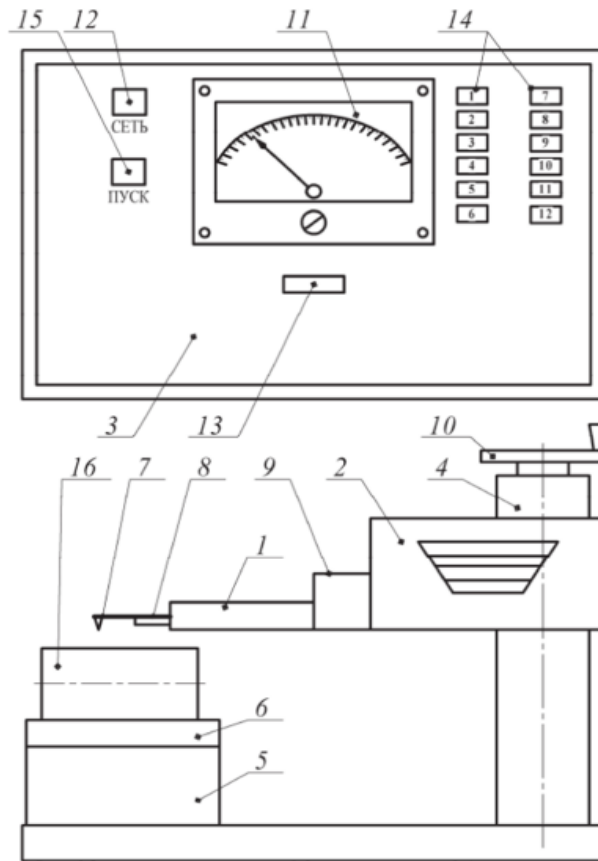


Рисунок 2.4 – Профілометр моделі 253 [8]:

- 1 – перетворювач; 2 – привід; 3 – електронний блок; 4 – стійка;  
 6 – призма; 6 – столик; 7 – наконечник; 8 – опора; 9 – гвинт;  
 10 – маховик; 11 – показуючий механізм; 12 – кнопка включення;  
 13 – сигнальне вікно; 14 – перемикач діапазону; 15 – кнопка пуск

Щупові прилади спеціального призначення, застосовуються для вимірювання параметрів шорсткості відповідальних поверхонь, кілець підшипників зокрема (модель 201, 252 та інші). До найпоширеніших зарубіжних профілографів-профілометрів належать прилади «Телісурф» (Англія), «Перт-о-метр», «Перт-о-граф» (Німеччина), «Профікордер» (США) та ін.

## 2.2 Характеристика профілографа-профілометра 252

Профілограф-профілометр моделі 252 призначений для вимірювання в лабораторних умовах шорсткості та хвилястості поверхонь, переріз яких у площині вимірювання представляє пряму лінію. У профілографі-профілометрі використаний індуктивний перетворювач, що дозволяє записувати профіль нерівностей у збільшеному масштабі у вигляді філограми або вимірювати параметри шорсткості у цифровому вигляді за шкалами приладів.

При роботі приладу в режимі профілографа реєструючим пристроєм є прилад з електротермічним записом в прямокутній системі координат. Діапазон вимірювань нерівностей складає від 0,02 до 250 мкм. Ширина запису становить 50 мм. Загальне компонування приладу представлено на рисунку 2.5. На стійці 1 розміщений мотопривід 2, у якому закріплений датчик 3 або 4. На стіл стійки встановлюється предметний стіл 5, який дозволяє переміщувати досліджувану деталь, у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

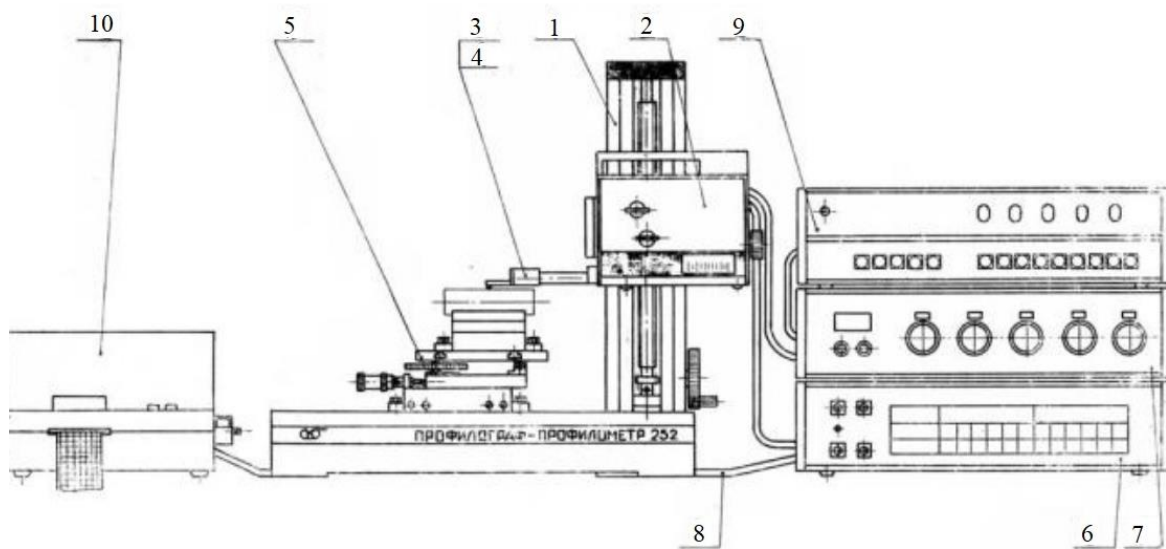


Рисунок 2.5 – Профілограф-профілометр 252 [12]:

- 1 – стійка; 2 – мотопривід; 3 та 4 – датчик; 5 – предметний стіл;  
6 – блоком живлення; 7 – вимірювальний блоко; 8 – з’єднувальні шланги; 9 – лічильний блок; 10 – записуючий пристрій

Для встановлення датчика на вимірювану поверхню мотопривід за допомогою ходового гвинта переміщається напрямними стійками. Посилення та перетворення електричних сигналів з датчика, а також управління роботою приладу здійснюється блоком живлення 6 і вимірювальним блоком 7. Ці блоки пов'язані з'єднувальними проводами 8 з мотоприводом, рахунковим блоком 9, призначеним для обробки електричних сигналів і видачі результатів вимірювань на цифровий відліковий пристрій та записуючим приладом 10, який служить для запису на діаграмну стрічку результатів вимірювання нерівностей досліджуваної поверхні.

Прилад (рис. 2.6) забезпечений перетворювачем, електронним вимірювальним блоком 7 з рахунковим блоком 8 і записуючим пристроєм 9. Індуктивний перетворювач виконують у вигляді зведеного сердечника 5 з двома котушками 6. Котушки і дві половини первинної обмотки диференціальної схеми 4 та 10 із частотою 10 кГц. При переміщенні по контрольованій поверхні алмазна голка 3 перетворювача разом з якорем, підвішеному на опорі 2, здійснює коливання. Повороти якоря перерозподіляють індуктивності котушок, змінюючи цим вихідну напругу диференціального трансформатора.

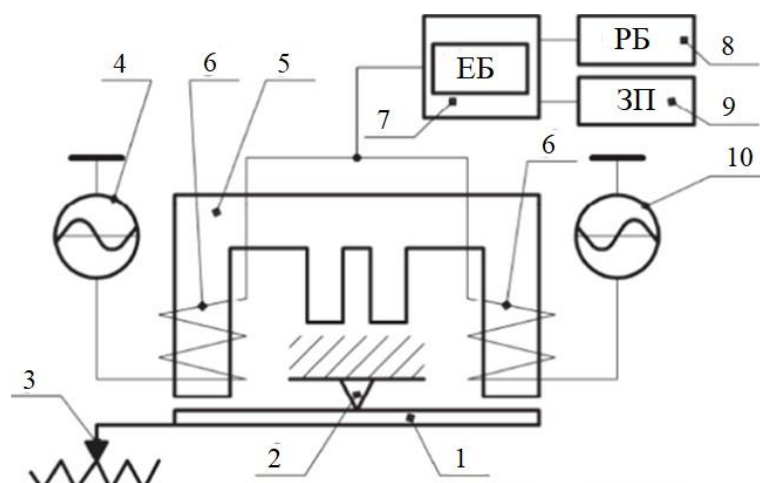


Рисунок 2.6 – Профілограф-профілометр 252 [12]:

- 1 – корпус; 2 – опора; 3 – наконечник; 4 та 10 – диференціальні схеми;  
 4 – сердечник; 6 – котушка; 7 – електронний блок; 8 – рахунковий блок;  
 9 – записуючий пристрій

Зміни амплітуди напруги характеризують висоту мікронерівності, а зміна частоти (при роботі приладу в режимі профілометра) їх крок. Цифрові значення параметрів визначають за допомогою цифрового відлікового пристрою. При роботі приладу в режимі профілографа зміни напруги подаються на пристрій для запису.

Основні параметри профілографа-профілометра 252 [10] наведені нижче.

1. Параметри шорсткості поверхні, що визначаються за показом пристрою:

- $R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю;
- $H_{max}$  – висота найбільшого виступу профілю;
- $H_{min}$  – висота найбільшої западини профілю;
- $t_p$  – відносна опорна довжина профілю;
- $n$  – кількість кроків нерівностей у межах базової довжини.

2. Діапазон вимірювань:

- режим профілографа, мкм: 0,02...250;
- режим профілометра за параметрами:
- $R_a$ , мкм: 0,02...100;
- $H_{max}$ ,  $H_{min}$ , мкм: 0,1 ... 100;
- $t_p$ , %: 0...100;
- $n$  від 1 до 1000.

3. Вертикальне збільшення профілографа складає 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000, 50000, 100000.

4. Горизонтальне збільшення профілографа складає 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000.

5. Максимальна довжина траси дослідження складає 50 мм.

6. Ширина запису рівна 50 мм.

7. Швидкості трасування датчика складає 0,6; 6; 60 мм/хв.

8. Значення відсічок кроку рівне 0,08; 0,25; 0,8; 2,5мм.

9. Довжина трас в режимі профілометра рівна 1,5; 3 та 6 мм.

10. Радіус кривизни вершини щупа рівний  $10 \pm 2,5$  мкм.

Диференціальні трансформатори для визначення лінійного переміщення представляють собою датчик, який працює за принципом індукції та як правило використовується для вимірювання лінійного переміщення [13]. Фізичний принцип, що лежить в основі їхньої роботи, був вперше встановлений Майклом Фарадеєм у ХІХ столітті та детально вивчений під час другої світової війни для створення військових літаків та ракет. Як правило такий датчик включає в себе ряд дротяних котушок, розташованих так, що всередині них може переміщатися металевий стрижень. На одну із дротяних котушок (первинну) подається змінний струм, зазвичай із частотою від 1 до 10 кГц. Коли стрижень зміщується відносно котушок, сформована трансформатором енергія передається на вторинні обмотки пропорційно лінійному положенню стрижня. На вторинних обмотках датчика генерується два або більше сигналів змінного струму. Відношення або різницю цих сигналів використовується для розрахунку абсолютного положення стрижня.

Диференціальні датчики трансформаторного типу продовжують широко використовуватися в аерокосмічній галузі, оскільки характеризуються безпечною та надійною роботою у несприятливих умовах. Диференціальні трансформатори лінійного переміщення з високою точністю застосовуються в профілометрах, але для їх виготовлення потрібно високоточне намотування дротяних котушок. Загалом використання датчиків такого типу у сфері промисловості та автоматизації скорочується, їх замінюють індуктивні лінійні енкодери [13]. Індуктивні лінійні енкодери працюють за тим самим фізичним принципом, що і диференціальні датчики, але замість трансформаторів у них використовуються друковані схеми. Завдяки цьому індуктивні лінійні енкодери мають таку ж стійкість, надійність і точність, як і диференціальні датчики, але без недоліків громіздкості, ваги і високої вартості.

Додатковою перевагою індуктивних лінійних енкодерів є те, що вони зазвичай отримують на вході живлення постійного струму і передають цифрові дані. Це означає, що вони простіше інтегруються із сучасними системами управління та більш зрозумілі сучасним інженерам.

## Висновки до розділу 2

1. Контактні профілографи-профілометри забезпечують вимірювання шорсткості на відносно грубих і твердих поверхнях, забезпечуючи високу точність параметрів шорсткості, а також надійні та прості у використанні, що надає їм певні переваги по відношенню до безконтактних методів профілометрії, особливо коли безконтактні методи не підходять, хоча вони і обмежуються типом поверхні через фізичний контакт.

2. Датчик щупових профілометрів являє собою диференціальний трансформатор визначення лінійного переміщення за принципом індукції. Диференціальні датчики трансформаторного типу продовжують широко використовуватися в різних галузях та характеризуються безпечною та надійною роботою у несприятливих умовах. Диференціальні трансформатори лінійного переміщення з високою точністю застосовуються в профілометрах а для їх виготовлення застосовується високоточне намотування дротяних котушок. Використання датчиків такого типу у сфері промисловості та автоматизації скорочується, їх замінюють індуктивні лінійні енкодери. Індуктивні лінійні енкодери працюють за тим самим фізичним принципом, що і диференціальні датчики, але замість трансформаторів у них використовуються друковані схеми. Завдяки цьому індуктивні лінійні енкодери мають таку ж стійкість, надійність і точність, як і диференціальні датчики, але без недоліків громіздкості, ваги і високої вартості. Додатковою перевагою індуктивних лінійних енкодерів є те, що вони зазвичай отримують на вході живлення постійного струму і передають цифрові дані та легко інтегруються із сучасними системами управління.

3. Застосування оцифрування аналогових профілометрів забезпечить перетворення аналогових сигналів від датчиків (щупів) в цифрові дані для аналізу, зберігання, візуалізації та точного вимірювання параметрів шорсткості поверхонь ( $R_a$ ,  $R_z$ ) і будувати їх профілограми з високою роздільною здатністю, що дасть змогу їм конкурувати з сучасними профілометрами.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

#### 3.1 Опис експериментальної установки

Оцифровка профілографа-профілометра 252 включає процес перетворення аналогового запису профілю шорсткості, отриманої за допомогою старих приладів типу 201, у цифровий формат для подальшої обробки, аналізу та зберігання, що дозволяє автоматизувати розрахунок параметрів ( $R_a$ ,  $R_z$ ) та позбутися ручного аналізу паперових діаграм. Це досягається або скануванням паперової стрічки або підключенням аналого-цифрового перетворювача з обробкою результатів вимірювань в спеціалізованому програмному забезпеченні для отримання точних числових даних та профілограм.

Опираючись на досвід практичної роботи в галузі цифрової та мікропроцесорної електроніки вибираємо бюджетний АЦП фірми Advantech USB-4702 (рис. 3.1). Цей модуль працює через USB порт, не вимагає додаткового живлення і має прийнятні для нашого випадку характеристики швидкодії та точності.

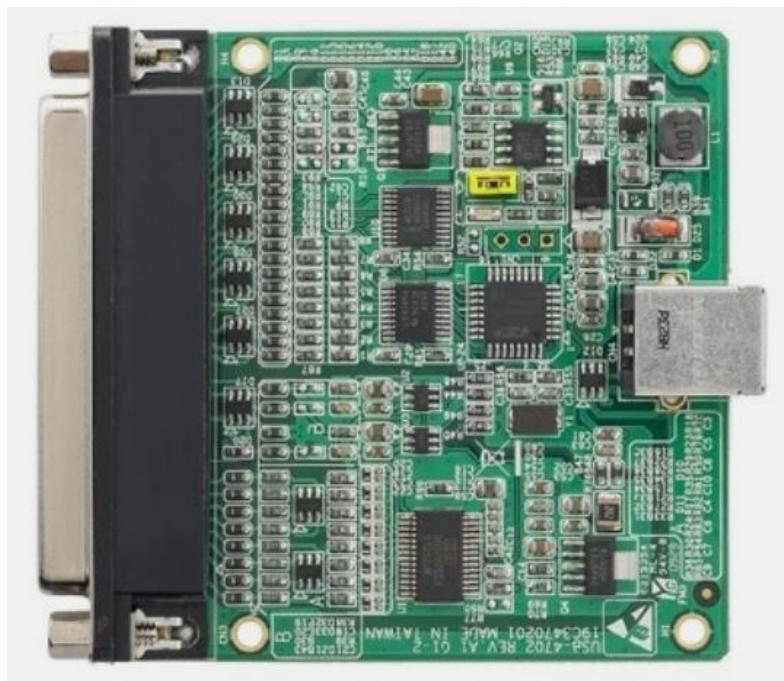


Рисунок 3.1 – АЦП USB-4702 [14]

Основні характеристики АЦП USB-4702 наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики АЦП USB-4702 [14]

Параметр	Значення
Кількість каналів аналогового введення	8
Вхідний діапазон для аналогових каналів	$\pm 0,5\text{В}$ , $\pm 0,75\text{В}$ , $\pm 1,0\text{В}$ , $\pm 1,5\text{В}$ , $\pm 1,75\text{В}$ , $\pm 2,0\text{В}$ , $\pm 2,5\text{В}$ , $\pm 5\text{В}$ , $\pm 10\text{В}$ ,
Розрядність АЦП	12
Тактова частота	120 МГц
Тип роз'єму для сигнальних кіл	DB37
Інтерфейс	USB 2.0
Точність	$\pm 12\%$ молодшого розряду
Швидкість АЦП перетворення	10000 перетворень на секунду
Вхідний опір аналогових каналів	127 кОм

Крім того модуль має 8 вхідних та 8 вихідних ліній дискретного введення, 2 лінії аналогового виведення, 32 розрядний лічильник-таймер. Для нашого випадку необхідно використати лише один канал аналогового виведення.

Дослідивши електричну принципову схему профілографа було вирішено сигнал, який відповідає нерівності поверхні, знімати з вихідного каскаду підсилювача перед схемою інтегрування. Цей сигнал виведено на бічну панель профілографа як контрольна точка ПГ-3. Оскільки підсилювач побудовано на електронних лампах, анодні кола яких живляться напругою до 200 В, то сигнал необхідно змаштабувати (понижити) до прийнятних для входу АЦП 5 В.

Для цього використаємо найпростіший масштабний перетворювач резистивний подільник напруги. Принципова схема подільника напруги представлена на рисунку 3.2.

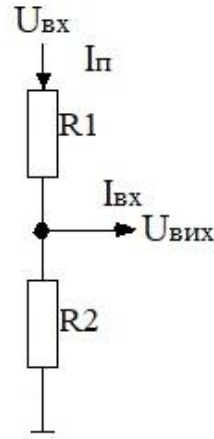


Рисунок 3.2 – Схема подільника напруги

Струм через подільник  $I_p$  повинен бути більшим за вхідний струм АЦП  $I_{вх}$  не менше як в 10 разів. Вхідний струм АЦП знайдемо за формулою (3.1) [13]:

$$I_{вх} = \frac{U_{вих}}{R_{вх}} = \frac{5}{127 \cdot 10^3} = 0,04 \text{ мА.} \quad (3.1)$$

Для мінімізації впливу подільника на АЦП та зовнішніх завад на подільник, стабільної роботи подільника, і з практичних міркувань приймаємо струм через подільник  $I_p = 2 \text{ мА}$ .

Розрахуємо загальний опір подільника за формулою (3.2) [13]:

$$R_n = \frac{U_{вих}}{I_n} = \frac{200}{2 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ кОм.} \quad (3.2)$$

Розрахуємо опір резистора R2 за формулою (3.3) [13]:

$$R_2 = \frac{U_{\text{вих}}}{I_n} = \frac{5}{2 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \text{ кОм}. \quad (3.3)$$

Значення опору  $R_1$  знайдем за виразом (3.4):

$$R_1 = R_{\text{п}} - R_2 = 100 - 2,5 = 97,5 \text{ кОм}. \quad (3.4)$$

Підберемо номінальні опори резисторів  $R_1$  та  $R_2$  відповідно до стандартного арифметичного ряду E24 (IEC 60063) [15, 16] і щоб загальний опір подільника не був меншим за розрахований для обмеження максимального струму. Приймаємо  $R_{1\text{н}} = 100 \text{ кОм}$  та  $R_{2\text{н}} = 2,2 \text{ кОм}$ .

Загальний опір подільника згідно формули (3.5) складе:

$$R_{\text{п}} = R_1 + R_2 = 100 + 2,2 = 102,2 \text{ кОм}. \quad (3.5)$$

Хоча номінальні опори відрізняються від розрахованих, точність вимірювання профілю поверхні буде забезпечена при калібруванні.

Профілограф і АЦП з'єднуємо двохжильним екранованим кабелем і подільник монтуємо безпосередньо на роз'ємі DB37 (рис. 3.3).

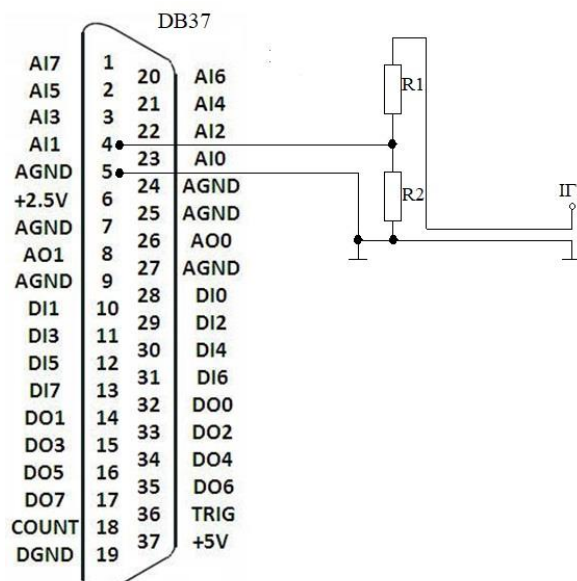


Рисунок 3.3 – Схема з'єднання профілографа

Для обробки сигналів з АЦП використовуємо програмне забезпечення для роботи з аналоговими вхідними сигналами АЦП USB-4702. Інтерфейс програми представлено на рисунку 3.4. На екрані одночасно зображено сигнали з усіх 8-ми входів.

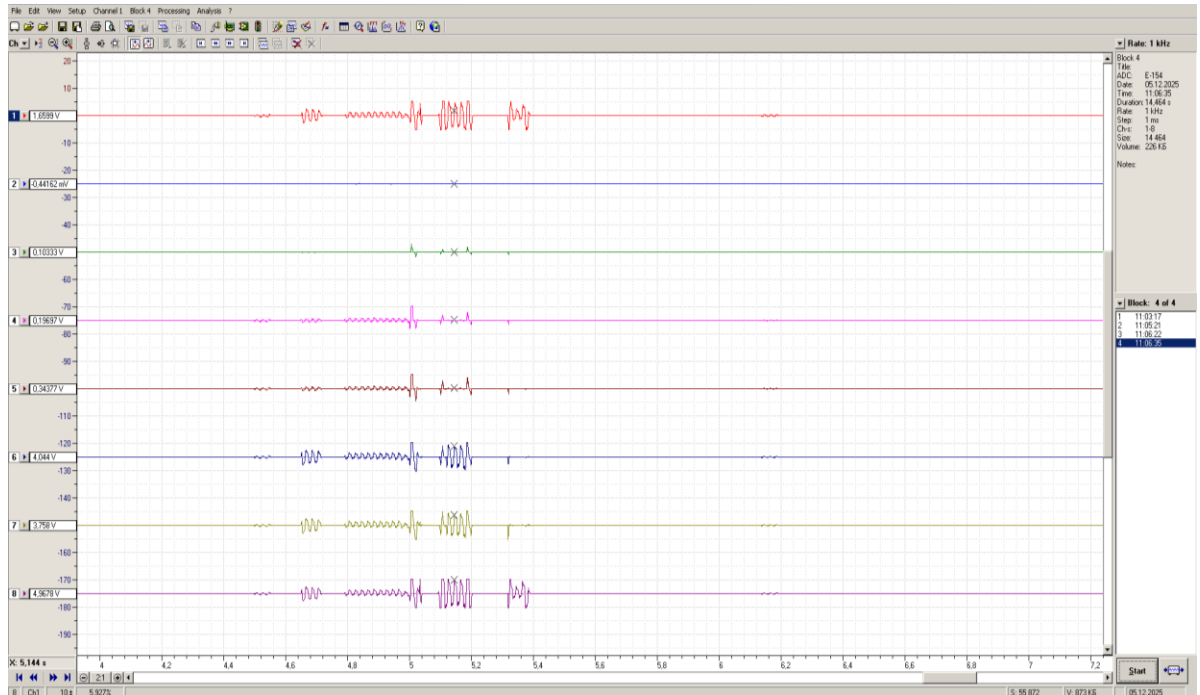


Рисунок 3.4 – Інтерфейс програми роботи з АЦП USB-4702

Використовуємо лише 1-й вхід, тому налаштуємо зовнішній інтерфейс (рис. 3.5).

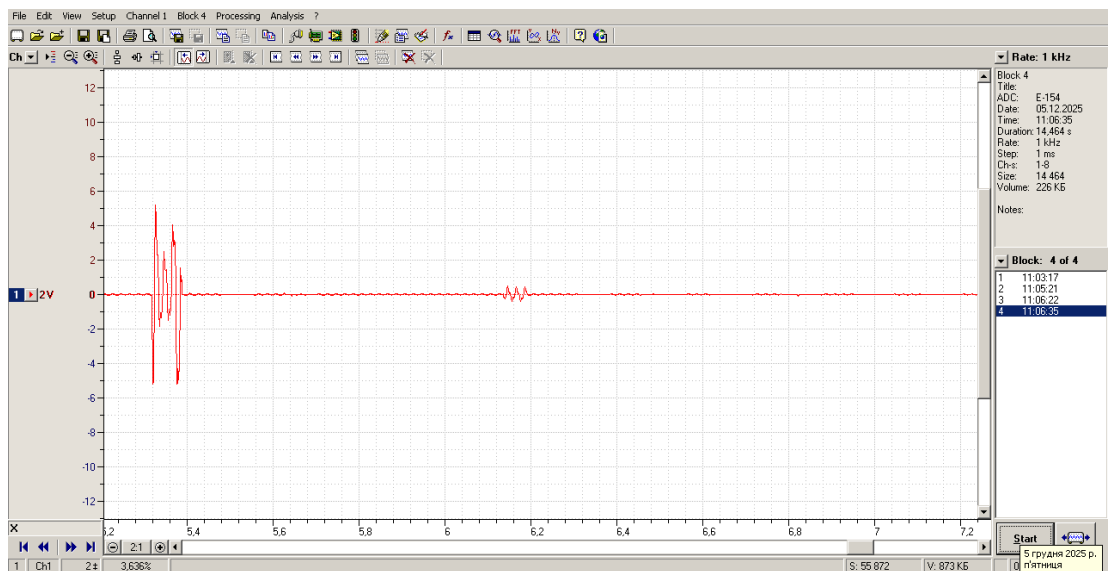


Рисунок 3.5 – Зовнішній інтерфейс програми

Для правильного відтворення профілограми та достовірності передачі інформації від профілометра до комп'ютера необхідно відкалібрувати вхідний підсилювач АЦП. Програма дозволяє зручно це зробити через налаштування. Вікно вхідний підсилювач (Input Amplifier) дозволяє проводити попередній моніторинг вхідного сигналу, вибрати діапазон вимірювання, використовувати програмне калібрування та корекцію вхідного сигналу, встановлювати коректні одиниці вимірювання. Для калібрування використовується кнопка та функція калібрування (calibration) поля помножити (Scale Data) та додати (Offset Data) якої дозволяють вводити програмні лінійні коефіцієнти перетворення вхідного сигналу за формулою (3.6) [14]:

$$Y=A \cdot X+B, \quad (3.6)$$

де  $X$  – значення на вході АЦП;

$Y$  – каліброване значення сигналу, що відображається на екрані і записується в програмі;

$A$  – лінійний коефіцієнт множення;

$B$  – лінійний коефіцієнт зміщення.

На практиці для визначення  $A$  і  $B$  виконують калібрувальні вимірювання, при цьому існує два основні способи калібрування [15]. Перший спосіб, реалізований по двох точках, коли для двох відомих значень реєстрованого параметра вимірюється значення напруги на вході АЦП. Тоді коефіцієнти  $A$  і  $B$  визначаються автоматично за формулами (3.7) та (3.8):

$$Y_1=A \cdot X_1+B. \quad (3.7)$$

$$Y_2=A \cdot X_2+B. \quad (3.8)$$

$Y_1$  та  $Y_2$  являють собою два різних вимірюваних сигнали, причому ( $Y_2 > Y_1$ ), а  $X_1$  та  $X_2$  відповідні сигнали напруги на вході АЦП (рис. 3.6).

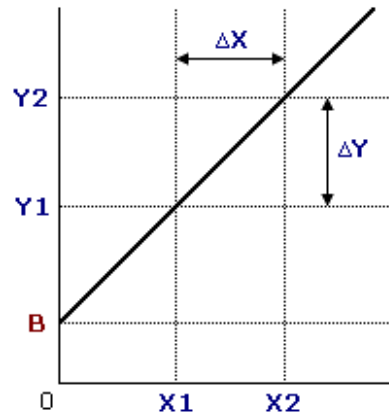


Рисунок 3.6 – Принцип калібрування АЦП профілометра [7]

Другий спосіб по одній точці та приросту, коли лінійний коефіцієнт множення  $A$  відомий і необхідно визначити лінійний коефіцієнт зміщення  $B$ . Цей спосіб використовується для різних давачів фізичних величин. Рисунок, який демонструє способи калібрування. Для нашого випадку використаємо перший спосіб. Використовуючи набір кінцевих мір довжини збираємо пристосування для калібрування (рис. 3.7).

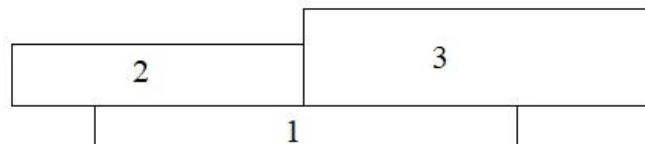


Рисунок 3.7 – Пристрій для калібрування:

1 – міра в якості основи; 2 – міра 1,00 мм; 3 – міра 1,001 мм

Пристрій для калібрування дає можливість отримати сходинку висотою 1 мкм. При знятті профілограми щуп при переході через сходинку буде змінювати вхідний сигнал з 0 мкм –  $X_1$  до 1 мкм –  $X_2$ . Ввівши відповідні виміряні значення напруги на вході АЦП, а саме  $Y_1$  та  $Y_2$  програма автоматично вираховує коефіцієнти  $A$  та  $B$ . Оскільки профілометр має режими роботи з масштабами  $\times 1000$  (рис. 3.8),  $\times 2000$ ,  $\times 4000$ ,  $\times 10000$ ,  $\times 40000$ ,  $\times 20000$ , то проводимо калібрування для кожного режиму і параметри калібрування зберігаємо як окремі налаштування (Save Settings).

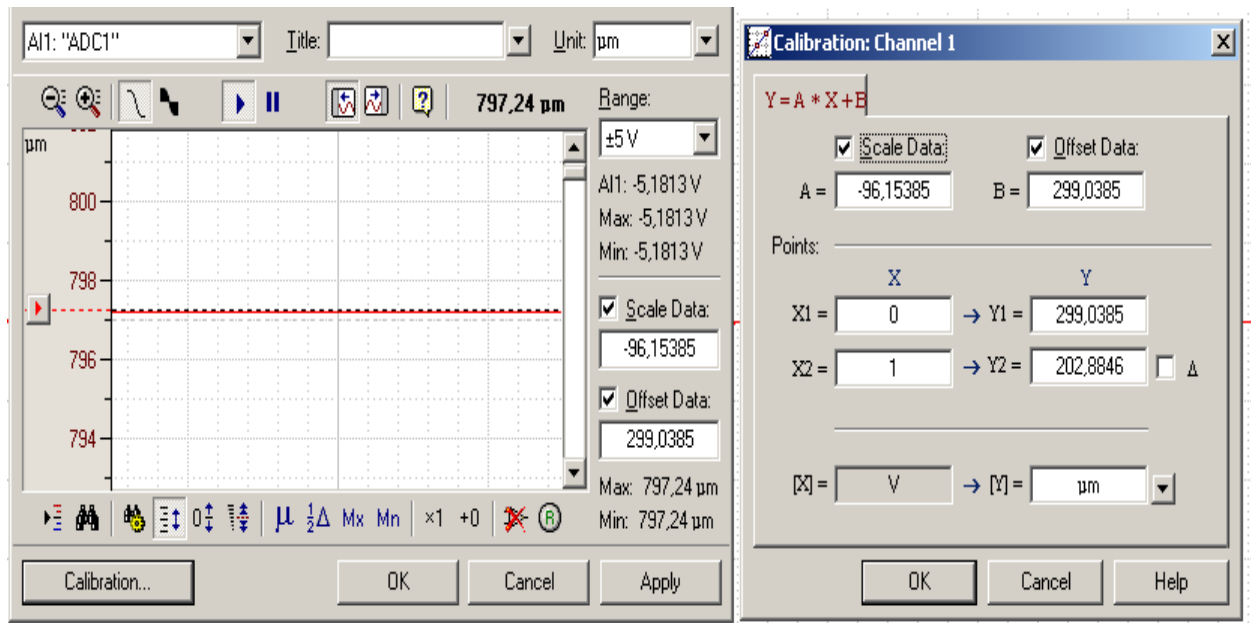


Рисунок 3.8 – Калібрування профілометра з масштабом x1000

Калібрування профілометра для режиму роботи з масштабами x2000 (рис. 3.9). Ці настроювання потім достатньо завантажити (Load Settings) при використанні конкретного режиму профілометра.

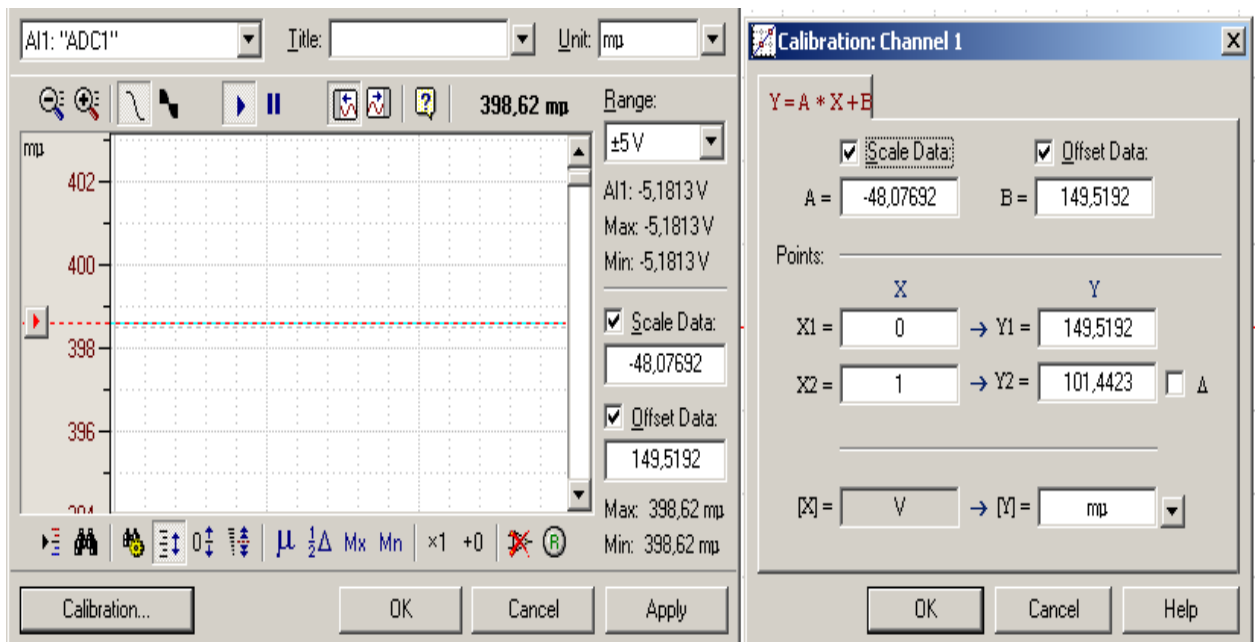


Рисунок 3.9 – Калібрування профілометра з масштабом x2000

Калібрування профілометра для режиму роботи з масштабами x4000 представлено на (рис. 3.10).

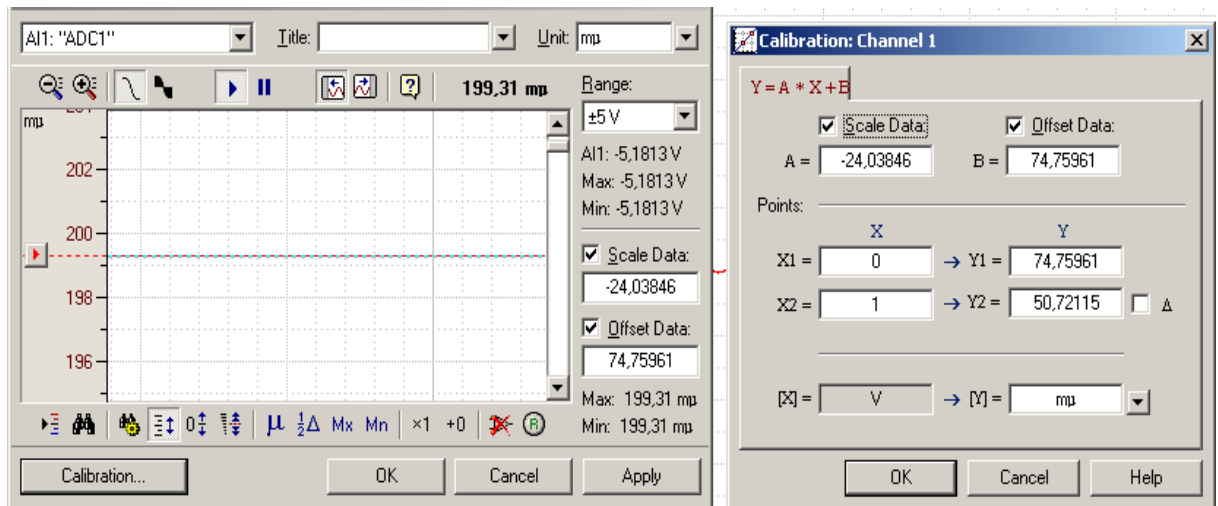


Рисунок 3.10 – Калібрування профілометра з масштабом x4000

Після проведення калібрування прилад готовий про проведення вимірювання шорсткості поверхонь та зняття профілограм для візуального відображення нерівностей поверхневого шару.

### 3.2. Зняття профілограм досліджуваних деталей та оцінка рівня шорсткості їх поверхонь

Проведемо дослідження шорсткості поверхні підшипникової сталі, а саме торцевої поверхні кільця підшипника кочення (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Дослідження шорсткості кільця підшипника

Після проведення реєстрації профіля поверхні деталі з використанням АЦП отримали профілограму поверхні торця кільця підшипника (рис. 3.12)



Рисунок 3.12 – Профілограма кільця підшипника

Оскільки на отриманій профілограмі присутні електромагнітні наведення, як фон мережі у вигляді дрібних зубців вздовж лінії тренду то їх доцільно прибрати. Програма роботи з АЦП дозволяє проводити математичну, статистичну та іншу обробку отриманих експериментальних даних. Після застосування до профілограми математичної високочастотної фільтрації отримаємо покращену профілограму поверхні (рис. 3.13).

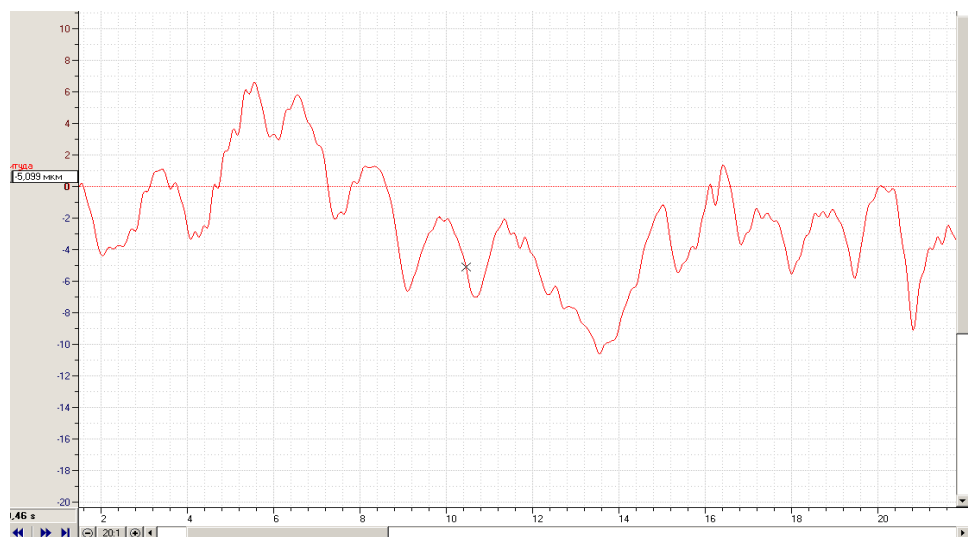


Рисунок 3.13 – Профілограма поверхні після фільтрації сигналу

На отриманій профілограмі масштаб по вертикалі відповідає висоті профіля у мкм. Тобто 1 клітинка відповідає величині в 1 мкм. Горизонтальна вісь є віссю часу у секундах оскільки це фактично осцилограма. Секунди цієї осі досить легко перевести у міліметри знаючи швидкість руху щупа за формулою (3.9) [16]:

$$L=V \cdot S/60, \quad (3.9)$$

де  $L$  – крок нерівностей у мм;

$V$  – швидкість руху щупа у мм/хв;

$S$  – час у секундах по горизонтальній осі.

Згідно формули (3.9) швидкість руху щупа склала 10 мм/хв.

Профілограма шорсткості для ролика підшипника наведена на рисунку 3.14.

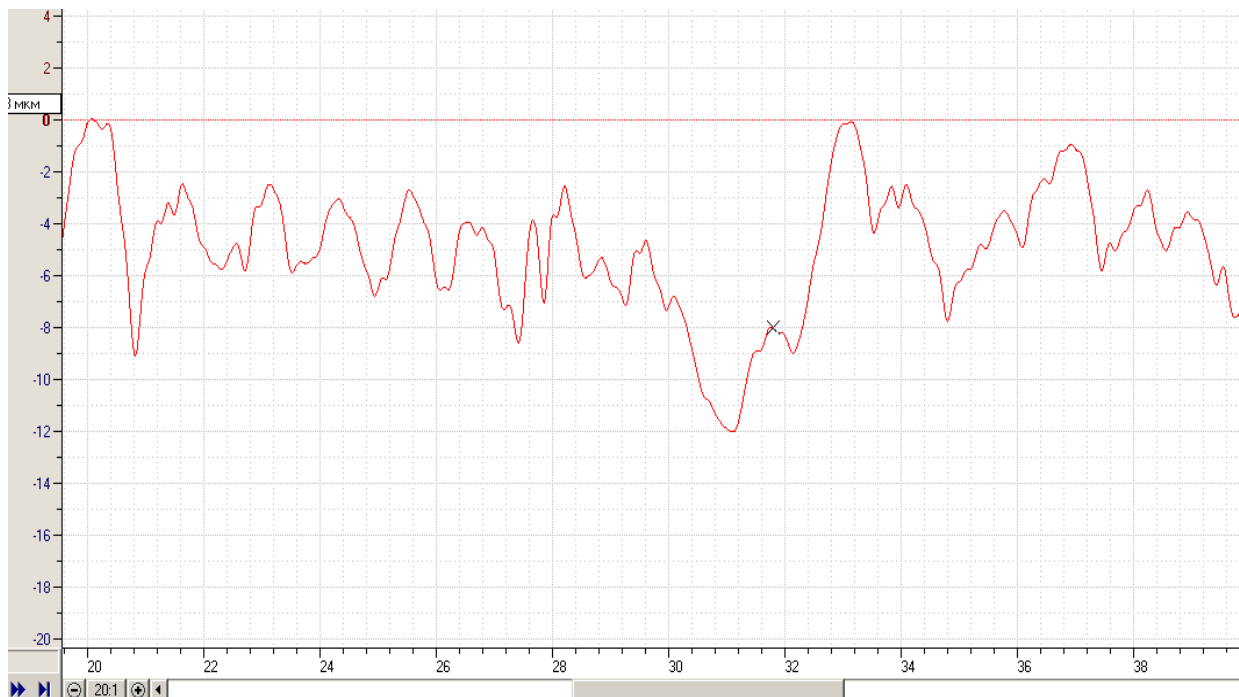


Рисунок 3.14 – Профілограма ролика підшипника

Профілограма шорсткості деталі типу втулка наведена на рисунку 3.15.

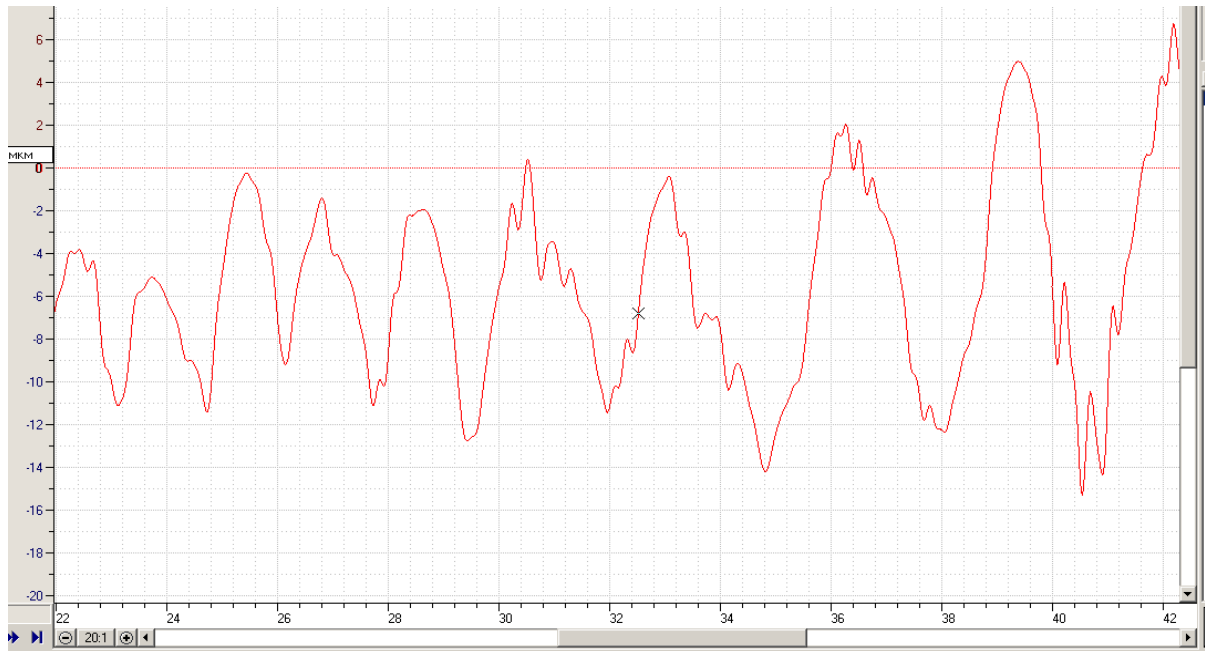


Рисунок 3.15 – Профілограма втулки

Оцифрування профілографів забезпечує підвищену точність, автоматизацію та об'єктивність вимірювань, дозволяє миттєво аналізувати дані, знижувати витрати на контроль якості, скорочувати час виробництва, працювати з різними матеріалами та інтегруватися в цифрові системи керування, що особливо актуально для сучасного машинобудування.

### Висновки до розділу 3

1. Оцифрування профілографів-профілометрів забезпечує підвищену точність, автоматизацію процесів вимірювання та об'єктивність їх проведення, дозволяє миттєво аналізувати отримані дані, знижувати витрати на контроль якості, скорочувати час виробництва, працювати з різними досліджуваними матеріалами та інтегруватися в цифрові системи керування, що особливо актуально для сучасного машинобудування та інших галузей, пов'язаних з використанням конструкційних матеріалів.

2. Підвищення точності щупових приладів дослідження мікронерівностей можна забезпечити їх калібруванням. Ця процедура є обов'язковою у випадку

використання аналого-цифрових перетворювачів для покращення функціональних можливостей таких приладів. Для калібрування модернізованого профілографа-профілометра обладнаного АЦП USB-4702 були використані кінцеві міри довжини для побудови калібрувального пристрою зі сходинкою в 1 мкм та проведено калібрування для кожного масштабованого режиму роботи приладу, що дало змогу забезпечити високу точність результатів досліджень мікронерівностей досліджуваних поверхонь.

3. Застосування програмного забезпечення для оцінки результатів профілометрії поверхонь відповідальних деталей дає можливість проведення якісного автоматизованого аналізу, візуалізації та інтерпретації даних вимірювань, що дозволяє точно визначати параметри досліджуваних поверхонь та забезпечувати прогнозовані властивості готових виробів, підвищувати їх надійність та довговічність.

## РОЗДІЛ 4

### СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Оптична та лазерна мікроскопія поверхні

Оптичні методи та засоби контролю величини шорсткості поверхні засновані на принципі безконтактного аналізу взаємодії світла з досліджуваною поверхнею та включають в себе методи світлового та тіньового перерізу, мікроінтерференцію та лазерну профілометрію, дозволяючи отримувати 3D-зображення поверхні з нанометровою точністю. Оптичні методи дослідження поверхонь особливо ефективні для аналізу тонких плівок, прецизійних деталей та в умовах, де контакт з досліджуваною поверхнею небажаний. Для знаходження величини шорсткості оптичним способом застосовуються прилади світлового перерізу типу МІС-11 і ПСС-2, мікроінтерферометри типу МП-4, МП-9, МП-11, МП-12, растрові вимірювальні мікроскопи типу ОРІМ-1 та інші. При виборі методу вимірювання та типу приладу необхідно враховувати відхилення контрольованого параметра, похибку засобу вимірювання, форму, розміри та матеріал деталі і інші впливові фактори. Найбільшого поширення дослідження поверхні з безконтактних методів набули метод світлового перерізу, тіньової проекції, растровий та мікроінтерференційний.

Принципова схема функціонування методу світлового перерізу наведена на рисунку 4.1 *a*. На даній схемі промінь світла від джерела 1 через вузьку щілину 2 та об'єктив 3 першого (проектуючого) мікроскопа проектується на вимірювану поверхню, яка має мікронерівності висотою  $h$ . У полі зору другого мікроскопа, вісь якого розташована під кутом  $90^\circ$  до осі проектуючого мікроскопа, зображення щілини матиме вигляд світлової сходинки, тому що від вимірюваної поверхні відбиваються два промені (від верхньої та нижньої частин шорсткості). Ці промені через об'єктив 4 і пластину зі шкалою 5 надходять в окуляр 6. Розмір світлової сходинки в окулярі є мірою висоти нерівності  $h$ . Принцип тіньової проекції являє собою видозмінений принцип

світлового січення, в якому границя між світлом та тінню створюється вістря меча. Подвійний мікроскоп МІС-11 (рис. 4.1 б) застосовується для вимірювання шорсткості за параметром  $R_z$  величиною від 1.6 до 80 з точністю  $\pm 5\%$ . Межі вимірювань визначаються вибором об'єктивів.

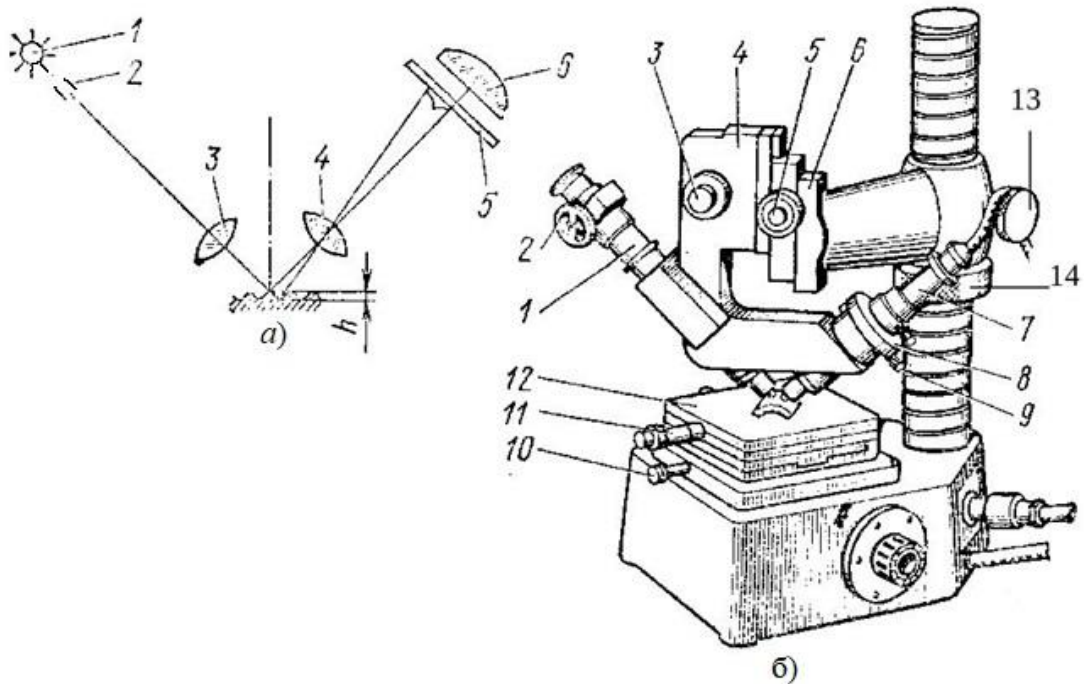


Рисунок 4.1 – Подвійний мікроскоп МІС-11 [12]:

1 – мікроскоп; 2 – мікрометр; 3 – фокусуєча лінза; 4 – корпус; 5 – маховик;  
6 – кронштейн; 7 – тубус освітлювальний; 8 – кільцевий регулятор ширини щілини; 9 – регулювальний гвинт зображення щілини; 10 та 11 – гвинти переміщення столика; 12 – столик

Подвійний вимірювальний мікроскоп типу МІС-11 має освітлювальний тубус 7 і мікроскоп 1 закріплений в корпусі 4 приладу. Салазкі корпусу переміщуються по кронштейну 6 за допомогою маховика 5 для забезпечення попередньої установки різкості. Точне фокусування зображення здійснюється мікроподачею 3. Гвинтом 9 отримане зображення щілини переводять на середину поля зору окуляра. За допомогою кільця 8 проводиться регулювання ширини щілини. Вимірювання шорсткості проводять окулярним мікрометром

2. Переміщення столика 12 відбувається за допомогою гвинта 10 у горизонтальній площині при послабленому гвинті 11.

При мікроінтерференційному методі вимірювання шорсткості досліджувана поверхня розглядається в мікроскопі та одночасно на отримане зображення поверхні накладаються інтерференційні смуги, що призводить до його викривлення залежно від шорсткості поверхні. За характером викривлення інтерференційних смуг визначають висоту мікронерівностей. Інтерференційний мікроскоп МП-4 (рис. 4.2) застосовується для візуальної оцінки, вимірювання та фотографування висоти нерівностей зовнішніх поверхонь деталей. Межі вимірювань приладом за параметрами  $R_z$  та  $R_{max}$  складають від 0,8 до 0,1 мкм. В основу роботи на цьому приладі закладено явище інтерференції, яке утворюється в результаті складання світлових променів, відбитих від вимірюваної поверхні та від гладкого дзеркала.

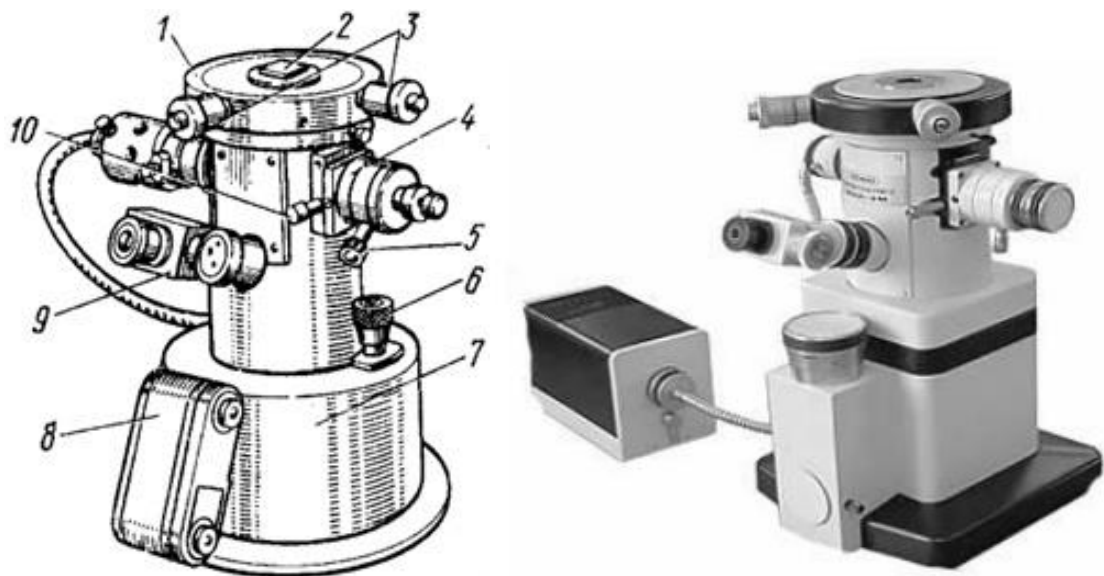


Рисунок 4.2 – Інтерференційний мікроскоп МП-4 [12]:

1 – столик; 2 – деталь; 3 – гвинти поздовжнього та поперечного переміщення; 4 – корпус; 5 та 6 – регулювальні гвинти; 7 – основа; 8 – камера для фотографування; 9 – окулярний мікрометр; 10 – головка

Оптична профілометрія рельєфу і шорсткості поверхні показує її хвилястість та нерівність, на відміну від профілометра. Такі пристрої

використовуються в науці та виробництві (машинобудуванні, мікроелектроніці, матеріалознавстві) для контролю якості та вивчення властивостей матеріалів.

У зв'язку зі швидким розвитком цифрових технологій оптичні безконтактні методи дослідження все частіше замінюють контактні. Для завдань профілометрії наявна достатня кількість рішень, заснованих на мікроскопах, оснащених цифровими сенсорами і здатними за короткий проміжок часу побудувати 3-мірне зображення поверхні безконтактно, в той же час забезпечуючи високу точність. Такі прилади передбачають системи інтерферометрії та конфокальної мікроскопії. Обидві системи забезпечують високу точність досліджень, фіксуючи відхилення рівності поверхонь від міліметрів до нанометрів. На відміну від систем, побудованих на основі скануючого лазера, в мікроскопі немає рухомих частин, що забезпечує стабільність зображення і ефективність розподілу світла, а також підвищує надійність і гнучкість системи. Завдяки використанню світлодіодів вдалося значно підвищити термін служби приладу, зводячи до мінімуму необхідність сервісного обслуговування та відсутності дорогих комплектуючих. Технологія оптичної мікроскопії Leica має неймовірну швидкодію та інтуїтивність в управлінні приладом. Отримання зображення займає лише кілька секунд. Прикладом такої технології є оптичний мікроскоп Leica DCM8 (рис. 4.3),



Рисунок 4.3 – Оптичний мікроскоп Leica DCM8 [17]

Прилад Leica DCM8 дозволяє проводити вимірювання зразків безконтактно та не пошкоджуючи їх, що зменшує меншує час підготовки зразків, а в деяких випадках дозволяє вивчити зразки у їхньому первинному вигляді.

Оптичні прилади, наприклад скануючий лазерний конфокальний мікроскоп, забезпечують можливість швидко формувати 3D зображення щодо великих зразків з високою роздільною здатністю. Неруйнівний метод вимірювань, який використовується в цих приладах, також дозволяє досліджувати шорсткість поверхні з порожнинами, які дуже складно вимірюються ручним профілометром. На 3D зображенні можна швидко знайти потрібну ділянку дослідження і точно визначити, в якому місці отримано конкретні дані. Завдяки цим перевагам значно зменшується час вимірювань та підвищується точність при роботі з дрібними зразками та мікроскопічними елементами.

Лазерна мікроскопія поверхні, в основному конфокальна лазерна скануюча мікроскопія (КЛСМ) є методом отримання високоякісних 3D зображень і точних профілів поверхні, які використовує лазерний промінь для сканування та дозволяє створювати оптичні зрізи і регулювати об'єм, візуалізацію при дослідженні напівпровідників та металів, що є актуальним завданням сучасного матеріалознавства. Залежно від джерела світла, яке застосовується в приладах, існують різні види конфокальної мікроскопії. Конфокальна мікроскопія може виконуватися з використанням лазера як джерело світла або без нього. У конфокальному мікроскопі може застосовуватись ртутна лампа або лазерний промінь певної довжини хвилі. Крім того, розрізняють флюоресцентну та відбивну КЛСМ. Завдяки своїй безпеці та неінвазивності відбивна КЛСМ є кращою у використанні [18]. Основний принцип відбивної КЛСМ заснований на використанні точкового джерела світла (лазерний промінь), який висвітлює маленьку ділянку з наступним вловлюванням відбитого світла через оптично з'єднану апертуру (рис. 4.4).

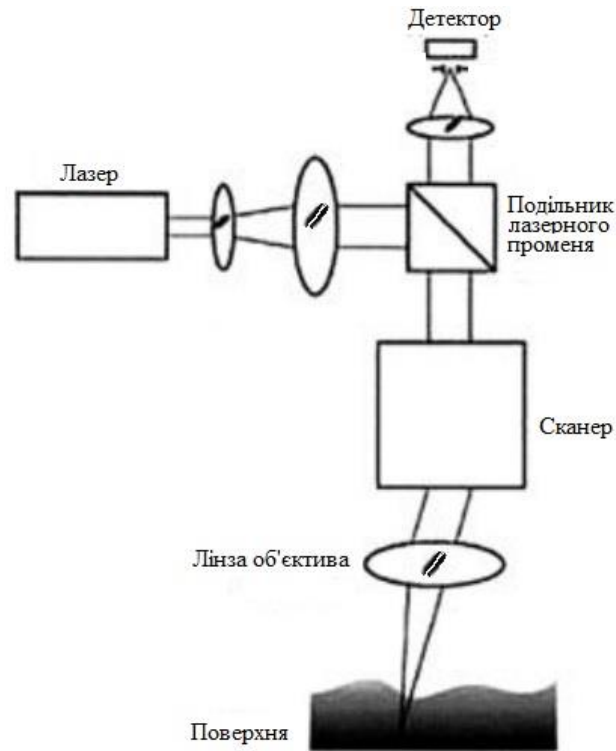


Рисунок 4.4 – Принцип роботи конфокальної лазерної скануючої мікроскопії [18]

Відбите світло проходить через вкраплення, в результаті чого тільки світло, що знаходиться у фокусі, досягає детектора, в той час як світло поза фокусом відхиляється. Числова апертура лінзи об'єктива, довжина хвилі та розмір відкритої апертури (вкраплення) визначають роздільну здатність зображення, одержуваного за допомогою відбивної КЛСМ. Лазери різних довжин хвиль можуть бути використані як джерело світла для конфокальної мікроскопії. Більш довгі, близькі до інфрачервоних, довжини хвиль проникають глибше, але дають нижчу роздільну здатність порівняно з короткими довжинами хвиль видимого спектру. Відображення світла виникає внаслідок місцевих відмінностей у коефіцієнті заломлення.

Визначення параметрів шорсткості поверхонь оптично-непрозорих деталей виконується методом спекл-структур із застосуванням спіральних пучків (рис. 4.5). Спекл-структура являє собою випадковий візерунок із світлих (спекли) та темних плям, який виникає внаслідок інтерференції когерентних

хвиль (наприклад, лазерного світла), які відбиваються від шорсткої поверхні об'єкта або проходять крізь неоднорідне середовище, і широко використовується в неруйнівному контролі та вимірюваннях для визначення мікронерівностей [14].

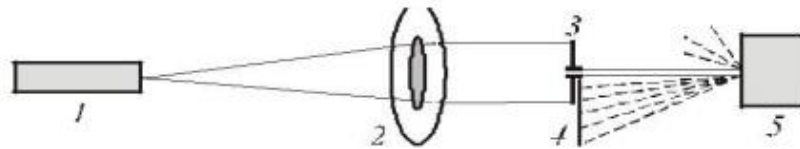


Рисунок 4.5 – Схема установки дослідження шорсткості непрозорих матеріалів [18]:

1 – лазер ГН-40; 2 – обмежувач; 3 – діафрагма; 4 – ПЗЗ матриця;  
5 – контрольований об'єкт

Як джерело когерентного випромінювання застосовується He-Ne лазер ГН-40 з довжиною хвилі  $\lambda=630$  нм і потужністю 40 мВт (або лазерний діод з близькими параметрами). Реєструючим елементом виступає ПЗЗ матриця з роздільною здатністю 640x480 пікселів. Визначення шорсткості поверхні може виконуватися за допомогою поля напрямів (рис. 4.6).

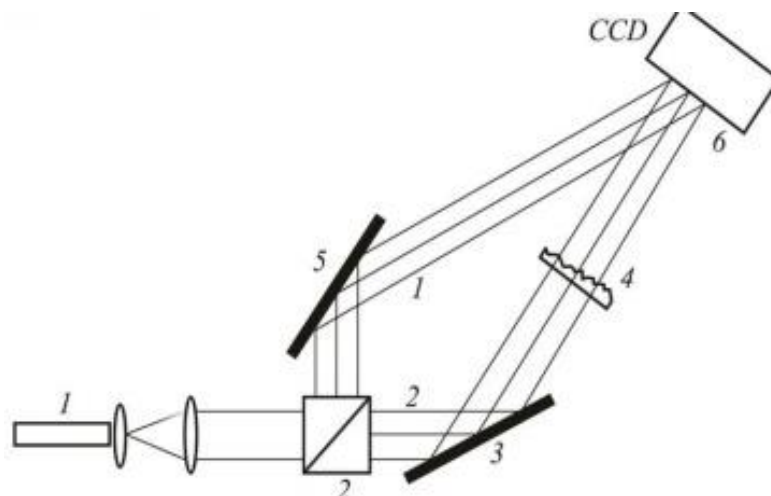


Рисунок 4.6 – Схема лазерної установки дослідження шорсткості [18]:

1 – лазерний промінь; 2 – оптичний куб; 3 та 5 – дзеркало;  
4 – оптичний елемент; 6 – камера

При використанні зондованого хвильового фронту похибка вимірювання параметрів шорсткості складає 0,03 мкм [8]. Промінь лазера 1 розділяється оптичним кубом 2, після чого цей промінь відбивається від дзеркала 3 і проходячи через випробуваний прозорий зразок, реєструється CCD камерою, а промінь 1 – опорний пучок відбивається від дзеркала 5 і потрапляє на чутливий елемент CCD камери. Відстань між елементом (4) і чутливим елементом CCD камери складає 6 см, довжина хвилі лазера рівна 633 нм, максимальна величина шорсткості на поверхні визначається за формулою (4.1) [16]:

$$h_{\max}=1,52 \cdot \lambda \cdot (n_2-n_1), \quad (4.1)$$

де  $n_2$  – показник заломлення зразка;

$n_1$  – показник заломлення навколишнього середовища.

Перетворення Фур'є, що використовується при обробці інтерференційних сигналів, має недостатню інформативність при аналізі нестационарних сигналів, а також не дозволяє аналізувати їх особливості і для дослідження та обробки потрібні методи, які дозволяють визначати локальні особливості просторово-частотних характеристик інтерференційних смуг. Таким методом може бути вейвлет перетворення [14]. Блок схема вейвлету обробки інтерферограми представлена на рисунку 4.7.

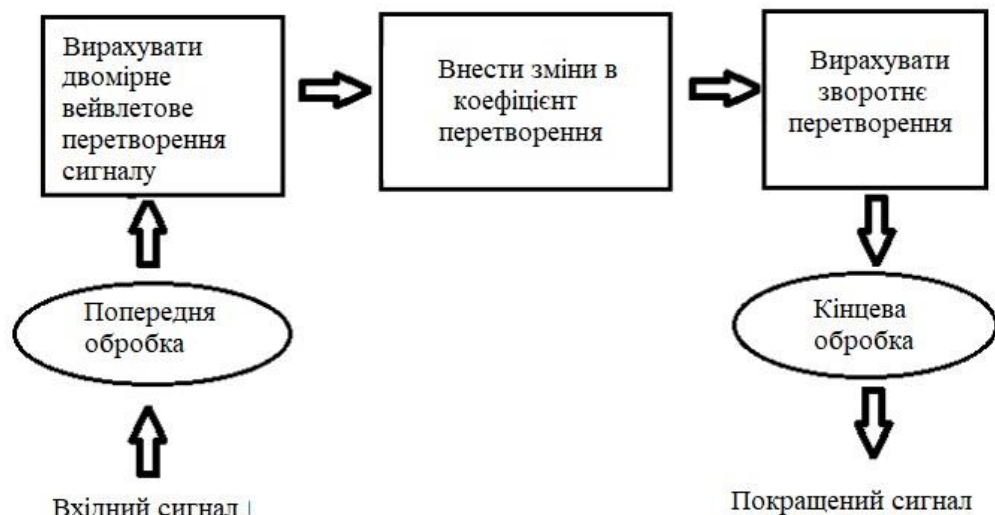


Рисунок 4.7 – Блок схема вейвлет обробки інтерферограми

На рисунку 4.8 представлена обробка зашумленого сигналу двовимірним вейвлет перетворенням в середовищі MatLab.

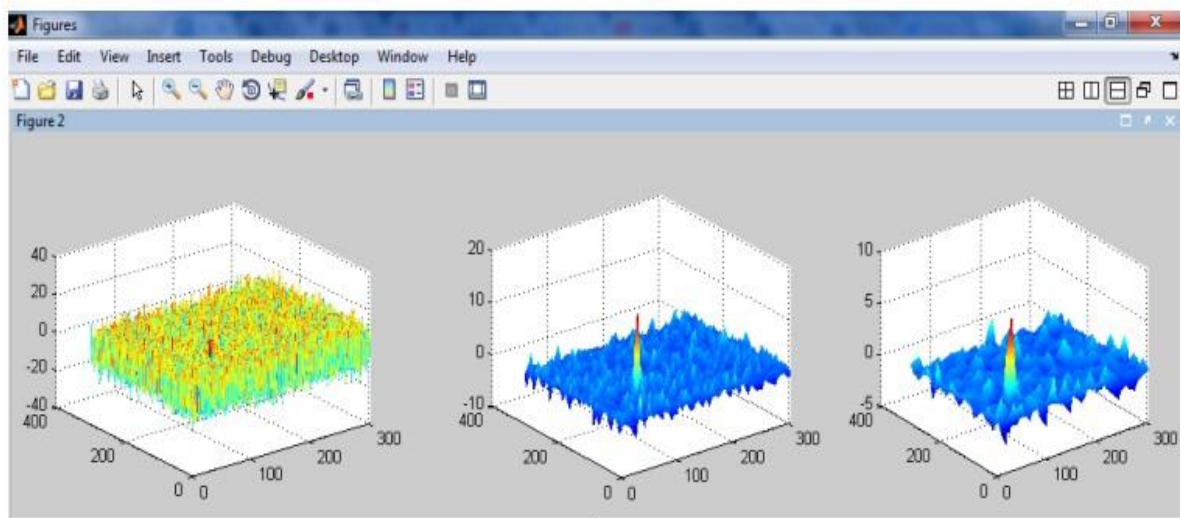


Рисунок 4.8 – Комп'ютерний вигляд обробки сигналу

Двовимірне вейвлет перетворення добре вирішує завдання виділення корисного сигналу у разі складної картини інтерференційних смуг, покращує співвідношення сигнал/шум та зменшує розмитість зображення.

## 4.2. Скануюча зондова мікроскопія

Скануючі зондові мікроскопи являють собою клас приладів, призначених для дослідження поверхні зразка та її локальних характеристик. Процес побудови зображення поверхні заснований на скануванні рельєфу поверхні матеріалу зразка спеціальним надтонким зондом у вигляді голки, при цьому забезпечується стала відстань між зондом та поверхнею зразка. Комп'ютер проводить реєстрування величини вертикального переміщення зонда над кожною точкою досліджуваної поверхні, після чого відбувається обчислення та відображення на моніторі тривимірного зображення поверхні з роздільною здатністю величиною в одиниці нанометра.

Залежно від використаного фізичного способу, яким забезпечується підтримання незмінної відстані між зондом і досліджуваним зразком, зондові

скануючі мікроскопи поділяються на тунельні мікроскопи (рис. 4.9) і атомно-силові мікроскопи.

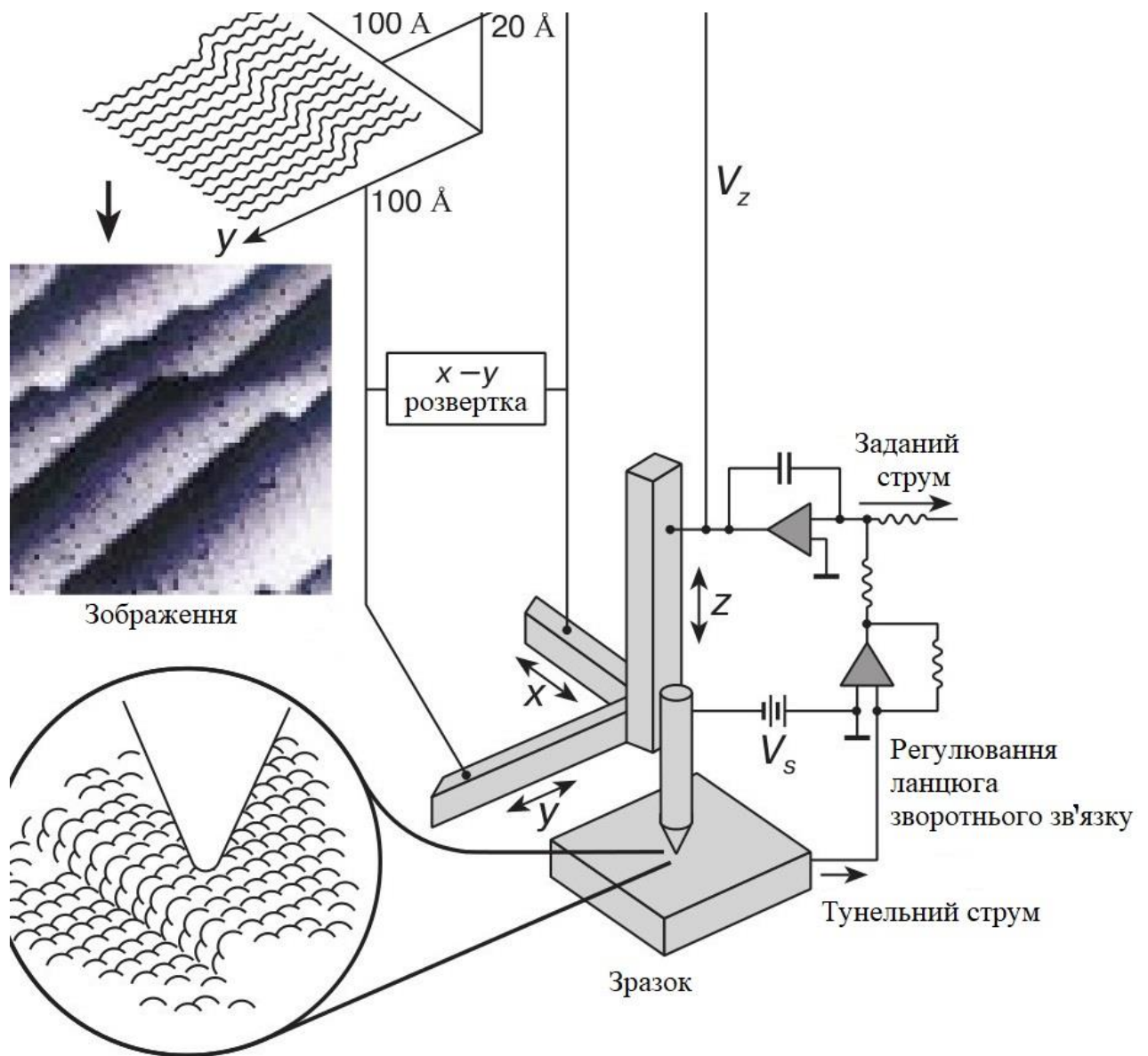


Рисунок 4.9 – Тунельний зондовий мікроскоп [19]

У скануючих зондових мікроскопах дослідження мікрорельєфу поверхні виробів та її локальних властивостей проводиться з використанням зондів у вигляді голки. Робоча частина таких зондів (вістря) має розміри близько десяти нанометрів. Характерна відстань між зондом та поверхнею зразків у зондових мікроскопах по порядку величин становить від 0,1 до 10 нм. В основі роботи зондових мікроскопів лежать різні типи взаємодії зонда з поверхнею. Так, робота тунельного мікроскопа заснована на явищі перебігу тунельного струму

між металевою голкою і зразком. Різні типи силової взаємодії лежать в основі атомно-силової, магніто-силової та електросилової мікроскопії поверхонь. Взаємодія зонда з поверхнею виробу характеризується деяким параметром  $P$  (у контактному методі це вигин пружної балки, яким є кантилівер з голкою на його кінці. При досить різкій і однозначній залежності  $P$  від відстані зонд – зразок даний параметр використовується для організації системи зворотного зв'язку (ЗВ), який контролює відстань між зондом і зразком (рис. 4.10).

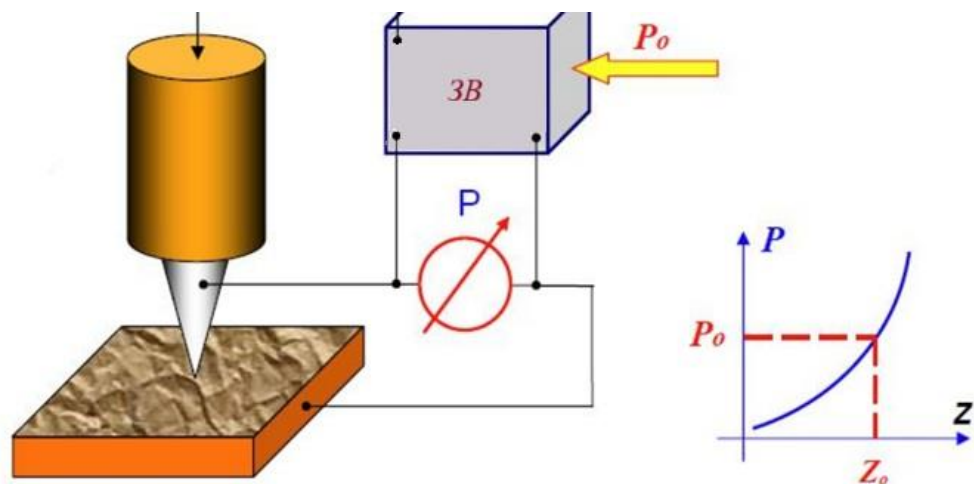


Рисунок 4.10 – Схема організації системи зворотнього зв'язку зондового мікроскопа [20]

Для підтримки заданої відстані між зондом та зразком у системах скануючої зондової мікроскопії найчастіше використовують пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, тобто виконуючий пристрій у керуючому контурі зі зворотним зв'язком.

Чим більший коефіцієнт пропорційності між вихідним та вхідним сигналами, тим менша статична похибка, але при занадто великому коефіцієнті посилення і при наявності затримок у системі можуть розпочатися автоколивання, а при подальшому збільшенні коефіцієнта посилення система може втратити стійкість.

В атомно-силовій мікроскопії, залежно від режиму та методики сканування, вхідним параметром системи зворотного зв'язку може бути

деформація, амплітуда чи частота коливань чутливого елемента (балки кантилевера), а вихідним – напруга переміщення зонда або зразка.

Конструкція атомно-силового мікроскопа наведена на рисунку 4.11 [20].

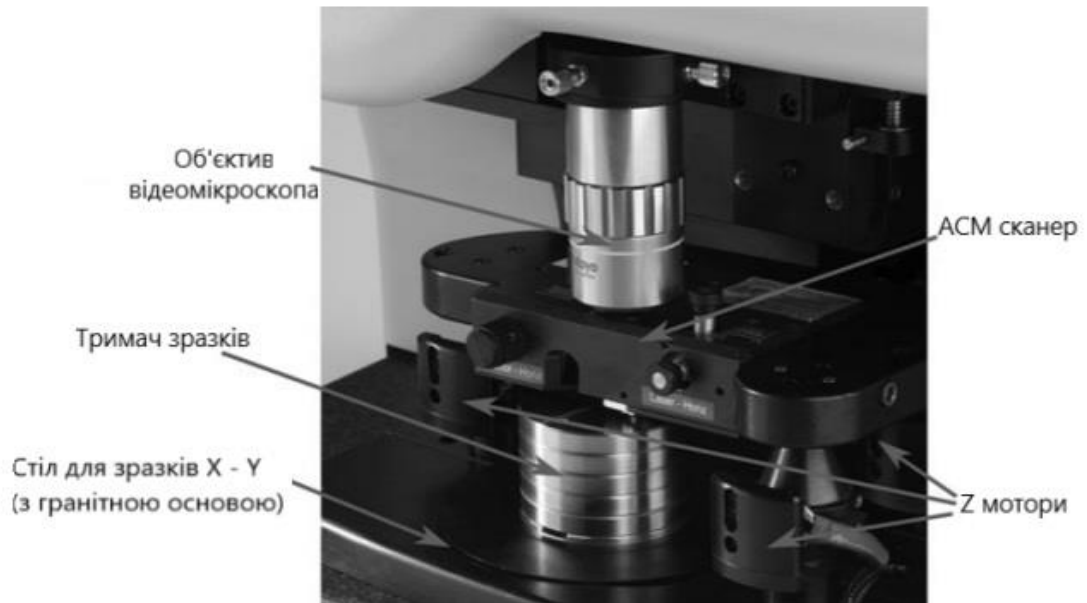


Рисунок 4.11 – Конструкція атомно-силового мікроскопа [20]

Атомно-силові мікроскопи застосовується досить широко для отримання зображень поверхонь з найвищою роздільною здатністю (атомарного), вимірювання їх топографії, шорсткості та локальних властивостей з точністю, недоступною для оптичних або навіть електронних мікроскопів.

## Висновки до розділу 4

1. Оптичні вимірювальні засоби контролю стану поверхні та рівня її шорсткості відносяться до безконтактних засобів вимірювання та мають ряд переваг перед контактними приладами профілометрії. Оптичні засоби діагностики стану поверхні не пошкоджують саму поверхню, зберігаючи її початковий стан та забезпечують високу швидкість процесу вимірювання, можуть працювати з важкодоступними ділянками матеріалу, дають більш повну інформацію про мікрорельєф поверхні зразка, а також дозволяють проводити контроль навіть дуже гладких і делікатних поверхонь, що є досить актуальним при дослідженні властивостей матеріалів мікроелектроніки.

2. Лазерна мікроскопія поверхні, зокрема конфокальна лазерна скануюча мікроскопія є методом отримання високоякісних 3D зображень і точних профілів поверхні, які використовує лазерний промінь для сканування та дозволяє створювати оптичні зрізи, візуалізацію при дослідженні напівпровідників та металів, що є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

3. Атомно-силова мікроскопія поверхні матеріалів для контролю рівня шорсткості поверхні забезпечує високу точність на рівні нанометрів та нижче, реалізує тривимірне зображення рельєфу поверхні в реальному часі, дає можливість проведення аналізу мікрооб'єктів, неруйнівний контроль та роботу з широким спектром матеріалів та значно перевершує контактні методи та засоби профілометрії при проведенні наукових і промислових вимірювань. Атомно-силові мікроскопи володіють надвисокою роздільною здатністю та забезпечують вимірювання з точністю, недоступною для оптичних та електронних мікроскопів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз методів дослідження мікрогеометрії поверхонь залізовуглецевих сплавів. Дослідження шорсткості поверхонь можливо різними способами, такими як профілографічний, еліпсометричний, інтерферометричний, растрово-електронної та атомно-силової мікроскопії. Вибір методу необхідно узгоджувати з точністю та діапазоном досліджуваних значень мікронерівностей. У випадках дослідження шорсткості поверхні від 1 мкм доцільно застосовувати профілографічний метод, який забезпечує хороші результати з можливістю автоматичної обробки результатів та менш складний у застосуванні на практиці. Для підвищення ефективності процесу вимірювання шорсткості поверхонь профілометрами необхідно оптимізувати процес налаштування приладу, використовувати високошвидкісні режими, проводити статистичну обробку даних і попередню підготовку поверхні. Використовувати багатоточковий аналіз для підвищення точності та звертати увагу на застосування автоматизованих систем для прискорення отримання та обробки результатів вимірювань.

2. Проведено розроблення комп'ютеризованої вимірювальної системи для оцінки стану шорсткості поверхні матеріалу на основі профілографа-профілометра моделі 252. Застосування програмного забезпечення для оцінки результатів профілометрії поверхонь відповідальних деталей дало можливість проведення якісного автоматизованого аналізу, візуалізації та інтерпретації даних вимірювань та дозволило точно визначати параметри досліджуваних поверхонь та забезпечувати прогнозовані властивості готових виробів, підвищувати їх надійність та довговічність.

3. Проведено калібрування вимірювального обладнання для покращення точності вимірювання шорсткості поверхонь виробів. Ця процедура є обов'язковою у випадку використання аналого-цифрових перетворювачів для покращення функціональних можливостей профілометрів. Для калібрування модернізованого профілографа-профілометра обладнаного АЦП USB-4702

були використані кінцеві міри довжини для побудови калібрувального пристрою зі сходинкою в 1 мкм та проведено калібрування для кожного масштабованого режиму роботи приладу, що дало змогу забезпечити високу точність результатів досліджень мікронерівностей досліджуваних поверхонь.

4. Отримано профілограми дослідних зразків на профілографі-профілометрі 252 в цифровій формі. Оцифрування профілографів-профілометрів забезпечило підвищення точності, автоматизацію процесів вимірювання та об'єктивність їх проведення, дозволило миттєво аналізувати отримані дані, що особливо актуально для сучасного машинобудування та інших галузей, пов'язаних з використанням конструкційних матеріалів.

5. Проведено дослідження методів діагностики стану шорсткості поверхні методами безконтактної профілометрії. Безконтактні методи вимірювання шорсткості поверхонь мають ряд переваг, оскільки не пошкоджують поверхню (не залишають подряпин, як щупи), високошвидкісні (особливо оптичні та лазерні), дозволяють проводити вимірювання у важкодоступних місцях і на чутливих та м'яких матеріалах, а також забезпечують високу точність.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сьох О. М., Пташенчук В. В. Формування та дослідження мікрогеометрії торців кілець підшипників. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матер. VI-ї Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Луцьк, 23-25 жовт. 2024 р.). Луцьк: ВІП ЛНТУ, 2024. С. 114-115.
2. Новіков Ф. В. Оптимальні рішення в технологіях механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 360 с
3. Аналіз методів контролю шорсткості поверхні деталей. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/3db263bb-abe8-4d21-b3fc-3bb4178afa87/content> (дата звернення: 10.09.2025).
4. Засоби контролю шорсткості поверхні. URL: [https://obrobka.pp.ua/646-zasobi-vimryuvannya-shorstkost-poverhn.html#google\\_vignette](https://obrobka.pp.ua/646-zasobi-vimryuvannya-shorstkost-poverhn.html#google_vignette) (дата звернення: 12.09.2025).
5. Підвищення ефективності оброблення торців кілець роликопідшипників методом переривчастого шліфування : монографія / Пташенчук В. В. та інші. Луцьк : Вежа-Друк. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=mU-xkLcAAAAJ&citation\\_for\\_view=mU-xkLcAAAAJ:qjMakFHDy7sC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=mU-xkLcAAAAJ&citation_for_view=mU-xkLcAAAAJ:qjMakFHDy7sC) (дата звернення: 14.09.2025).
6. Дослідження впливу режимів різання на шорсткість обробленої поверхні при токарній обробці. URL: <https://studfile.net/preview/9972322/> (дата звернення: 16.09.2025).
7. Защепкіна Н. М. Метрологія : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.
8. Контроль і вимірювання шорсткості. URL: <https://studfile.net/preview/7678719/page:13/> (дата звернення: 18.09.2025).
9. Спектрально-кутова еліпсометрія в режимі відбивання світла для визначення оптичних параметрів і товщини плівок в багатошарових системах та об'ємних матеріалах. URL: <https://academcity.org.ua/services/rd-to->

order/Spectral-angle-ellipsometry-in-the-light-reflection-mode/ (дата звернення: 21.09.2025).

10. Загородній В. В. Локальні методи досліджень : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 323 с.

11. Призначення і принцип дії мікроінтерферометра МІІ-4. URL: <https://studfile.net/preview/9728999/page:6/> (дата звернення: 25.09.2025).

12. Обробка та аналіз зображень у скануючій зондовій мікроскопії: ключові аспекти та рецепти. URL: <https://www.ntmdt-si.com/resources/webinars/image-processing-and-analysis-in-scanning-probe-microscopy> (дата звернення 10.05.2025).

13. Шейкіна Н. В., Баранник М. О., Вельма С. В. Електротехніка та основи електроніки : навчальний посібник . Харків : НФаУ, 2024. 110 с.

14. Аналого-цифровий перетворювач АЦП USB-4702. URL: <https://www.proxis.ua/uk/product/usb-multifunctional-IO-module-advantech-USB-4702/> (дата звернення: 25.09.2025).

15. Опори та резистори. URL: <https://radio1ech.blogspot.com/2022/05/6.html> (дата звернення: 12.11.2025).

16. ДСТУ EN 60063:2022. Резистори та конденсатори. Ряди преференційних чисел (EN 60063:2015, IDT; IEC 60063:2015, IDT). [Чинний від 31.12.2023].

17. Система оптичної 3D-профілометрії Leica DCM. URL:<https://alt.ua/products/sistema-optichnoyi-3d-profilometriyi-leica-dcm> (дата звернення: 23.11.2025).

18. Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Зайцева Л. В. Методи дослідження структури тонких плівок: підручник. Харків : ФОП Бровін О. В., 2021. 320 с.

19. Скануючий тунельний мікроскоп. URL: <http://vseosvita.ua/library/embed/01002swo-2295.docx.html> (дата звернення: 25.11.2025).

20. Методи скануючої зондової мікроскопії для дослідження структури і морфології функціональних наномірних матеріалів. URL:

<https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/d5121ecf-1a4d-4de8-8e78-a936147c4bd3/content> (дата звернення: 27.11.2025).