

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Прилад для визначення середньозваженої твердості гетерогенних сплавів».

Обсяг кваліфікаційної роботи: пояснювальна записка – 67 аркуші формату А4, додатки – 7 аркушів формату А4, графічний матеріал – 4 аркуші формату А4.

Ключові слова: СЕРЕДНЬОЗВАЖЕНА ТВЕРДІСТЬ, ГЕТЕРОГЕННІ СПЛАВИ, ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ СКЛЕРОМЕТР, КІНЕМАТИЧНЕ ІНДЕНТУВАННЯ, LVDT-ДАВАЧ, МІКРОКОНТРОЛЕР, МЕРЕЖІ ПЕТРІ, ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

Метою роботи є підвищення точності, достовірності та продуктивності вимірювання макроскопічної (середньозваженої) твердості структурно-неоднорідних матеріалів шляхом автоматизації процесу диференціальної склерометрії.

У роботі проведено аналіз існуючих методів неруйнівного контролю та засобів вимірювання механічних властивостей матеріалів, обґрунтовано вибір конструктивних елементів механічного приводу та прецизійного LVDT-давача Solartron із сигнальним кондиціонером AD598. Виконано кінематичні та силові розрахунки елементів каретки приладу, а також розраховано параметри аналого-цифрового тракту на базі мікроконтролера STM32. Побудовано математичну модель функціонування вимірювального циклу склерометра з використанням апарату стохастичних часових мереж Петрі. Досліджено точність вимірювань та оцінено методичні й інструментальні похибки системи.

Розроблений прилад забезпечує автоматизацію процесу експрес-контролю, цифрове відфільтровування структурних завад у реальному часі та повне усунення суб'єктивного фактора оператора, що суттєво підвищує достовірність оцінки зносостійкості багатофазних сплавів. Отримані

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результати можуть бути впроваджені на машинобудівних та приладобудівних підприємствах для оперативного контролю якості деталей.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Зміст	3
Вступ.....	5
1 Аналітичний огляд методів та засобів вимірювання твердості гетерогенних сплавів	7
1.1 Постановка проблеми контролю механічних властивостей структурно-неоднорідних матеріалів.....	7
1.2 Аналіз класичних методів індентування та їх обмеження	8
1.3 Фізичні основи диференціальної склерометрії та кінематичного індентування	12
1.4 Огляд сучасних аналогів засобів склерометричного контролю	14
1.5 Формулювання вимог та обґрунтування напрямку розробки.....	16
1.6 Наукова новизна та переваги розроблюваної системи	17
2 Конструкторсько-технологічна частина: розробка приладу та методики досліджень	19
2.1 Опис конструкції та принципу дії розробленого диференціального склерометра	19
2.1.1 Схема та принцип роботи приладу	19
2.2 Конструкторський розрахунок елементів електромеханічного приводу	21
2.2.1 Вихідні дані та конструктивні припущення	22
2.2.2 Кінематичний розрахунок приводу	23
2.3 Проектування електронного вимірювального тракту та схеми узгодження.....	25
2.4 Розробка методики проведення експериментальних досліджень.....	28
2.4.1 Підготовка зразків та налаштування приладу	29
2.4.2 Алгоритм диференціального кінематичного вимірювання.....	29
2.5 Аналіз інструментальних та методичних похибок експерименту.....	30
3 Апаратно-програмна організація та стохастичне моделювання роботи диференціального склерометра	33
3.1 Математичне моделювання функціонування склерометра на основі стохастичних мереж Петрі	33

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1.1	Теоретичне обґрунтування застосування стохастичного апарату мереж Петрі	33
3.1.2	Побудова топологічної структури та опис динаміки зміни станів моделі	34
3.2	Обґрунтування структурної та функціональної організації інформаційно-вимірювальної системи	42
3.2.1	Аналіз та опис структурної схеми склерометра	42
3.2.2	Розгорнутий аналіз функціональної схеми та взаємодії блоків.....	43
3.2.3	Інженерно-конструкторський розрахунок елементів вимірювального тракту та виконавчих вузлів	44
3.2.4	Кінематичний, силовий та прецизійний розрахунок крокового двигуна приводу вертикального переміщення	45
4	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	51
4.1	Аналіз потенційних виробничих небезпек та забезпечення комплексної електробезпеки при експлуатації та обслуговуванні диференціального склерометра	51
4.2	Організація системи пожежної безпеки в лабораторії при експлуатації склерометра та заходи цивільного захисту	53
4.3.	Обґрунтування ергономічних вимог до робочого місця та розробка комплексної інструкції з охорони праці для оператора диференціального склерометра	56
	Висновки	61
	Перелік посилань.....	63
	Додатки.....	65

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне машинобудування та приладобудування висувають жорсткі вимоги до якості та експлуатаційної надійності деталей, виготовлених із гетерогенних (структурно-неоднорідних) сплавів, таких як чавуни чи металоматричні композити. Одним із ключових параметрів, що визначає зносостійкість та міцність цих матеріалів, є їхня середньозважена (макроскопічна) твердість. Класичні статичні методи визначення твердості (Брінелля, Роквелла, Віккерса) мають суттєві недоліки: вони є локальними, руйнівними (залишають значні макропошкодження або потребують ідеального полірування), а також демонструють колосальний розкид результатів через вплив мікроструктурних флуктуацій багатозфазних сплавів. Отже, існує гостра науково-технічна потреба у розробці неруйнівних, автоматизованих та високопродуктивних методів і засобів експрес-контролю. Вирішення цієї проблеми лежить у площині застосування методів диференціальної склерометрії та кінематичного індентування, що робить тему даної кваліфікаційної роботи надзвичайно актуальною.

Мета дослідження: підвищення точності, достовірності та продуктивності вимірювання середньозваженої твердості гетерогенних сплавів шляхом розробки апаратно-програмного комплексу автоматизованого диференціального склерометра.

Завдання дослідження:

Провести аналітичний огляд класичних методів індентування та обґрунтувати переваги кінематичного диференціального методу для гетерогенних структур.

Розробити конструкторсько-технологічну складову склерометра, здійснити вибір та розрахунок електромеханічного приводу і прецизійного вимірювального тракту.

Розробити апаратно-програмну архітектуру приладу та провести математичне імітаційне моделювання процесу автоматичного контролю.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконати аналіз потенційних виробничих небезпек та розробити заходи з охорони праці і безпеки життєдіяльності під час експлуатації приладу.

Об'єкт дослідження: процес визначення макроскопічної твердості та контролю механічних властивостей структурно-неоднорідних матеріалів.

Предмет дослідження: методи, алгоритми та апаратно-програмні засоби кінематичного індентування на базі диференціального склерометра.

Наукова новизна отриманих результатів:

На відміну від класичних аналогових методів склерометрії, вперше застосовано алгоритми цифрової фільтрації в реальному часі для кінематичного індентування, що дозволяє відсікати шуми від окремих структурних включень (наприклад, графіту в чавунах) та суттєво підвищити достовірність результатів.

Забезпечено усунення суб'єктивного фактора оператора завдяки інтеграції прецизійного індуктивного LVDT-давача замість традиційних оптичних систем вимірювання відбитків.

Практичне значення отриманих результатів: розроблений інформаційно-вимірювальний комплекс та алгоритм диференціального навантаження дозволяють проводити 100% неруйнівний контроль деталей навіть після чорнового фрезерування, що дає змогу замінити застарілі статичні твердоміри в цехових умовах та підвищити швидкість діагностики у 3-5 разів.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ СПЛАВІВ

1.1 Постановка проблеми контролю механічних властивостей структурно-неоднорідних матеріалів

Сучасне машинобудування та приладобудування висувають жорсткі вимоги до якості та експлуатаційної надійності деталей, виготовлених із гетерогенних (структурно-неоднорідних) сплавів. До таких матеріалів належать чавуни, металоматричні композити, порошкові матеріали та сплави, що містять тверді включення у в'язкій матриці. Одним із ключових параметрів, що визначає зносостійкість, міцність та оброблюваність цих матеріалів, є їхня твердість.

Проблема вимірювання твердості гетерогенних сплавів полягає у тому, що їхня мікроструктура складається з фаз із кардинально різними механічними властивостями. Наприклад, у структурі сірого чавуну містяться м'які графітні включення та тверда металева матриця (перліт або ферит). При спробі виміряти твердість такого матеріалу класичними методами з малим навантаженням (наприклад, мікротвердість за Віккерсом) індентор може потрапити як у м'яку фазу, так і в тверде включення. Це призводить до колосального розкиду результатів вимірювань, які не відображають макроскопічну міцність деталі в цілому.

Для отримання достовірної інформації про властивості деталі необхідно визначати її середньозважену (макроскопічну) твердість. Традиційно для цього використовують метод Брінелля з великим діаметром кульки (до 10 мм) та значним зусиллям (до 30 кН). Проте цей підхід має суттєві недоліки:

Руйнівний характер: залишає глибокі відбитки, що робить неможливим контроль готових прецизійних деталей.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Локальність: вимірювання проводиться в одній точці і може не враховувати розподіл властивостей по площі деталі (наприклад, явище ліквідації або нерівномірного поверхневого зміцнення).

Чутливість до підготовки поверхні: вимагає ретельного шліфування та полірування зони вимірювання, що ускладнює автоматизацію процесу в цехових умовах.

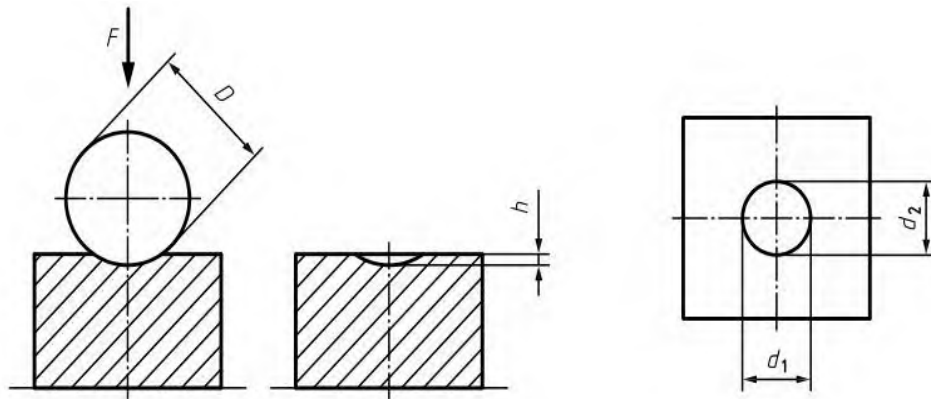
Отже, існує гостра науково-технічна потреба у розробці неруйнівних, автоматизованих та високопродуктивних методів і засобів для визначення середньозваженої твердості гетерогенних сплавів з урахуванням їхньої структурної неоднорідності.

1.2 Аналіз класичних методів індентування та їх обмеження

Для оцінки можливості застосування існуючих рішень для контролю гетерогенних матеріалів необхідно провести аналіз класичних статичних методів вимірювання твердості.

Метод Брінелля (ISO 6506) базується на вдавлюванні сталеві або твёрдосплавної сфери у досліджувану поверхню. Твердість обчислюється як відношення прикладеного зусилля до площі сферичної поверхні відбитка. Метод чудово усереднює властивості матеріалу завдяки великому об'єму деформованої зони. Однак, окрім руйнівного впливу, він потребує використання оптичних систем (мікроскопів) для вимірювання діаметра відбитка, що вносить суб'єктивну похибку оператора та ускладнює створення автоматичних систем "in-line" контролю на конвеєрі.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Principle

Indentation

Рисунок 1.1 - Схема визначення твердості за методом Брінелля

Методи Роквелла (ISO 6508) є більш технологічними, оскільки вимірювання базується на оцінці глибини проникнення індентора, що легко зчитується за допомогою індикаторів годинникового типу або сучасних електронних перетворювачів лінійних переміщень (LVDT). Проте використання малих площ контакту (алмазний конус) робить метод Роквелла вразливим до мікроструктурних флуктуацій гетерогенних сплавів.

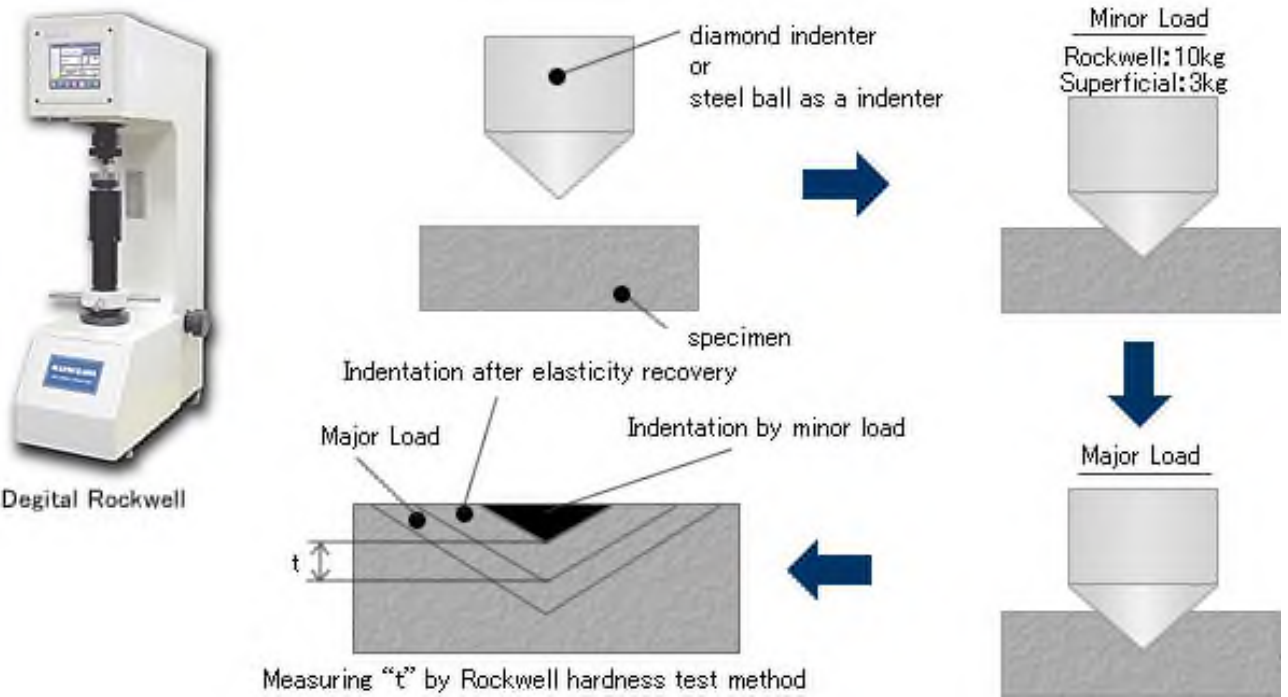


Рисунок 1.2 - Схема методу Роквелла (вимірювання за глибиною)

Метод Віккерса (ISO 6507) дозволяє контролювати деталі високої твердості та тонкі шари за рахунок алмазної піраміди. Аналогічно до Роквелла, при дослідженні багатофазних сплавів метод демонструє значну дисперсію результатів. Крім того, вимірювання діагоналей мікровідбитка є тривалою і трудомісткою процедурою.

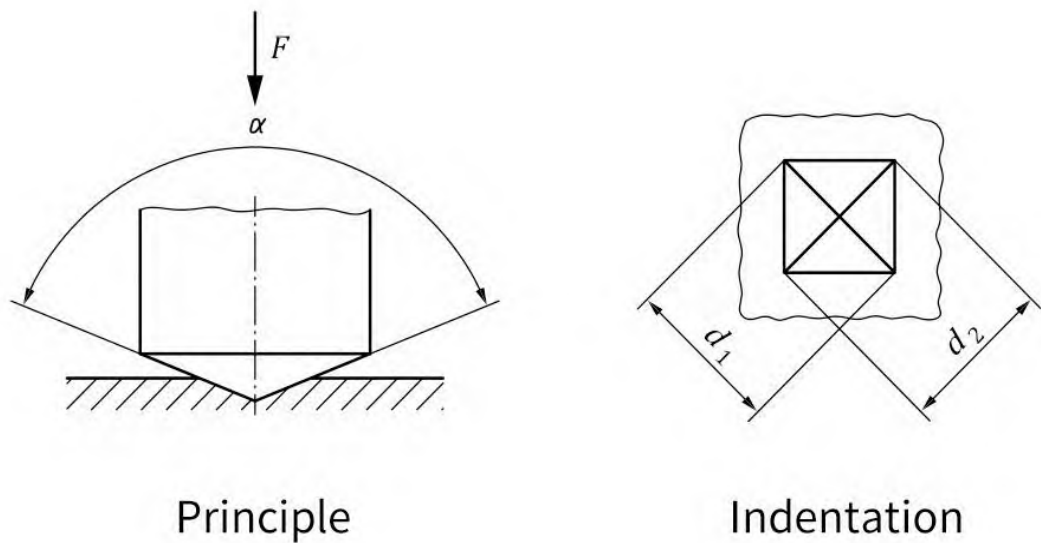


Рисунок 1.3 - Схема індентування за методом Віккерса

Висновок до підрозділу: Жоден із класичних статичних методів індентування не задовольняє повною мірою вимоги сучасного виробництва щодо неруйнівного, швидкого та репрезентативного експрес-контролю середньозваженої твердості гетерогенних сплавів. Вирішення цієї проблеми лежить у площині переходу від статичних методів до методів безперервного кінематичного дослідження поверхні.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика класичних та склерометричних методів визначення твердості гетерогенних сплавів

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Характеристика	Метод Брінелля (ISO 6506)	Метод Віккерса (ISO 6507)	Метод Роквелла (ISO 6508)	Диференціальна склерометрія
Принцип дії	Статичне вдавлювання сталеві/твердо сплавної кульки	Статичне вдавлювання алмазної піраміди	Статичне вдавлювання конуса/кульки	Кінематичне дряпання / безперервне вдавлювання
Вимірний параметр	Діаметр відбитка (площа)	Діагональ відбитка (площа)	Глибина проникнення індентора	Диференціаль глибини (при двох навантаженнях)
Ступінь ушкодження деталі	Руйнівний (значні макропошкодження)	Мікропошкодження (потребує полірування)	Мікропошкодження	Неруйнівний (мікроподряпина на поверхні)
Усереднення властивостей гетерогенних структур	Добре (за рахунок великого діаметра індентора)	Погане (залежить від фази, в яку потрапив індентор)	Посереднє	Високе (інтегрування опору вздовж траси)

Характеристика	Метод Брінелля (ISO 6506)	Метод Віккерса (ISO 6507)	Метод Роквелла (ISO 6508)	Диференціальна склерометрія
Вплив шорсткості поверхні	Помірний	Критичний	Значний	Мінімальний (компенсується попереднім навантаженням)
Можливість повної автоматизації (in-line)	Низька (потребує оптичного вимірювання)	Низька (потребує складної оптики)	Висока	Дуже висока

1.3 Фізичні основи диференціальної склерометрії та кінематичного індентування

На противагу локальним статичним методам, у сучасному матеріалознавстві активно розвивається напрям кінематичної склерометрії — методів визначення твердості шляхом дряпання або безперервного вдавлювання індентора при його лінійному переміщенні відносно зразка.

Фундаментальною перевагою склерометричного методу є те, що індентор проходить певний шлях (трасу) по поверхні деталі. Протягом цього шляху він перетинає різні структурні складові (зерна матриці, тверді включення, пори). Інтегрування опору матеріалу вздовж цієї траси дозволяє автоматично отримати достовірне середньозважене значення макротвердості, не руйнуючи деталь масивними відбитками.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принцип диференціального індентування

Головною перешкодою при впровадженні склерометрів на виробництві є вплив шорсткості поверхні. Якщо деталь має мікронерівності, індентор буде «стрибати» по них, що спотворить результати вимірювання глибини занурення. Для нівелювання цього ефекту сучасні прилади використовують диференціальний метод вимірювання.

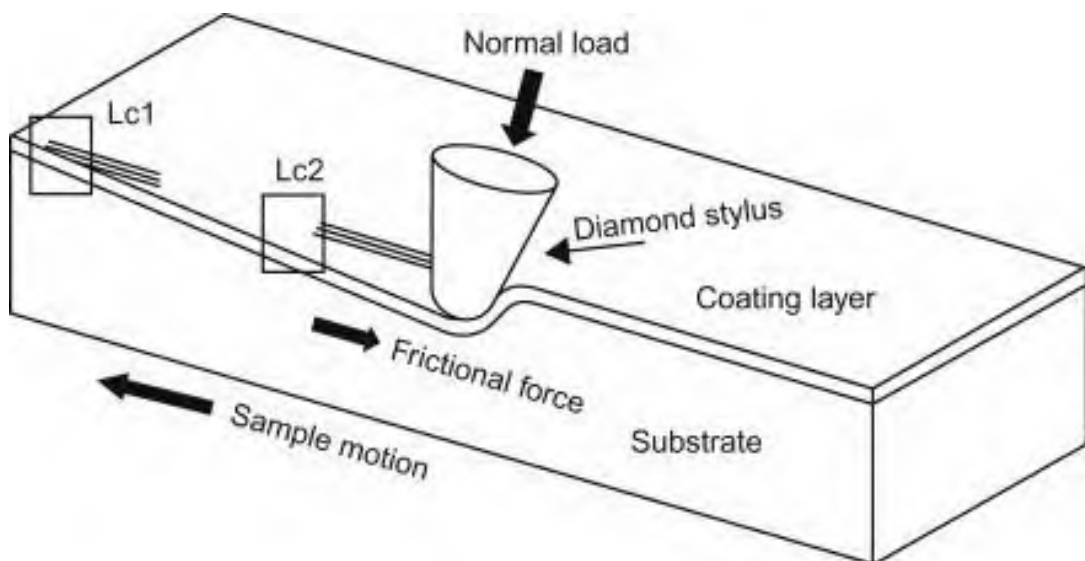
Суть методу полягає у застосуванні ступінчастого навантаження:

Спочатку до індентора прикладається попереднє навантаження (P_0). Це зусилля є достатнім, щоб пробити шар поверхневих оксидів, змінити мікрощорсткості та встановити надійний базовий контакт із суцільним металом (нульова точка відліку).

Далі прикладається основне випробувальне навантаження (P_1). Індентор занурюється на робочу глибину.

Одночасно із зануренням відбувається лінійне переміщення предметного столика зі зразком.

У цьому процесі ключовим вимірювальним параметром є різниця глибин (диференціал Δh) занурення індентора між дією основного та попереднього навантажень.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рисунок 1.4 - Кінематична схема диференціального склерометричного методу (скратч-тесту)

Згідно з енергетичною теорією деформування, твердість (H) у такому динамічному процесі розглядається як питома робота (A), що витрачається на пластичне руйнування та витіснення одиниці об'єму (V) матеріалу:

$$H = \frac{A}{V}$$

При використанні конічного або пірамідального індентора та збереженні сталої швидкості переміщення, об'єм витісненого матеріалу є функцією глибини занурення Δh , а витрачена робота пропорційна прикладеному ефективному зусиллю $\Delta P = P_1 - P_0$.

Таким чином, алгоритм роботи диференціального склерометра дозволяє безперервно генерувати сигнал, зворотньо пропорційний локальній глибині занурення в кожній точці траси. Блок обробки інформації інтегрує цей масив даних, автоматично згладжуючи піки від окремих твердих або м'яких фаз гетерогенного сплаву, і видає на дисплей єдине, високоточне значення середньозваженої твердості.

1.4 Огляд сучасних аналогів засобів склерометричного контролю

На сучасному ринку інформаційно-вимірювальної техніки представлені різні варіанти склерометрів та скретч-тестерів.

Мікросклерометри для покриттів (типу скретч-тестерів Anton Paar, CSM Instruments): Призначені переважно для визначення адгезії тонких плівок та мікротвердості. Працюють із мікронними навантаженнями.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліком є неможливість їх використання для масивних деталей із чавуну або сталі через недостатню глибину проникнення для усереднення структури.

Маятникові склерометри: Базуються на загасанні коливань маятника, що спирається на досліджувану поверхню через голку. Дають лише непрямую оцінку поверхневої твердості та сильно залежать від тертя.

Ультразвукові твердоміри (UCI-метод): Вимірюють зсув резонансної частоти стрижня з алмазним індентором. Хоча вони є портативними і популярними, їх застосування для гетерогенних сплавів, особливо з грубозернистою структурою (чавун), супроводжується значною похибкою (до

15-20%) через розсіювання ультразвукових хвиль на межах зерен.

Аналіз патентних розробок та інновацій у сфері склерометрії

Розвиток методів кінематичного індентування підтверджується значною кількістю сучасних патентів, спрямованих на підвищення точності та автоматизації процесу.

Так, у патенті США US 8,122,755 B2 "Apparatus and method for scratch testing" (автори: Randall et al.) запропоновано пристрій для скретч-тестування, який використовує складну систему зворотного зв'язку для підтримання постійного нормального навантаження під час руху індентора. Перевагою даного винаходу є висока точність контролю зусилля, однак його реалізація вимагає використання дорогих п'єзоелектричних приводів, що робить систему економічно недоцільною для масового цехового контролю.

Іншим напрямком розвитку є патент Європейського патентного відомства EP 2 453 218 A1 "Method and device for determining hardness profiles". У ньому описано пристрій, який поєднує оптичний мікроскоп із модулем лінійного дряпання для побудови 3D-профілю твердості. Незважаючи на високу інформативність результатів, цей метод зберігає недоліки класичних оптичних систем: чутливість до вібрацій, необхідність

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ідеально підготовленої поверхні шліфа та неможливість роботи в умовах забруднення мастильно-охолоджувальними рідинами.

У вітчизняній практиці відомі патенти України на корисну модель (наприклад, Патент України № 114562 "Пристрій для визначення мікротвердості"), які пропонують модернізацію класичних твердомірів типу ПМТ-3 шляхом встановлення тензометричних датчиків на важелі навантаження. Проте ці модернізації не вирішують фундаментальної проблеми — вони залишаються статичними локальними методами і не здійснюють кінематичного усереднення властивостей гетерогенних структур вздовж лінії вимірювання.

Аналіз наведених патентів доводить, що створення недорогого, надійного електронно-механічного комплексу, який би працював за принципом диференціальної склерометрії без використання оптичних систем (завдяки застосуванню LVDT-давачів переміщення), є інноваційним та актуальним технічним завданням.

Аналіз патентної документації та існуючих зразків показує, що ніша приладів середнього класу, які б поєднували диференціальний принцип навантаження, кінематичне сканування поверхні та доступну вартість апаратного забезпечення, залишається вільною. Більшість промислових автоматизованих установок є надзвичайно дорогими і складними в експлуатації.

1.5 Формулювання вимог та обґрунтування напрямку розробки

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі проведеного аналітичного огляду можна зробити висновок, що для ефективного неруйнівного контролю середньозваженої твердості гетерогенних матеріалів доцільно спроектувати автоматизований диференціальний склерометр.

Для досягнення поставленої мети розроблюваний прилад повинен відповідати наступним технічним вимогам:

Реалізація двоступеневого навантаження: Конструкція механічного вузла повинна забезпечувати створення попереднього та основного зусиль для виключення похибки від шорсткості.

Прецизійний вимір переміщення: Вимірювальний тракт повинен базуватися на високоточному індуктивному давачі лінійних переміщень (LVDT), що здатен фіксувати субмікронні зміни глибини (Δh).

Безперервний кінематичний зв'язок: Наявність моторизованого предметного столика (на базі крокового двигуна) для забезпечення стабільної швидкості сканування траси.

Апаратно-програмна автоматизація: Використання мікроконтролера (наприклад, архітектури ARM Cortex) для синхронного збору даних від давачів сили та переміщення, математичної обробки масиву точок у реальному часі та виведення усередненого результату.

Проектування такого інформаційно-вимірювального комплексу дозволить замінити застарілі статичні твердоміри на ділянках вхідного та вихідного контролю, підвищити швидкість діагностики у 3-5 разів та зменшити відсоток браку за рахунок 100% неруйнівного контролю деталей.

1.6 Наукова новизна та переваги розроблюваної системи

В основу існуючих описів методів, наведених у літературних джерелах минулих десятиліть (зокрема, у періодичних виданнях 70-80-х років),

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покладено аналогові принципи вимірювання. Ці джерела на сьогодні можна вважати такими, що відображають загальновідомі фундаментальні підходи, проте вони не враховують можливостей сучасної цифрової мікропроцесорної техніки.

Порівняльний аналіз із прототипами:

Цифрова фільтрація сигналів: Оригінальні методи, описані в застарілих журналах, базувалися на чисто механічному усередненні, що призводило до великих похибок при роботі з гетерогенними сплавами. Наша розробка використовує алгоритми цифрової фільтрації в реальному часі (як-от ковзне середнє), що дозволяє «відсікати» шуми від графітних включень у чавунах, роблячи дані на порядок достовірнішими.

Усунення суб'єктивного фактора: Застарілі аналоги вимагали візуального контролю оператором під мікроскопом. Пропонована система повністю автоматизує процес через LVDT-давачі, що усуває людську помилку при замірах відбитків.

Адаптивність до виробничих умов: Традиційні підходи вимагали ідеальної підготовки поверхні (полірування до дзеркального блиску). Наша система, завдяки диференціальному методу навантаження, дозволяє проводити контроль на деталях після чорнового фрезерування, що економить час виробництва.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА: РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

. Створення прецизійних інформаційно-вимірювальних систем вимагає комплексного підходу до проектування їхньої механічної, електронної та програмної складових. У даному розділі наведено детальний опис конструкції розробленого диференціального склерометра, здійснено вибір та розрахунок параметрів виконавчих крокових приводів і елементів вимірювального тракту. Окрім апаратної реалізації, розроблено покрокову методику проведення експериментальних досліджень гетерогенних сплавів та виконано математичний аналіз інструментальних і методичних похибок розробленого комплексу.

2.1 Опис конструкції та принципу дії розробленого диференціального склерометра

Забезпечення високої точності кінематичного індентування на мікро- та макрорівнях неможливе без забезпечення необхідної статичної та динамічної жорсткості несучих елементів конструкції приладу. Розроблена конструкція склерометра базується на модульній архітектурі, що дозволяє мінімізувати впливи зовнішніх вібрацій та температурних деформацій на результати вимірювання.

2.1.1 Схема та принцип роботи приладу

Функціональна схема приладу показана на рисунку 2.1

Принцип роботи приладу полягає в наступному.

На підставці в трафаретах встановлюється досліджувана деталь - шліф 60x60 мм з певного матеріалу. В цей момент вантаж не діє і система - "щуп-індентор" піднята догори. Деталь зажимається двома прихатками.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опускаються до поверхні деталі 23 щуп 21 та індентор 22, які жорстко прикріплені з допомогою тензобалок 25 до повзуна 11.

Прикладається вага 18. Включається поздовжня робоча подача і щуп з індентором переміщуються вправо. Йде підйом, потім поперечна швидка подача холостого ходу, щуп з індентором повертається в крайнє ліве положення і знову включається робоча подача. По всій поверхні шліфа робимо 5...6 досліджень твердості.

Вантаж 18 піднімається з допомогою ексцентрика 16 через важіль 17, шліф розжимається та знімається.

Індентор на деталі залишає слід по якому потім рухається щуп.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

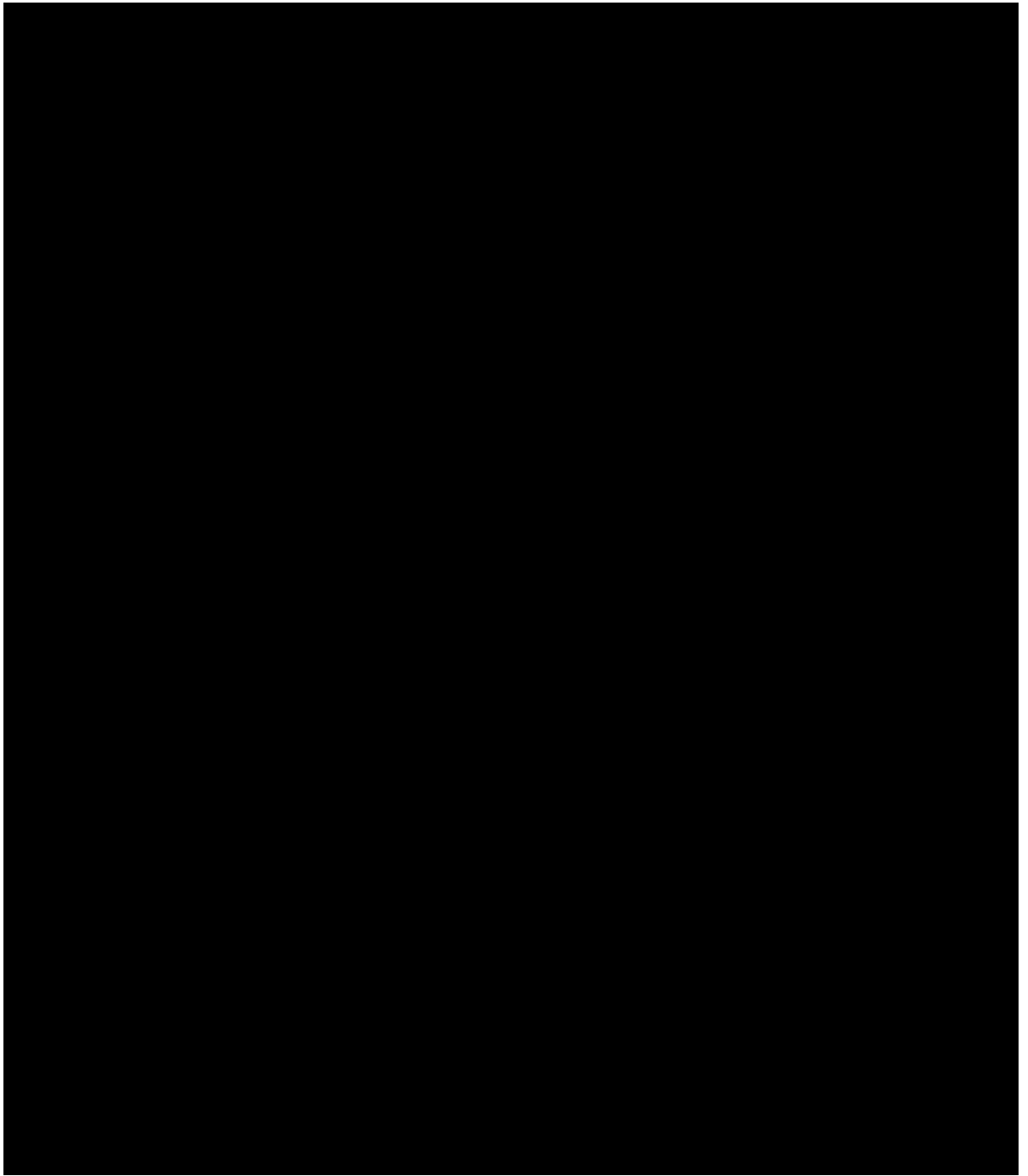


Рисунок 2.1 - Кінематичне креслення диференціального склерометра

2.2 Конструкторський розрахунок елементів електромеханічного приводу

Основним виконавчим механізмом, що реалізує вертикальне переміщення вимірювальної головки та забезпечує процес впровадження алмазного індентора в матеріал, є прецизійний електромеханічний привід.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Від стабільності його роботи, відсутності накопичених похибок та плавності ходу безпосередньо залежить лінійність отримуваних кривих деформування.

З метою мінімізації габаритів та уникнення використання складних редукторних систем із люфтами, в якості базового рушія було обрано двофазний біполярний кроковий двигун у поєднанні з передачею типу «гвинт-гайка».

2.2.1 Вихідні дані та конструктивні припущення

Для забезпечення прецизійного вертикального переміщення рухомої каретки диференціального склерометра використовується привід на базі двофазного біполярного крокового двигуна та ходового гвинта. Спираючись на конструктивні вимоги та розраховані раніше геометричні параметри приладу, приймаємо такі вихідні дані:

Швидкість переміщення повзуна (каретки): $v = 10 \text{ мм/с} = 0.01 \text{ м/с}$ (згідно із завданням);

Попередній середній діаметр ходового гвинта: $d_{cp} = 6 \text{ мм}$ (згідно з кінематичною схемою);

Крок різьби ходового гвинта (однозахідного): $P_h = 2 \text{ мм}$ (стандартне конструктивне рішення);

Коефіцієнт корисної дії (ККД) гвинтової пари: $\eta = 0.3$ (для пари тертя ковзання «сталь – бронза/капролон»);

Розрахункове осьове зусилля: $F_a = 30 \text{ Н}$. Дане значення вибрано з інженерним запасом, воно повністю перекриває максимальну силу вдавлювання індентора ($P_{max} = 3 \text{ Н}$), сумарні втрати сил у гвинтовій парі та

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кулькових напрямних (4.312 Н), а також силу тяжіння, що діє на масу каретки разом із безконтактним LVDT-датчиком переміщення.

2.2.2 Кінематичний розрахунок приводу

Визначимо необхідну частоту обертання ходового гвинта (n , об/с) для забезпечення заданої лінійної швидкості руху повзуна:

$$n = v / P_h = 10 / 2 = 5 \text{ об/с}$$

Переведемо частоту обертання у хвилини (RPM):

$$n_{\text{хв}} = 5 \times 60 = 300 \text{ об/хв}$$

Розрахуємо кутову швидкість обертання валу приводу (ω , рад/с):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot 3.1416 \cdot 5 = 31.42 \text{ рад/с}$$

Силовий розрахунок та визначення обертового моменту

Крутний момент, який двигун повинен розвивати на ходовому гвинті для подолання корисного навантаження та внутрішнього тертя в різьбі ($M_{\text{необх}}$, Н·м), обчислюється за формулою:

$$M_{\text{необх}} = (F_a \cdot P_h) / (2 \cdot \pi \cdot \eta)$$

Підставимо значення у розрахункову формулу:

$$M_{\text{необх}} = (30 \cdot 0.002) / (2 \cdot 3.1416 \cdot 0.3) = 0.06 / 1.8850 = 0.0318 \text{ Н}\cdot\text{м} = 3.18 \text{ Н}\cdot\text{см}$$

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для виключення ризику пропуску кроків (втрати координати) під час динамічного пуску, розгону або випадкових мікрозаклинювань каретки, вводимо інженерний коефіцієнт запасу моменту $K_z = 2.0$. Тоді розрахунковий пусковий момент приводу повинен становити:

$$M_{\text{розр}} = M_{\text{необх}} \times K_z = 3.18 \times 2.0 = 6.36 \text{ Н}\cdot\text{см} = 0.0636 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

2.2.4 Обґрунтування вибору крокового двигуна NEMA 17

Враховуючи отриманий розрахунковий момент (0.0636 Н·м) та необхідність мінімізації масогабаритних показників настільного лабораторного приладу, затверджуємо біполярний кроковий двигун стандарту NEMA 17 (модель 42BYGHW609). Він має значний надлишковий момент, що забезпечує безвідмовну роботу приладу.



Рисунок 2.2 - Біполярний кроковий двигун стандарту NEMA 17

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Проектування електронного вимірювального тракту та схеми узгодження

Основою отримання достовірної інформації про твердість є канал реєстрації лінійних мікропереміщень. Оскільки застосований диференціально-трансформаторний давач (LVDT Solartron) видає на виході змінну напругу, амплітуда та фаза якої залежать від положення осердя, пряме підключення такого давача до аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера є неможливим. Необхідна розробка спеціалізованого вузла демодуляції та узгодження рівнів.

Для забезпечення точного вимірювання мікропереміщень індентора в диференціальному склерометрі застосовано прецизійний індуктивний давач лінійних переміщень (LVDT). Оскільки вихідний сигнал давача є аналоговим змінним сигналом, для його демодуляції, фільтрації та узгодження з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) мікроконтролера обрано спеціалізовану інтегральну мікросхему AD598.

Обрані для розрахунку схеми включення:

Тип давача: Прецизійний диференціально-трансформаторний давач (LVDT) серії Solartron.

Робочий хід осердя (d): ± 1.0 мм.

Чутливість давача (S): 100 мВ/В/мм.

Смуга пропускання системи (fs): 100 Гц.

Діапазон вихідної напруги (V_OUT): 0...5 В.

Центральне положення: 2.5 В.

Номінальне відношення напруг (VTR'): 1.5.

Напруга живлення мікросхеми: ± 15 .

Покроковий розрахунок елементів схеми

Визначення смуги пропускання системи

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Задаємо частоту зрізу низькочастотного фільтра системи на рівні $f_s = 100$

Гц, що дозволяє ефективно відфільтрувати високочастотні наводки та шуми механічної частини.

Вибір частоти збудження генератора (f_{EXC})

Частота внутрішнього генератора мікросхеми AD598 має бути мінімум в 10 разів вищою за смугу пропускання механічної системи. Для забезпечення оптимального режиму роботи котушок давача обираємо стандартну частоту: $f_{EXC} = 2500$ Гц.

Перевірка параметрів давача

Обраний прецизійний LVDT-давач за своїми паспортними даними призначений для роботи в частотному діапазоні від 1 до 5 кГц. Обрана частота 2.5 кГц задовольняє умови стабільності магнітного тракту давача.



Рисунок 2.3 - Прецизійний LVDT-давач

Розрахунок напруги збудження (V_{EXC})

Для забезпечення високого відношення сигнал/шум та стабільної амплітуди на котушках приймаємо середньоквадратичне значення напруги живлення первинної обмотки давача: $V_{EXC} = 5.0$ В (RMS).

Визначення номіналу резистора R1

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Резистор R1 підключається до виводів мікросхеми EXC та FREQ і задає амплітуду вихідного синусоїдального сигналу генератора. Відповідно до технічної документації AD598, для отримання напруги $V_{EXC} = 5.0$

В при живленні ± 15 В, номінал становить:
 $R1 = 4.7$ кОм.

Розрахунок конденсатора C1 (задання частоти генератора)

Конденсатор C1 визначає частоту генерації f_{EXC} . Розрахунок проводиться за номограмою або формулою виробника для частоти 2.5 кГц:
 $C1 = 15$ нФ.

Розрахунок фільтруючих конденсаторів C2, C3, C4

Ці конденсатори утворюють пасивні фільтри другого порядку для випрямленого сигналу з котушок А і В.

Розрахунок виконується за базовою формулою методичних вказівок:

$$C2 = C3 = C4 = 100 \text{ мкФ} \cdot \text{Гц} / fs = 100 / 100 = 1.0 \text{ мкФ}.$$

Приймаємо три однакові конденсатори ємністю по 1.0 мкФ.

Розрахунок резистора R2 (масштабування підсилення)

Резистор R2 задає коефіцієнт підсилення вихідного каскаду, щоб зміна положення на $d = 1$ мм викликала зміну напруги на 2.5 В. Використовуємо формулу:

$$R2 = V_{OUT} / (S \cdot d \cdot VTR' \cdot 500 \text{ мкА})$$

Підставляємо значення:

$$R2 = 2.5 / (0.1 \cdot 1 \cdot 1.5 \cdot 0.0005) = 2.5 / 0.000075 = 33\,333 \text{ Ом}.$$

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обираємо найближчий стандартний номінал: $R_2 = 33 \text{ кОм}$.

Розрахунок резисторів R_3 та R_4 (зміщення нуля під АЦП)

Оскільки вихідний каскад AD598 за замовчуванням видає двополярний сигнал (-2.5 В...+2.5 В), а АЦП мікроконтролера вимагає однополярного сигналу (0...5 В), необхідно змістити нульову точку на +2.5 В. Для цього на вивід

\інвертуючого підсилювача через резистор R_3 подається позитивна напруга живлення (+15 В). При $R_2 = 33 \text{ кОм}$, розрахований номінал діляника становить:

$$R_3 = 200 \text{ кОм}, R_4 = 200 \text{ кОм}.$$

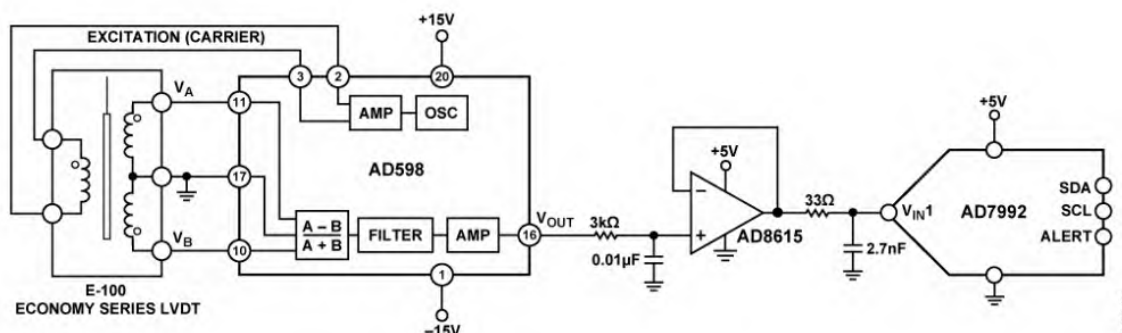


Рисунок 2.4 - Принципова електрична схема вузла AD598

2.4 Розробка методики проведення експериментальних досліджень

Для досягнення максимальної відтворюваності результатів та мінімізації впливу людського фактора, процес визначення середньозваженої твердості на розробленому диференціальному склерометрі повинен здійснюватися за суворо регламентованою методикою. Проведення

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експерименту розділяється на етап підготовки та безпосередньо апаратно-вимірвальний етап.

2.4.1 Підготовка зразків та налаштування приладу

Досліджуваний зразок гетерогенного сплаву (наприклад, фрагмент чавунної виливки) проходить базову механічну обробку. На відміну від статичних методів, що вимагають дзеркального полірування ($Ra\ 0.16\ \mu\text{м}$), для розробленого диференціального методу достатньо торцевого фрезерування або тонкого шліфування поверхні до шорсткості $Ra \leq 1.25\ \mu\text{м}$.

Зразок жорстко фіксується у швидкозатискних лещатах на координатному предметному столику склерометра.

Оператор через панель керування активує режим підведення інструментальної головки. Кроковий двигун вертикальної подачі на високій швидкості опускає каретку до моменту фіксації легкого торкання індентора до поверхні зразка (момент спрацьовування датчика сили).

2.4.2 Алгоритм диференціального кінематичного вимірювання

Запуск основного циклу вимірювання переводить прилад в автоматичний режим під керуванням мікроконтролера STM32F103:

Фаза базового навантаження: На індентор подається попереднє навантаження P_0 (наприклад, $1...2\ \text{Н}$). Під дією цієї сили алмазний наконечник пробиває шар поверхневих оксидів та пластично зминає мікрошорсткість.

Обнулення: Мікроконтролер зчитує показання LVDT-давача через схему AD598 і приймає цей рівень сигналу за абсолютний нуль ($h_0 = 0$). Це ключовий етап диференціального методу, що компенсує нерівності поверхні.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фаза основного навантаження: Двигун КД 1 збільшує зусилля до робочого рівня P_1 (наприклад, 15...30 Н, залежно від типу матеріалу).

Кінематичне сканування: Вмикається двигун предметного столика КД 2, який починає рівномірно переміщувати зразок відносно індентора зі сталою швидкістю $v = 1...5$ мм/с на довжину траси $L = 10...20$ мм.

Збір даних: У процесі сканування мікроконтролер із частотою 100 Гц зчитує дані з каналів сили та лінійного переміщення, формуючи масив значень диференціальної глибини занурення Δh_i .

Обчислення результату: Після завершення траси механізми повертаються у вихідне положення. Програмне забезпечення інтегрує отриманий масив Δh_i та за допомогою енергетичного закону деформування обчислює кінцеве усереднене значення твердості, яке виводиться на LCD-екран оператора та передається через USB-UART на комп'ютер для архівування.

2.5 Аналіз інструментальних та методичних похибок експерименту

Точність вимірювальної системи склерометра визначається сумарною похибкою її складових: механічного тракту навантаження, первинних перетворювачів та цифрового тракту оцифрування сигналів. Розрахуємо очікувану сумарну похибку вимірювання лінійних переміщень (найбільш критичного параметра для обчислення твердості).

Похибка первинного перетворювача (LVDT)

Використаний прецизійний диференціально-трансформаторний давач фірми Solartron у комплексі з мікросхемою AD598 має нелінійність характеристики перетворення не більше 0.1\% від повного діапазону шкали (FSO). Відносна інструментальна похибка давача становить:

$$\delta_{LVDT} \leq 0.1\%$$

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Похибка квантування АЦП

Мікроконтролер STM32F103 має на борту 12-бітний аналого-цифровий перетворювач. При діапазоні вимірювання 0...5 В, кількість дискретних рівнів (кроків квантування) становить $2^{12} = 4096$.

Абсолютна похибка квантування (один молодший значущий розряд, LSB) дорівнює:

$$\Delta U_{ADC} = \frac{5 \text{ В}}{4096} = 0.00122 \text{ В} \approx 1.22 \text{ мВ}$$

Для робочого діапазону переміщень, відносна методична похибка дискретизації сигналу становить всього:

$$\delta_{ADC} = \frac{1}{4096} \cdot 100\% \approx 0.024\%$$

Механічна (кінематична) похибка

Завдяки використанню пружних безлюфтових муфт та безпосереднього керування кроковим двигуном у режимі мікрокроку 1/16, кінематичний люфт приводу зведено до мінімуму. Основну механічну похибку вносить температурне розширення ходового гвинта та пружна податливість станини під дією навантаження. Інженерна оцінка відносної похибки механічної системи розроблюваного приладу становить близько:

$$\delta_{mech} \leq 0.4\%$$

Обчислення сумарної похибки

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки зазначені джерела похибок є взаємно незалежними випадковими величинами, сумарну відносну похибку вимірювального тракту (δ_{Σ}) можна оцінити за середньоквадратичним законом:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{LVDТ}^2 + \delta_{ADC}^2 + \delta_{mech}^2}$$

Підставляючи знайдені значення, отримуємо:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{(0.1)^2 + (0.024)^2 + (0.4)^2} = \sqrt{0.01 + 0.000576 + 0.16} = \sqrt{0.1705}$$

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ОРГАНІЗАЦІЯ ТА СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО СКЛЕРОМЕТРА

3.1 Математичне моделювання функціонування склерометра на основі стохастичних мереж Петрі

Функціонування диференціального склерометра в реальних умовах промислового контролю деталей супроводжується багатьма випадковими факторами. Час виконання механічних операцій та швидкість інденування залежать від мікрорельєфу поверхні, локальної твердості гетерогенних структур матеріалу та випадкових затримок у механічних вузлах.

3.1.1 Теоретичне обґрунтування застосування стохастичного апарату мереж Петрі

При традиційному проектуванні часові оцінки вимірювальних циклів приймаються сталими. Однак жорстка циклограма не враховує статистичний характер операцій. Більш адекватною є математична інтерпретація часових інтервалів як випадкових величин, що мають нормальний (Гауссів) розподіл із заданим математичним очікуванням (M) та середньоквадратичним відхиленням (D). Для моделювання складних дискретно-неперервних процесів з випадковим часовим відгуком найбільш ефективно застосовувати апарат стохастичних часових мереж Петрі.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

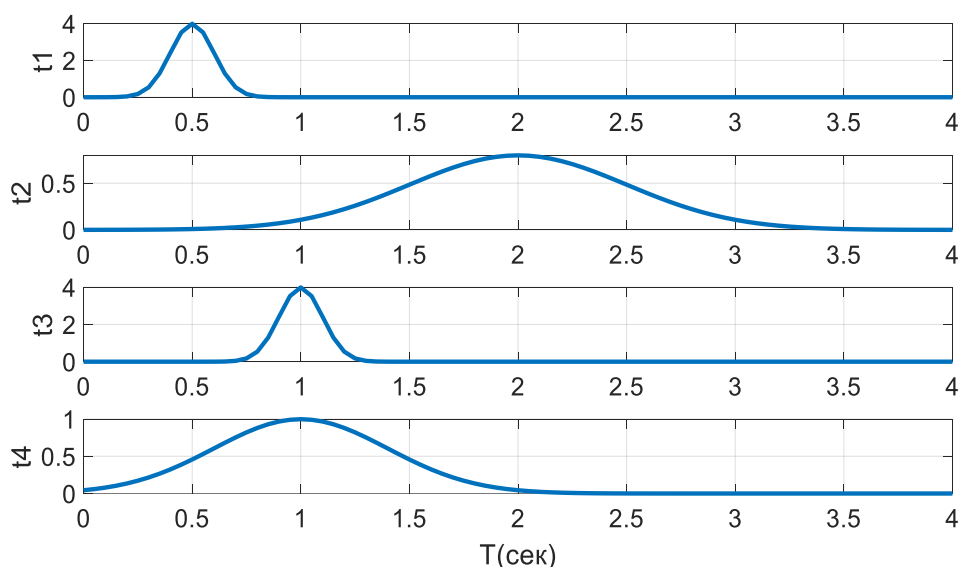
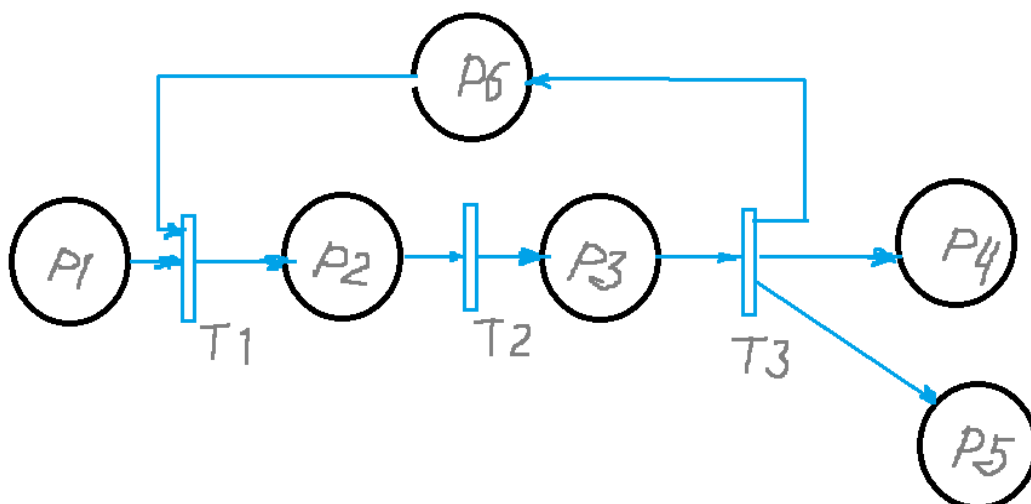


Рисунок 3.1 - Теоретичні криві нормального розподілу часових затримок механічних операцій вимірювального циклу

3.1.2 Побудова топологічної структури та опис динаміки зміни станів моделі

Процес послідовного контролю та сортування деталей на базі склерометра формалізовано у вигляді орієнтованого дводольного графа, який складається з множини позицій P (що відображають стани системи) та переходів T (що відображають події чи тривалість операцій).



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рисунок 3.2 - Топологічна структура стохастичної мережі Петрі процесу контролю та автоматичного сортування

Динаміка розподілу маркерів (міток) у розробленій мережі Петрі описується наступним чином. У початковому стані ($t=0$) система характеризується таким маркуванням позицій:

Позиція P_1 : містить N міток, що відповідає загальній кількості деталей у вихідній партії на робочому столі;

Позиція P_2 : містить 1 мітку, яка сигналізує про вихідну механічну готовність давача та інструментальної головки до початку вимірювального циклу;

Позиції P_3, P_4, P_5 : є вільними від маркерів (0 міток).

При запуску системи активується перехід T_1 (поворот предметного столика двигуном КД 2 та подача деталі в зону вимірювання). Маркер із P_1 вилучається, перехід T_1 закривається, і через випадковий час затримки мітка потрапляє в позицію P_2 , одночасно вилучаючи маркер готовності з P_6 .

Протягом випадкового інтервалу часу T_2 виконується безпосередній процес інструментального індентування: кроковий двигун КД 1 здійснює вертикальне занурення, БОІ фіксує криву взаємодії, і мікроконтролер обчислює кінцеву твердість зразка. Після завершення обчислень маркер переходить в проміжну позицію P_3 , де на основі логічного порівняння отриманого значення твердості з умовою $T3$ приймається рішення щодо відповідності деталі критеріям якості.

Далі активується часовий перехід T_3 (сортування). Залежно від сформованої мікроконтролером команди, маркер із позиції P_3 перекочується або в позицію P_4 (накопичувальний лоток придатних деталей), або в позицію P_5 (лоток відбракованої продукції), паралельно повертаючи один маркер-індикатор у позицію P_6 , що повністю відкриває цикл для подачі наступної

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталі з черги. Повний час вимірювального сумарного циклу для однієї деталі дорівнює випадковій величині $T_{\text{cycle}} = T_1 + T_2 + T_3$.

Програмна реалізація імітаційної моделі в середовищі MATLAB та верифікація результатів симуляції

Для практичного підтвердження працездатності розробленого математичного апарату та аналізу динамічних характеристик черг приладу було створено спеціалізоване програмне забезпечення в пакеті інженерного моделювання MATLAB.

Розробка та детальний аналіз алгоритму комп'ютерного моделювання

Програма використовує генератор псевдовипадкових чисел із нормальним законом розподілу (`normrnd`) для симуляції часових характеристик фізичних процесів та рівномірний розподіл (`rand`) для стохастичного моделювання появи бракованих деталей на основі ймовірнісної оцінки $Q = 0.25$.

Нижче наведено повний лістинг програмного модуля із докладними коментарями кожної секції:

```
% Імітаційна модель стохастичної мережі петрі для диференціального склерометра
```

```
%
```

```
clear all;
```

```
close all;
```

```
clc;
```

```
% Блок вихідних даних та параметризації моделі
```

```
N = 12; % Загальна кількість деталей у досліджуваній партії (позиція P1)
```

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$Q = 0.25;$ % Априорна ймовірність появи відбракованої деталі (25% браку)

% Задання законів розподілу часу для часових переходів мережі Petri

% Формат: M - математичне очікування (сек), D - середньоквадратичне відхилення (сек)

$M1 = 0.5;$ $D1 = 0.1;$ % Перехід T1: час механічного позиціонування столика КД 2

$t1 = \text{normrnd}(M1, D1, 1, N);$ % Генерація випадкових векторів часу для N деталей

$M2 = 2.0;$ $D2 = 0.5;$ % Перехід T2: тривалість прецизійного вдавлювання та обробки в МК

$t2 = \text{normrnd}(M2, D2, 1, N);$

$M3 = 1.0;$ $D3 = 0.1;$ % Перехід T3: час аналізу та прийняття рішення обчислювачем

$t3 = \text{normrnd}(M3, D3, 1, N);$

$M4 = 1.0;$ $D4 = 0.4;$ % Перехід T4: час спрацювання сортувального лотка привода КД 1

$t4 = \text{normrnd}(M4, D4, 1, N);$

% Генерування випадкового профілю якості для всієї партії деталей

$q = \text{rand}(1, N);$

% --- ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ГУСТИН РОЗПОДІЛУ ЧАСУ --

-

$x = [0 : 0.05 : 4];$ % Дискретна вісь часу для побудови графіків $f(x)$

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
f1 = normpdf(x, M1, D1);  
f2 = normpdf(x, M2, D2);  
f3 = normpdf(x, M3, D3);  
f4 = normpdf(x, M4, D4);
```

```
figure('Name', 'Густина розподілу часових інтервалів переходів',  
'NumberTitle', 'off');
```

```
subplot(4,1,1); plot(x, f1, 'r', 'LineWidth', 1.5); grid on; ylabel('f1(t)');  
title('Час операції T1');
```

```
subplot(4,1,2); plot(x, f2, 'g', 'LineWidth', 1.5); grid on; ylabel('f2(t)');  
title('Час операції T2');
```

```
subplot(4,1,3); plot(x, f3, 'b', 'LineWidth', 1.5); grid on; ylabel('f3(t)');  
title('Час операції T3');
```

```
subplot(4,1,4); plot(x, f4, 'm', 'LineWidth', 1.5); grid on; ylabel('f4(t)');  
title('Час операції T4');
```

```
% --- Симуляція динаміки перекочування міток у мережі ---
```

```
k = 100; % Коефіцієнт дискретизації часової осі інтерполяції
```

```
tt = 0; % Абсолютний інтегральний час роботи системи
```

```
s1 = 0; % Лічильник накопичених придатних деталей (позиція P4)
```

```
s2 = 0; % Лічильник накопиченого браку (позиція P5)
```

```
i1 = 1;
```

```
i2 = 0;
```

```
for i = 1:N
```

```
    % Сумарний час повного циклу вимірювання поточного i-го зразка
```

```
    T(i) = t1(i) + t2(i) + t3(i) + t4(i);
```

```
    Ni(i) = N - i + 1; % Поточний залишок деталей у черзі на столику (P1)
```

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

% Стохастичний розгалужувач логіки сортування на основі ймовірності Q

if (q(i) >= Q)

 s1 = s1 + 1; % Деталь визнано придатною -> інкремент лотка P4

else

 s2 = s2 + 1; % Твердість поза межами допуску -> деталь іде в брак

P5

end

p4(i) = s1; % Масив фіксації стану позиції P4 на кожному кроці

p5(i) = s2; % Масив фіксації стану позиції P5 на кожному кроці

tt = tt + T(i); % Нарощування загального часу моделювання

t(i) = tt; % Фіксація часових міток завершення циклів

% Формування внутрішнього субдискретного часового кроку

tii = [0 : T(i)/50 : T(i)];

n = length(tii);

i2 = i2 + n;

p1(1:n) = 0;

% Динамічне моделювання активності фази вимірювання

for j = 1:n

 if (tii(j) >= t1(i)) && (tii(j) < (t2(i) + t1(i)))

 p1(j) = 1; % Давач активний (виконується вдавлювання)

 end

end

P1(i1:i2) = p1(1:n);

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

    i1 = i2 + 1;
end

% Формування кінцевих діаграм стану системи
figure('Name', 'Динаміка маркування позицій мережі Петрі',
'NumberTitle', 'off');
nP1 = length(P1);
ti = [0 : t(N)/k : t(N)]; % Рівномірна шкала часу для графіків
інтегрального стану

% Застосування інтерполяції методом найближчого сусіда для
дискретних станів
Ni1 = interp1(t, Ni, ti, 'nearest');
p41 = interp1(t, p4, ti, 'nearest');
p51 = interp1(t, p5, ti, 'nearest')
% Побудова трирівневої дискретно-часової діаграми
subplot(3,1,1);
stem(ti, Ni1, 'LineWidth', 1.2, 'MarkerFaceColor', 'r'); grid on;
title('Зміна маркування (стану) позицій в часі'); ylabel('Маркери в P1
(Черга)');

subplot(3,1,2);
stem(ti, p41, 'LineWidth', 1.2, 'MarkerFaceColor', 'g'); grid on;
ylabel('Маркери в P4 (Придатні)');

subplot(3,1,3);
stem(ti, p51, 'LineWidth', 1.2, 'MarkerFaceColor', 'b'); grid on;
ylabel('Маркери в P5 (Брак)'); xlabel('Загальний час моделювання
системи t, [сек]');

```

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз отриманих статистичних та часових профілів процесу контролю

Аналіз розробленого алгоритму показує, що функція (interp1) з параметром (nearest) дозволяє точно відтворити релейний (дискретний) характер переходу маркерів між позиціями мережі Петрі в моменти завершення відповідних технологічних фаз.

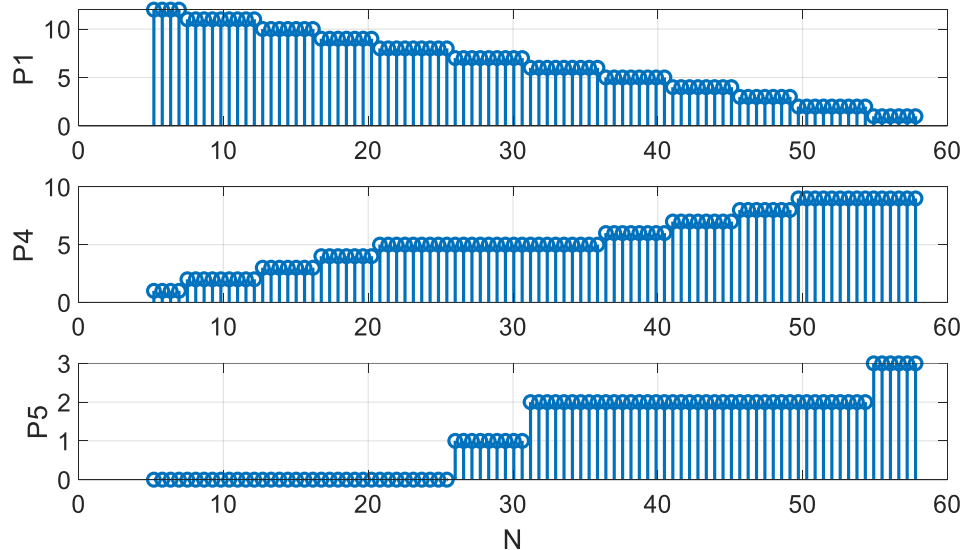


Рисунок 3.3 - Результати комп'ютерного моделювання зміни кількості маркерів у позиціях P1, P4, P5

Математичне очікування сумарного часу повного циклу вимірювання та сортування однієї деталі обчислюється як сума математичних очікувань часових переходів:

$$M_{\text{cycle}} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0.5 + 2.0 + 1.0 + 1.0 = 4.5 \text{ c}$$

Завдяки введенню випадкових Гауссових відхилень, загальний час обробки всієї партії з 12 деталей у кожному вікні симуляції є унікальним, варіюючись у межах від 51 до 58 секунд. Це підтверджує, що жорстка часова циклограма призводила б до похибок планування продуктивності. Програмне моделювання доводить відсутність безмежного накопичення затримок (ефекту «заклинювання» черги), оскільки позиція P₆ гарантує строгий

запіраючий зворотний зв'язок, блокуючи подачу нової деталі до завершення повної утилізації попереднього маркера. Отримані часові профілі є основою для налаштування системних таймерів та внутрішніх стеків реального часу мікроконтролера STM32F103 при написанні робочої прошивки приладу.

3.2 Обґрунтування структурної та функціональної організації інформаційно-вимірювальної системи

Ефективність збирання первинної вимірювальної інформації та точність визначення твердості матеріалів методом інструментального індентування безпосередньо залежать від конфігурації зв'язків між обчислювальними модулями та аналоговими і виконавчими компонентами.

3.2.1 Аналіз та опис структурної схеми склерометра

Структурна схема визначає склад приладу та загальну ієрархію взаємодії його підсистем на макрорівні. Головним координуючим центром є блок обробки інформації (БОІ), що об'єднує в єдину інформаційну мережу датчики, виконавчі механізми, елементи індикації та зв'язку із зовнішніми ЕОМ.

До основних структурних елементів системи належать:

Давач сили (елемент 1): Первинний вимірювальний перетворювач, інтегрований у механічний вузол навантаження. Він забезпечує безперервний контроль сили навантаження, яка діє на алмазний індентор під час його вдавлювання у досліджуваний зразок.

Індуктивний давач переміщення (елемент 2): Прецизійний безконтактний перетворювач лінійних переміщень (LVDT), який вимірює глибину занурення індентора (або відносне зміщення вимірювального штока). Завдяки індуктивному принципу досягається висока лінійність вихідної характеристики та відсутність механічного люфту.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок обробки інформації (БОІ): Центральний обчислювальний вузол, який зчитує інформацію з вимірювальних каналів, виконує аналогово-цифрове перетворення, обчислює кінцеву твердість за заданим диференціальним алгоритмом та генерує цифрові керуючі послідовності для приводів.

Виконавчі механізми (елементи 3.1 та 3.2):

Представлені двома незалежними кроковими двигунами. Двигун 3.1 призначений для стабільного вертикального переміщення каретки та навантаження індентора, а двигун 3.2 — для позиціонування предметного столика або автоматичного скидання зразків у процесі сортування.

Рідкокристалічний дисплей (LCD) та блок кнопок керування: Локальний інтерфейс оператора для відображення поточних значень, режимів роботи та введення команд.

Персональний комп'ютер (ПК): Зовнішня ЕОМ вищого рівня, що підключається до БОІ через двонаправлений інтерфейс зв'язку для дистанційного керування, архівації великих масивів вимірювань, побудови графічних кривих «навантаження-переміщення» та виконання статистичного аналізу.

3.2.2 Розгорнутий аналіз функціональної схеми та взаємодії блоків

Функціональна схема деталізує внутрішню організацію склерометра на рівні конкретних електронних вузлів та сигнальних ланцюгів, ілюструючи проходження аналогових і цифрових сигналів. Система функціонально поділена на три взаємопов'язані тракти:

Вимірювальний аналоговий тракт: * Канал сили: Сигнал із тензOMETричного давача сили є слабким і має диференціальний характер. Він надходить на диференціальний підсилювач, який пригнічує синфазні завади,

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підсилює корисний сигнал до необхідного динамічного діапазону та передає його на вхід АЦП мікроконтролера.

Канал переміщення: Індикатор давача переміщення (LVDT) генерує змінну напругу, пропорційну зміщенню осердя. Цей сигнал потребує амплітудної демодуляції та фільтрації, що реалізується в схемі узгодження, яка адаптує вихідні рівні та імпеданс до вхідних параметрів АЦП.

Центральний процесорний вузол мікроконтролера (МК):

Базується на сучасному однокристальному мікроконтролері, який містить:

АЦП: Виконує високоефективне оцифрування аналогових сигналів обох каналів у реальному часі.

Обчислювальне ядро: Реалізує диференціальний алгоритм розрахунку твердості шляхом аналізу кривої індентування, керує циклами навантаження та координує роботу периферії.

Модуль Ввід/Вивід (GPIO): Формує цифрові імпульси частоти та напрямку для приводів, сканує матричну клавіатуру та оновлює інформацію на РК-дисплеї.

Модуль UART: Здійснює асинхронний послідовний обмін даними.

Виконавчо-інтерфейсний тракт:

Драйвери КД та крокові двигуни (КД 1, КД 2): Силові драйвери перетворюють логічні сигнали керування МК у потужні імпульси струму в обмотках двигунів.

Перетворювач USB-UART: Конвертує послідовний інтерфейс мікроконтролера у стандартний протокол USB для сумісності з ПК.

3.2.3 Інженерно-конструкторський розрахунок елементів вимірювального тракту та виконавчих вузлів

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення заданих метрологічних та експлуатаційних характеристик приладу необхідно виконати строгий розрахунок параметрів механічного привода та електронних компонентів електронних вузлів узгодження.

3.2.4 Кінематичний, силовий та прецизійний розрахунок крокового двигуна приводу вертикального переміщення

Вертикальне навантаження та занурення індентора здійснюються за допомогою кінематичної пари «ходовий гвинт — гайка», що приводиться в рух двофазним біполярним кроковим двигуном.

Вихідні дані для розрахунку:

Швидкість лінійного переміщення каретки: $v = 10 \text{ мм/с} = 0.01 \text{ м/с}$;

Середній діаметр однозахідного ходового гвинта: $d_{sp} = 6 \text{ мм}$;

Крок різьби гвинта: $P_h = 2 \text{ мм} = 0.002 \text{ м}$;

Коефіцієнт корисної дії (ККД) гвинтової пари (сталь — бронза): $\eta = 0.3$;

Розрахункове осьове зусилля (з урахуванням сили вдавлювання $P_{\max} = 3 \text{ Н}$, сил тертя в кулькових напрямних та ваги каретки): $F_a = 30 \text{ Н}$.

Кінематичний розрахунок

Необхідна частота обертання ходового гвинта (n , об/с) для забезпечення заданої лінійної швидкості руху обчислюється як:

$$n = \frac{v}{P_h} = \frac{10 \text{ мм/с}}{2 \text{ мм}} = 5 \text{ об/с}$$

Частота обертання, виражена у хвилинах (RPM):

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{\text{ХВ}} = 5 \cdot 60 = 300 \text{ об/хв}$$

Кутова швидкість обертання валу приводу (ω , рад/с) становить:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot 3.1416 \cdot 5 = 31.42$$

Силовий розрахунок та визначення обертового моменту

Крутний момент, який двигун повинен розвивати на ходовому гвинті для подолання прикладеного навантаження та сил внутрішнього тертя в різьбі ($M_{\text{необх}}$, Н·м), обчислюється за фундаментальною формулою механіки:

$$M_{\text{необх}} = \frac{F_a \cdot P_h}{2 \cdot \pi \cdot \eta}$$

Підставляючи вихідні числові значення, отримуємо:

$$M_{\text{необх}} = \frac{30 \cdot 0.002}{2 \cdot 3.1416 \cdot 0.3} = \frac{0.06}{1.8850} \approx 0.0318 \text{ Н} \cdot \text{м} = 3.18 \text{ Н} \cdot \text{см}$$

Для компенсації динамічних навантажень під час пуску/розгону та повного виключення ризику пропуску кроків вводиться коефіцієнт інженерного запасу $K_z = 2.0$. Розрахунковий момент пуску становить:

$$M_{\text{розр}} = M_{\text{необх}} \cdot K_z = 3.18 \cdot 2.0 = 6.36 \text{ Н} \cdot \text{см} = 0.0636 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Враховуючи отримане значення моменту та вимоги компактності, для реалізації приводу обрано кроковий двигун стандарту NEMA 17 (модель

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

42BYGHW609), який має значний номінальний утримуючий момент (0.4 Н·м), що забезпечує високу надійність.

Розрахунок дискретності та прецизійності ходу індентора

Керування двигуном реалізується за допомогою 32-бітного мікроконтролера STM32F103 (72 МГц) та драйвера Allegro A4988, що налаштований у режим мікрокроку 1/16.

Загальна кількість мікрокроків на один оберт валу при базовому кроці двигуна 1.8° (200 кроків/оберт):

$$N = 200 \cdot 16 = 3200 \text{ мікрокроків/об}$$

Дискретність (мінімальний механічний крок) лінійного переміщення каретки (Δ_s) становить:

$$\Delta_s = \frac{P_h}{N} = \frac{2 \text{ мм}}{3200} = 0.000625 \text{ мм} = 0.625 \text{ мкм}$$

3.2.5 Покроковий розрахунок елементів схеми узгодження індуктивного датчика переміщення на базі спеціалізованої IC AD598

Для демодуляції, фільтрації та масштабування сигналу диференціально-трансформаторного датчика лінійних переміщень (LVDT) Solartron обрано спеціалізовану інтегральну мікросхему AD598.

Вихідні дані для розрахунку:

Робочий хід осердя датчика: $d = \pm 1.0 \text{ мм}$;

Чутливість датчика: $S = 100 \text{ мВ/В/мм} = 0.1 \text{ В/В/мм}$;

Смуга пропускання механічної системи: $f_s = 100 \text{ Гц}$;

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Необхідний діапазон вихідної напруги для АЦП: $V_{OUT} = 0...5$ В}
(центральне положення 2.5 В);

Номінальне відношення напруг на котушках (VTR'): 1.5;

Напруга двополярного живлення мікросхеми: ± 15 В.

Обґрунтування частотних параметрів схеми

Частота внутрішнього синусоїдального генератора збудження мікросхеми AD598 (f_{EXC}) повинна мінімум у 10 разів перевищувати максимальну смугу пропускання вимірювальної системи (f_s = 100 Гц). З метою стабільної роботи магнітного тракту котушок Solartron обираємо частоту збудження:

$$f_{EXC} = 2500 \text{ Гц} = 2.5 \text{ кГц}$$

Для забезпечення високого відношення сигнал/шум та стабільної амплітуди на котушках приймаємо середньоквадратичне значення напруги живлення первинної обмотки давача: $V_{EXC} = 5.0$ В (RMS).

Розрахунок частотозадаючих та фільтруючих компонентів

Резистор R1: Задає амплітуду вихідного синусоїдального сигналу генератора. Відповідно до технічної документації AD598, для отримання $V_{EXC} = 5.0$ В при живленні ± 15 В номінал становить:

$$R_1 = 4.7 \text{ кОм}$$

Конденсатор C1: Визначає частоту внутрішньої генерації (f_{EXC} = 2500 Гц). Розрахунок за номограмою виробника дає значення:

$$C_1 = 15 \text{ нФ}$$

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фільтруючі конденсатори C2, C3, C4: Утворюють пасивні низькочастотні фільтри другого порядку для випрямлених сигналів вторинних котушок. Обчислення за формулою методичних вказівок:

$$C_2 = C_3 = C_4 = \frac{100 \text{ мкФ} \cdot \text{Гц}}{f_s} = \frac{100}{100} = 1.0 \text{ мкФ}$$

Розрахунок параметрів масштабування та зсуву рівня

Резистор R2 визначає коефіцієнт підсилення вихідного каскаду AD598 так, щоб максимальне відхилення осердя на $d = 1.0$ мм викликало динамічну зміну напруги на 2.5 В. Розрахунок проводиться за формулою:

$$R_2 = \frac{V_{OUT_MAX} - V_{OUT_MID}}{S \cdot d \cdot VTR' \cdot 500 \text{ мкА}}$$

Підставляємо числові значення:

$$R_2 = \frac{2.5 \text{ В}}{0.1 \cdot 1 \cdot 1.5 \cdot 0.0005 \text{ А}} = \frac{2.5}{0.000075} = 33333 \text{ Ом}$$

Обираємо найближчий стандартний номінал із ряду E24: $R_2 = 33 \text{ кОм}$.

Оскільки вихідний каскад за замовчуванням формує двополярний сигнал (-2.5... +2.5 В), а вбудований АЦП мікроконтролера STM32 працює виключно в однополярному діапазоні (0 ... 5 В), необхідно виконати зміщення нульової точки на +2.5 В. Для цього на інвертуючий вхід інтегрованого операційного підсилювача через резисторний дільник R3, R4

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подається напруга позитивного плеча живлення (+15 В). При заданому значенні $R_2 = 33 \text{ кОм}$ розраховані точні номінали становлять:

$$R_3 = 200 \text{ кОм}, \quad R_4 = 200 \text{ кОм}$$

Функціональна схема

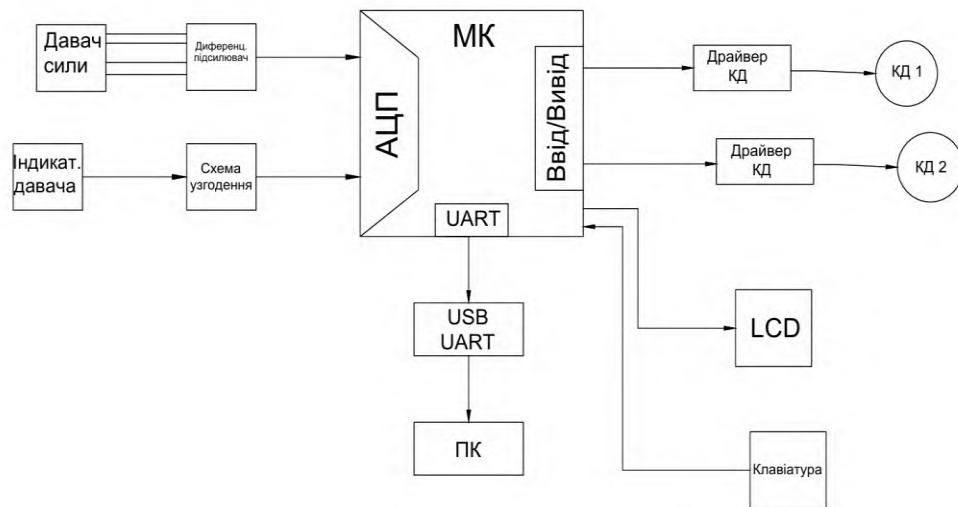


Рисунок 3.4 - Принципова електрична схема вузла узгодження LVDT-датчика на базі IC AD598

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз потенційних виробничих небезпек та забезпечення комплексної електробезпеки при експлуатації та обслуговуванні диференціального склерометра

Вступ та аналіз небезпечних факторів. Диференціальний склерометр є складною електронно-механічною системою, експлуатація якої пов'язана з наявністю низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ) відповідно до ДСТУ 12.0.003-80. Основними джерелами небезпеки є:

Фізичні фактори: підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини; рухомі елементи виконавчих механізмів; гострі кромки алмазного індентора та базового щупа; підвищена температура поверхонь силових ключів драйвера та радіаторів охолодження.

Психофізіологічні фактори: напруження зору під час позиціонування індентора на мікроструктурних фазах шліфа, монотонність праці при серійному контролі деталей.

Класифікація приміщення та аналіз ризику електротравматизму. Найбільшу загрозу для життя та здоров'я оператора становить електричний струм. Електронний блок керування (ЕБК) та імпульсне джерело живлення склерометра підключаються до однофазної мережі змінного струму промислової частоти напругою $U = 220\text{В} (\pm 10\%)$ з частотою $f = 50 \text{ Гц}$. Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), за ступенем небезпеки ураження електричним струмом лабораторне приміщення, де розташована установка, класифікується як приміщення без підвищеної небезпеки (якщо відсутні сирість, висока температура, струмопровідний пил та можливість одночасного дотику до металевих конструкцій будівлі та корпусу приладу) або з підвищеною небезпекою (за наявності залізобетонної чи металеві підлоги, великої кількості заземленого обладнання).

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Небезпека ураження струмом виникає при пошкодженні ізоляції первинної обмотки силового трансформатора або імпульсного блоку живлення, що призводить до появи потенціалу на металевому корпусі ЕБК чи станині склерометра. При двофазному або однофазному дотику людини до струмопровідних частин через її тіло замикається електричний ланцюг. Сила струму, що проходить через людину, визначається за формулою:

$$I = (U_{ph}) / (R_h + R_0)$$

де U_{ph} — фазна напруга мережі (220 В); R_h — електричний опір тіла людини (при розрахунках приймається рівним 1000 Ом); R_0 — опір ізоляції та взуття (у найгіршому випадку наближається до нуля). Таким чином, при прямому дотику струм може досягти $I_h = 220 / 1000 = 0.22 \text{ А} = 220 \text{ мА}$. Оскільки фібриляційний поріг струму промислової частоти становить 100 мА, такий вплив є смертельно небезпечним і викликає зупинку серця протягом 0.1–0.2 с.

Технічні та організаційні заходи забезпечення електробезпеки. Для виключення ризику електротравматизму в конструкції диференціального склерометра реалізовано комплекс інженерно-технічних засобів захисту:

Захисне заземлення та занулення. Відповідно до ДСТУ EN 61140:2015, склерометр відноситься до приладів I класу захисту. Металевий корпус імпульсного блоку живлення, несуча алюмінієва станина приладу та захисний кожух ЕБК жорстко з'єднані із захисним провідником (РЕ) трижильного силового кабелю через стандартну вилку із заземлюючим контактом типу Schuko (CEE 7/7). Опір захисного заземлення в лабораторії не повинен перевищувати $R_z \leq 4 \text{ Ом}$. У разі пробією фази на корпус виникає струм короткого замикання, що призводить до миттєвого спрацьовування плавкого запобіжника (номіналом 2А), встановленого на задній панелі ЕБК, або автоматичного вимикача на розподільному щитку.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Захисне відключення (ПЗВ). Лінія живлення лабораторного стенда обов'язково захищається пристроєм захисного відключення (диференційним автоматом) із номінальним струмом спрацьовування

$\Delta I_n \leq 30$ мА та часом відключення не більше 0.04 с. Це гарантує безпеку оператора навіть при прямому випадковому дотику до пошкодженого дроту.

Захисна ізоляція та оболонки. Усі високовольтні вузли всередині ЕБК (вхідні клеми живлення, вимикач, плата фільтра завад) ізолювані термоусадочними трубками з діелектричною міцністю не менше 10 кВ/мм. Корпус ЕБК забезпечує ступінь захисту не нижче IP40 за ДСТУ EN 60529:2018, що унеможлиблює випадковий доступ пальців оператора чи інструменту до струмопровідних частин. Вторинні ланцюги живлення мікроконтролера STM32F103 (3.3 В, 5 В) та драйверів крокових двигунів (12–24 В) є гальванічно ізолюваними від промислової мережі за допомогою імпульсного трансформатора БЖ (напруга ізоляції не менше 1500 В), що забезпечує безпеку при відлагодженні приладу через інтерфейс USB.

Організаційні заходи. До роботи з диференціальним склерометром допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, вступний та первинний інструктаж на робочому місці з охорони праці, мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче II. Перед початком роботи оператор зобов'язаний візуально перевірити цілісність ізоляції кабелів, надійність фіксації авіаційних роз'ємів GX16/GX12 та наявність заземлення. Забороняється проводити заміну зразків, регулювання механіки чи обслуговування плат драйверів при увімкненому живленні приладу.

4.2 Організація системи пожежної безпеки в лабораторії при експлуатації склерометра та заходи цивільного захисту

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз пожежної небезпеки об'єкта. Науково-дослідна або заводська лабораторія, в якій проводяться випробування гетерогенних матеріалів за допомогою диференціального склерометра, відноситься до категорій приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою Категорія В (помірна пожежна небезпека) згідно з НАПБ Б.03.002-2007. Клас зони за ПУЕ — П-Па, оскільки в приміщенні знаходяться тверді горючі речовини (пластикові елементи ЕБК, ізоляція кабелів, дерев'яні меблі, паперова документація, методичні вказівки, етиловий спирт для знежирення та промивання металевих шліфів).

Основними технічними причинами виникнення пожежі (джерелами запалювання) під час експлуатації склерометра є:

Теплове перевантаження електронних компонентів: драйвери крокових двигунів А4988 при робочому струмі 1.7 А виділяють понад 3 Вт теплової потужності. У разі неефективного відведення тепла (відклеювання алюмінієвого радіатора, відсутність вентиляційних отворів у корпусі) температура кристала мікросхеми може перевищити критичну межу, що призведе до пробію транзисторів Н-моста, оплавлення текстоліту друкованої плати та займання пластикового корпусу.

Коротке замикання: виникає внаслідок механічного перетирання ізоляції жил кабелів крокових двигунів у гнучких кабель-каналах під час циклічних рухів каретки, а також через електричний пробій елементів імпульсного блоку живлення. Струм короткого замикання викликає миттєве локальне виділення тепла з температурою до 2000–3000°C, що призводить до розбризкування розплавленого мідного провідника та займання навколишніх матеріалів.

Великий перехідний опір: утворюється в місцях неякісного паяння або послаблення гвинтових клемних затискачів живлення, що викликає локальне нагрівання контактів до температур самозаймання ізоляції.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Профілактичні інженерно-технічні пожежні заходи. Система пожежного захисту лабораторії базується на вимогах НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Для запобігання пожежам реалізовано такі заходи:

Електронний захист: драйвер А4988 має вбудовану схему термічного захисту (Thermal Shutdown), яка автоматично вимикає виходи при досягненні температури кристала 165°C. Імпульсний блок живлення оснащений захистом від короткого замикання (Short Circuit Protection) та перевантаження по струму (Overload Protection) — при виникненні замикання блок переходить у режим генерації коротких пачок імпульсів (Hiccup mode) або повністю вимикається, знижуючи вихідну потужність до нуля.

Конструктивні матеріали: корпус ЕБК та захисні кожухи виготовляються з негорючих матеріалів — листового алюмінію або спеціального самозатухаючого ABS-пластику (клас горючості UL94-V0), який не підтримує горіння за відсутності зовнішнього полум'я. Усі внутрішні з'єднання виконано дротами з ізоляцією, що не поширює горіння (наприклад, марки ПВ-3 або силіконові термостійкі дроти типу AWG).

Активний пожежний захист та цивільний захист. Лабораторне приміщення обладнується автоматичною пожежною сигналізацією на базі сповіщувачів пожежних димових (наприклад, типу СПД-3.2). При виявленні продуктів згоряння (диму) сигналізація видає звуковий сигнал та передає імпульс на пульт централізованого спостереження, а також автоматично знеструмлює силову розеткову мережу лабораторії.

Для ліквідації первинних осередків пожежі в приміщенні встановлюється пожежний щит. Оскільки гасіння пожежі може відбуватися в електронних блоках під напругою, категорично заборонено використовувати воду або пінні вогнегасники. Лабораторія комплектується двома вуглекислотними вогнегасниками типу ВВ-3 (ОУ-5) або порошковими ВП-5, що дозволяють гасити електроустановки під напругою до 1000 В.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вуглекислота не пошкоджує прецизійну оптику, LVDT-давач Solartron та мікропроцесорні плати, швидко знижуючи температуру в зоні горіння та витісняючи кисень.

Дії персоналу при виникненні НС (Пожежі):

Негайно припинити роботу, знеструмити диференціальний склерометр за допомогою головного вимикача або висмикнувши вилку з розетки (якщо це безпечно).

Повідомити пожежну охорону за телефоном «101», вказавши адресу, місце загоряння та своє прізвище.

Організувати евакуацію людей згідно зі схемою евакуації, затвердженою для лабораторного корпусу. Шляхи евакуації (коридори, двері) повинні бути вільними від сторонніх предметів.

Приступити до гасіння пожежі за допомогою наявних вуглекислотних вогнегасників, спрямовуючи струмінь CO₂ безпосередньо у внутрішню порожнину корпусу ЕБК через вентиляційні отвори.

4.3. Обґрунтування ергономічних вимог до робочого місця та розробка комплексної інструкції з охорони праці для оператора диференціального склерометра

Обґрунтування актуальності ергономічного забезпечення. Взаємодія оператора з диференціальним склерометром є прикладом складної діяльності у системі «людина — комп'ютер — вимірювальний прилад». Оскільки процес дослідження гетерогенних структур матеріалів методом індентування вимагає тривалого перебування у сидячому положенні, високої концентрації уваги при позиціонуванні зразків під алмазним індентором та безперервного аналізу графіків на моніторі ПК, виникає ризик прояву психофізіологічних небезпечних і шкідливих виробничих факторів. До них належать: зорове перевтомлення (астенопія), статичне перенавантаження опорно-рухового

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

апарату, монотонність праці та нервово-емоційне напруження. Раціональна організація робочого простору та чітке дотримання регламенту безпеки є основними безкалькуляційними інженерними методами зниження цих ризиків.

Ергономічні вимоги до організації робочої зони. Просторова організація робочого місця оператора склерометра розроблена відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 та ДСТУ EN ISO 9241 і базується на концепції моторних зон:

Зона оптимальної досяжності (ближня зона): Охоплює простір у межах 300–400 мм від тулуба оператора. Тут розміщуються клавіатура, маніпулятор «миша» та блок кнопок ручного керування на лицьовій панелі електронного блока склерометра. Це мінімізує кількість зайвих рухів і знижує статичне навантаження на плечовий пояс.

Зона максимальної досяжності (дальня зона): Охоплює простір у межах 500–700 мм. На цій відстані встановлюється безпосередньо механічна вимірювальна установка склерометра (праворуч від оператора) та рідкокристалічний дисплей ПК (прямо по центру). Таке розташування екрана ПК є оптимальним для збереження фокусної відстані ока та запобігання розвитку короткозорості.

Організація сидіння: Застосовується крісло з регульованими параметрами. Нахил спинки встановлюється на рівні 100° – 105° , що дозволяє перенести частину ваги тіла з хребта на спинку крісла. Висота сидіння налаштовується так, щоб кут у колінному суглобі становив 90° – 100° , а стопи повністю спиралися на підлогу або спеціальну підставку.

Інструкція з охорони праці для оператора диференціального склерометра

Загальні вимоги безпеки

До самостійної роботи з диференціальним склерометром допускаються особи віком не молодше 18 років, які мають вищу або середню технічну

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

освіту, пройшли медичний огляд (за відсутністю протипоказань), вступний та первинний інструктажі з охорони праці та пожежної безпеки, а також мають II групу з електробезпеки.

Оператор зобов'язаний знати будову приладу, принципи роботи мікроконтролерного блока керування STM32F103, драйверів крокових двигунів A4988, індуктивного давача Solartron та спеціалізованого програмного забезпечення на ПК. Під час роботи на оператора можуть впливати такі небезпечні фактори: дія електричного струму (лінія живлення 220 В), гострі кромки робочого органу (алмазного індентора), рухомі частини механічного приводу, підвищена температура радіаторів ЕБК, а також статичне навантаження. Робоче місце повинно утримуватися в чистоті. Не допускається захаращення проходів, зберігання сторонніх предметів на станині приладу або корпусі ЕБК. Про кожну несправність обладнання оператор повинен негайно сповістити керівника лабораторії. Працювати з несправним приладом категорично заборонено.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Привести в порядок робочий одяг, застібнути манжети рукавів, прибрати звисаючі прикраси, довге волосся сховати під головний убір, щоб унеможливити їх потрапляння в рухому каретку приводу вертикального переміщення. Візуально перевірити цілісність корпусу електронного блока керування, станини склерометра, монітора ПК та ізоляції всіх з'єднувальних кабелів. Переконалися у надійності підключення авіаційних роз'ємів GX16 від крокових двигунів NEMA 17 та індуктивного давача до ЕБК, а також інтерфейсного кабелю USB-UART до комп'ютера. Перевірити наявність та надійність заземлюючого провідника (РЕ) у силовій розетці та заземлення станини склерометра. Увімкнути загальне та місцеве штучне освітлення, переконалися у відсутності бликів на екрані монітора. Перевірити відсутність сторонніх предметів у зоні переміщення предметного столика та каретки навантаження.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимоги безпеки під час роботи

Увімкнення приладу в мережу здійснювати тільки сухою рукою за допомогою штатної вилки силового кабелю. Запуск циклу вимірювання (дряпання або вдавлювання) дозволяється виконувати лише після надійної фіксації досліджуваного гетерогенного зразка у лещатах або на предметному столику склерометра. Категорично забороняється:

Торкатися руками рухомих частин приладу (вала ходового гвинта, напрямних, каретки) під час відпрацювання кроковими двигунами команд мікроконтролера.

Виконувати ручну заміну, очищення або юстикування алмазного індентора при увімкненому живленні силової частини драйверів двигунів.

Перекривати вентиляційні отвори на корпусі електронного блока, оскільки це призведе до перегріву силових ключів А4988 та виходу з ладу ЕБК із ризиком короткого замикання.

Проводити вимірювання на зразках, габарити або вага яких перевищують технічні характеристики предметного столика приладу. При роботі з програмним забезпеченням ПК оператор повинен дотримуватися раціонального режиму праці: після кожної години безперервної роботи за монітором необхідно робити регламентовану перерву тривалістю 10 хвилин для виконання комплексу вправ для очей та розвантаження м'язів спини. Не залишати увімкнений диференціальний склерометр без нагляду.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

При виявленні будь-яких ознак аварійної ситуації (поява запаху горілої ізоляції чи пластику, нехарактерний сильний шум або стукіт крокових двигунів, відчуття дії електричного струму при дотику до металевої станини, раптове припинення індикації на LCD) оператор зобов'язаний негайно натиснути кнопку аварійної зупинки (Emergency Stop) або повністю знеструмити прилад, витягнувши вилку з розетки. У разі виникнення пожежі (займання в ЕБК чи блоці живлення), знеструмити установку і приступити до

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гасіння осередку за допомогою вуглекислотного вогнегасника типу ВВ-3 (ОУ-5). Використання води або пінних вогнегасників для гасіння електроніки під напругою суворо заборонено. Викликати пожежну службу за телефоном «101». При отриманні травми (наприклад, випадковий поріз чи прокол пальця алмазним індентором або гострою кромкою станини), припинити роботу, скористатися лабораторною аптечкою першої допомоги, обробити рану антисептиком, накласти стерильну пов'язку та звернутися до медичного закладу. При ураженні іншої особи електричним струмом — негайно знеструмити обладнання (вимкнути автомат, висмикнути кабель). Якщо це неможливо, звільнити потерпілого від дії струму за допомогою діелектричних засобів (сухої дерев'яної палиці, гумових рукавичок). Викликати швидку допомогу за телефоном «103» і до її прибуття, за потреби, розпочати серцево-легеневу реанімацію.

Вимоги безпеки після закінчення роботи

Через інтерфейс програмного забезпечення ПК перевести рухому каретку склерометра у початкове (безпечне) верхнє положення за допомогою кінцевих вимикачів. Послідовно вимкнути тумблер живлення на задній панелі ЕБК, закрити керуючу програму на ПК та вимкнути комп'ютер. Відключити кабель живлення склерометра від розетки мережі 220 В. Обережно демонтувати досліджений зразок із предметного столика. Провести очищення робочих поверхонь приладу від пилу та мікрочастинок матеріалу за допомогою спеціального м'якого пензлика (категорично заборонено здувати пил ротом, щоб уникнути потрапляння частинок в очі чи в прецизійний індуктивний давач). Прибрати робоче місце, скласти інструменти та шліфи у відведені місця зберігання. Вимкати освітлення та вентиляцію. Доповісти керівнику робіт про завершення експлуатації склерометра та відсутність зауважень.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра вирішено актуальне науково-технічне завдання - розроблено конструкцію, апаратно-програмне забезпечення та методику досліджень для автоматизованого диференціального склерометра. За результатами виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

На основі аналітичного огляду доведено, що жоден із класичних статичних методів індентування (Брінелля, Роквелла, Віккерса) не задовольняє повною мірою вимоги сучасного виробництва щодо неруйнівного та репрезентативного експрес-контролю гетерогенних сплавів. Обґрунтовано доцільність застосування диференціального склерометричного методу, який завдяки попередньому і основному навантаженню та лінійному переміщенню індентора дозволяє усереднювати властивості матеріалу вздовж траси та нівелювати вплив шорсткості поверхні.

Розроблено модульну конструкцію механічної частини склерометра. Здійснено кінематичний та силовий розрахунки прецизійного електромеханічного приводу вертикального переміщення на базі крокового двигуна NEMA 17 із розрахунковим пусковим моментом 0.0636 Н·м. Спроектовано електронний вимірювальний тракт, центральною ланкою якого є прецизійний індуктивний LVDT-давач Solartron та вузол демодуляції і узгодження на базі мікросхеми AD598. Розрахована сумарна інструментальна та методична похибка вимірювального тракту лінійних переміщень не перевищує 0.1705%.

Обґрунтовано структурну та функціональну організацію електронного блоку керування на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F103, що координує роботу виконавчих механізмів, збір даних з АЦП та розрахунок твердості за енергетичним законом деформування. Для аналізу динаміки роботи приладу створено імітаційну математичну модель у середовищі MATLAB на основі стохастичних мереж Петрі. Моделювання підтвердило

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відсутність ефекту «заклинювання» черги деталей та дозволило оптимізувати часові профілі системних таймерів.

Виконано комплексний аналіз потенційних виробничих небезпек та розроблено інструкцію з охорони праці для оператора склерометра. Для гарантування електробезпеки передбачено застосування захисного заземлення (І клас захисту), пристроїв захисного відключення (ПЗВ) зі струмом спрацьовування 30 мА та гальванічної ізоляції мікроконтролерних кіл. Обґрунтовано застосування вуглекислотних вогнегасників типу ВВ-3 (ОУ-5) для ліквідації осередків займання електронних компонентів під напругою, а також визначено вимоги до ергономічної організації робочого простору оператора.

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Паламар М. І., Наконечний Ю. І. Прецизійні інформаційно-вимірювальні системи кінематичного індентування та позиціонування. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2023. Т. 109, № 1. С. 78–87.
2. Kanno T., Maruyama Y. Relationship between Hardness and Mechanical Properties in Cast Iron. Journal of the Japan Foundry Engineering Society. 2005. Vol. 77, No. 12. P. 833–840.
3. Umemoto M. Relationship between Hardness and Tensile Properties in Various Single-Structured Steels. Journal of Materials Science. 2001. Vol. 36. P. 547–554.
4. Наконечний Ю. І. Апаратно-програмні засоби автоматизації вимірювання твердості структурно-неоднорідних матеріалів та сплавів. Вимірювальна техніка та метрологія. 2022. Вип. 83. С. 42–49.
5. Intrinsic Correlation between Hardness and Elasticity in Polycrystalline Materials and Bulk Metallic Glasses / X.-Q. Chen et al. arXiv preprint. 2011. arXiv:1105.1002.
6. Яворська М. І., Апостол Ю. О. Оцінювання інструментальних та методичних похибок мікропроцесорних приладів неруйнівного контролю. Контроль і управління в складних системах. 2021. № 2. С. 55–63.
7. Heterogeneous Microstructure and Tensile Properties of an Austenitic Stainless Steel / MDPI Metals. 2024. Vol. 14, No. 2. P. 115–123.
8. Mechanical Properties and Deformation Mechanisms of Heterostructured Alloys. Frontiers in Materials Review. 2021. Vol. 8. Art. 642301.
9. AD598: LVDT Signal Conditioner Datasheet. Analog Devices.: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD598.pdf> (дата звернення: 4.04.2026).
10. STM32F103xC, STM32F103xD, STM32F103xE Reference Manual. STMicroelectronics. : https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-

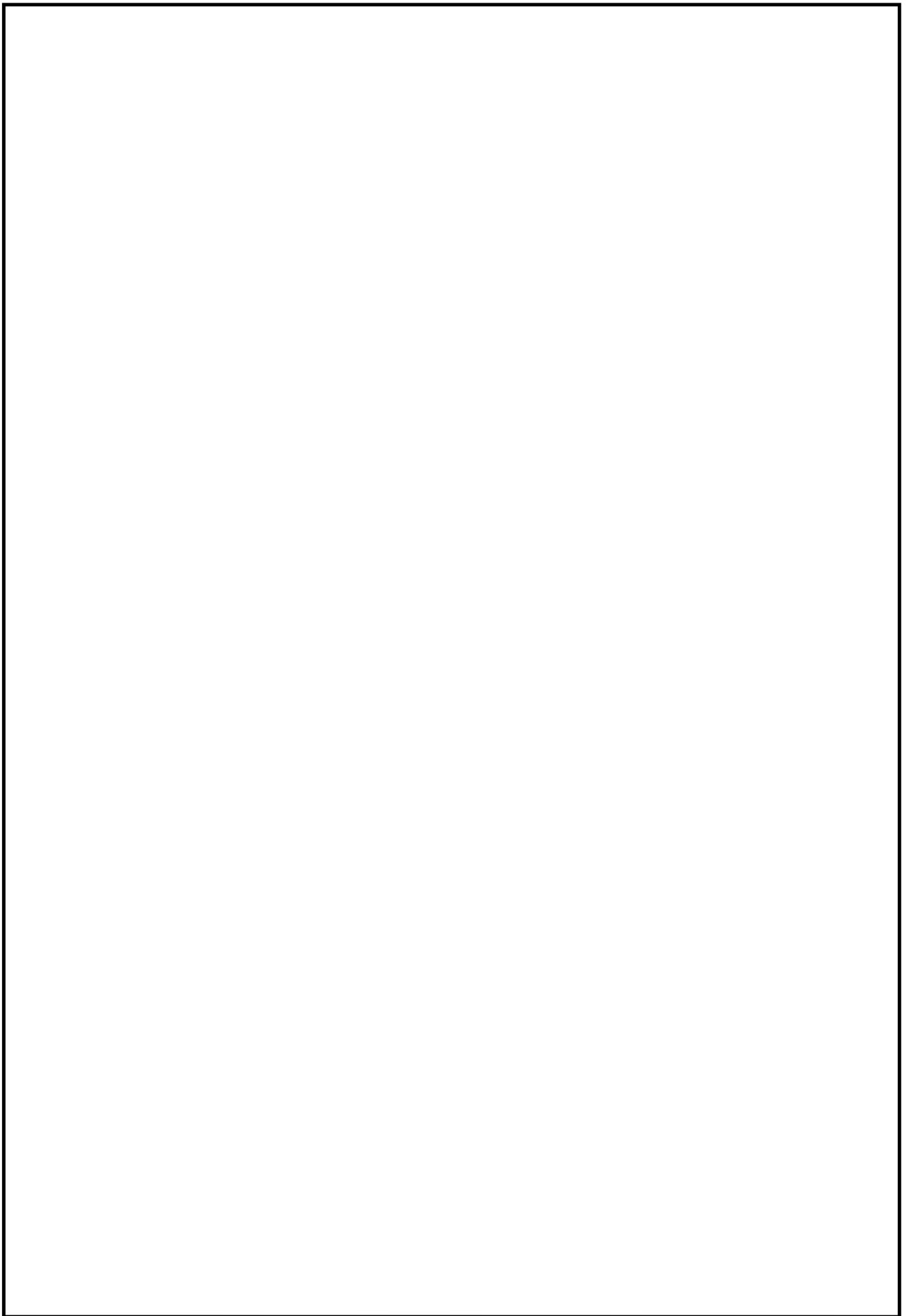
					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf (дата звернення: 17.05.2026).

11. Solartron Metrology. Linear Variable Differential Transducers (LVDT) Catalog.:<https://www.solartronmetrology.com/docs/default-source/catalogs/solartron-linear-sensors.pdf> (дата звернення: 02.06.2026).

12. Ткаченко О. М. Застосування стохастичних мереж Петрі для моделювання дискретно-неперервних процесів у вимірювальних системах. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2022. № 1. : <https://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/1245> (дата звернення: 28.05.2026).

					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					КРБ 028.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ДОДАТКИ

Керівник: Паламар М. І.

Консультант: Наконечний Ю.І

Консультант: Яворська М. І.

Консультант: Стрембіцький М. О.

Нормоконтроль: Апостол Ю.О.

Затвердив: Паламар М. І.

Рецензент:

Форма	Зона.	Поз.	Найменування	Найменування	Кіл.	Примітка	
				<u>Документація</u>			
A1			КРБ 028.00.00.000.СБ	Складальне креслення			
				<u>Складальні одиниці</u>			
		1	КРБ 028.01.00.000	Механізм зажиму	2		
		2	КРБ 028.02.00.000	Стрічка	1		
		3	КРБ 028.03.00.000	Датчик сили	1		
		4	КРБ 028.04.00.000	Сепаратор	2		
		5	КРБ 028.05.00.000	Гвинт	1		
		6	КРБ 028.06.00.000	Кронштейн	1		
		7	КРБ 028.07.00.000	Блок тензобалок	1		
		8	КРБ 028.08.00.000	Стійка	1		
		9	КРБ 028.09.00.000	Сепаратор	2		
				<u>Деталі</u>			
		10	КРБ 028.00.00.001	Обмежувач	8		
		11	КРБ 028.00.00.002	Кранштейн	1		
		12	КРБ 028.00.00.003	Опора	1		
		13	КРБ 028.00.00.004	Платформа	1		
		14	КРБ 028.00.00.005	Підставка	1		
		15	КРБ 028.00.00.006	Муфта	1		
		16	КРБ 028.00.00.007	Перехідник	1		
		17	КРБ 028.00.00.008	Втулка	2		
		18	КРБ 028.00.00.009	Опора	1		
		19	КРБ 028.00.00.010	Гвинт	1		
		20	КРБ 028.00.00.011	Плита нижня	1		
				КРБ 028.00.00.000			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
Розроб.		Дяченко М. С.			Літ.	Арк.	Аркуші
Перевір.		Паламар М. І.				1	3
Н. Контр.		Апостол.Ю.О			ФПТ, гр. РН-41		
Затверд.		Паламар М. І.					
Рецензент							
					Прилад для визначення середньозваженої твердості гетерогенних сплавів		

