

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Владислав ШЛИКОВ

«___» _____ 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою Медична інженерія

спеціальності 163 Біомедична інженерія

**на тему: «Динамічна спекл-структура для оптичної реконструкції тривимірних
зображень»**

Виконав:

студент IV курсу, групи БМ-11

Яницький Денис Тарасович

Керівник:

Доцент каф. БМІ, к.т.н.

Богомолів Микола Федорович

=====

Консультант з охорони праці:

Доцент каф. ОППЦБ, к.т.н., доцент

Демчук Гліб Вікторович

Рецензент:

проф. каф. ББЗЛ, д.п.н., проф.,

Вихляєв Юрій Миколайович.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Факультет біомедичної інженерії
Кафедра біомедичної інженерії**

Рівень вищої освіти
Спеціальність
Освітньо-професійна програма

Перший (бакалаврський)
163 Біомедична інженерія
Медична інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Владислав ШЛИКОВ

«___» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту**

Яницький Денис Тарасович

1. Тема роботи Модель динамічної спекл-структури для оптичної реконструкції тривимірних зображень.

керівник роботи Богомолів Микола Федорович, доцент каф. БМІ, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. №1758-с

2. Термін подання студентом роботи «13» червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Методика голографічної реконструкції 3D-зображення у режимі відбиття з використанням динамічної спекл-структури; оптичні та електронні компоненти (лазер, ПЗС-камера, двигуни з енкодерами); програмне забезпечення *Arduino IDE, Python (NumPy, PIL, matplotlib, numpy-stl), Fritzing, TinkerCad*; метод реконструкції за алгоритмом Френеля з використанням ШПФ.

4. Зміст дипломної роботи: огляд літератури з цифрової голографії, принципів інтерференції та реконструкції зображень; аналіз існуючих методів голографічної зйомки у режимі відбиття; розробка макету пристрою з обертальною оптичною системою; проєктування електронної та оптичної частини установки; реалізація програмного забезпечення для реконструкції 3D-зображення з голограм.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація у форматі MS Power Point.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
3	Демчук Г.В., к.т.н., доцент кафедри ОППЦБ		

7. Дата видачі завдання 5 квітня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на ДР	14 квітня 2025 р.	
2	Ознайомлення з технікою безпеки	17-22 квітня 2025 р.	
3	Огляд літератури за темою	17-29 квітня 2025 р.	
4	Підбір необхідних компонентів для приладу	24-29 квітня 2025 р.	
5	Розробка макету і програмного забезпечення приладу	29 квітня -20 травня 2025 р.	
6	Проходження нормоконтролю по оформленню ДР	9 червня 2025 р.	
7	Подання ДР рецензенту. Отримання рецензії	10 червня 2025 р.	
8	Подання в електронному вигляді ДР та анотації	10 червня 2025 р.	
9	Захист ДР	19 червня 2025 р.	

Студент _____

Денис ЯНИЦЬКИЙ

Керівник дипломної роботи _____

Микола БОГОМОЛОВ

АНОТАЦІЯ

Обсяг дипломної роботи становить 61 сторінка, міститься 10 ілюстрацій, 8 таблиць і 2 додатки. Загалом опрацьовано 30 джерел.

Актуальність:

цифрова голографія є перспективним методом отримання тривимірних зображень, що забезпечує фіксацію амплітудно-фазової структури хвильового фронту та його чисельну реконструкцію. Завдяки розвитку сенсорів і обчислювальних засобів вона знайшла широке застосування в мікроскопії, фазовій візуалізації, метрології та 3D-відображенні. Однак ключовою перешкодою лишається спекл-шум, спричинений когерентною природою лазерного випромінювання, який погіршує якість реконструкцій. Оскільки універсального способу його усунення не існує, пошук ефективних методів придушення спекл-шуму залишається актуальною задачею.

Мета роботи: Удосконалення програмно-апаратної системи цифрової голографічної для реконструкції тривимірних зображень.

Завдання:

1. Проаналізувати теоретичні основи цифрової спекл-голографії та методів реконструкції.
2. Розробити апаратну частину для керованого формування змінного спекл-візерунка.
3. Реалізувати програмну логіку управління дифузором і платформою з використанням *Arduino*.

Розроблено експериментальну апаратну схему для формування керованих змінних спекл-візерунків. Запропонована схема реалізує зміну фази та інтенсивності світлового хвильового фронту за допомогою просторового фазового модулятора (наприклад, цифрового мікродзеркального пристрою) та дозволяє реєструвати послідовність спекл-голограм із різними випадковими фазовими масками. Чисельне моделювання реконструкцій тривимірних зображень із таких багатокадрових даних показало суттєве зниження рівня спекл-шуму порівняно з одноразовою голографічною реконструкцією.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленого підходу: при усередненні кількох реконструйованих зображень спостерігається суттєве підвищення якості тривимірної реконструкції за рахунок приглушення випадкових флуктуацій амплітуди та зменшення артефактів. Таким чином, застосування динамічної спекл-структури забезпечує покращення відображення об'єктної інформації та підвищення достовірності відновлення тривимірної структури.

Отримані результати мають практичне значення для подальшого розвитку систем цифрової голографії та методів шумоподавлення в оптичних системах. Запропоновані підходи можуть бути використані для поліпшення якості тривимірної візуалізації в задачах оптичної метрології, біомедичної візуалізації, доповненої реальності та інших галузях високотехнологічних наук.

Ключові слова: спекл-зображення, інтерференція когерентного світла, лазерна лабораторна діагностика, фільтрація сигналів, оптичні сенсори, оптична мікроскопія, тривимірна реконструкція.

ANNOTATION

The volume of the thesis is 61 pages, including 10 illustrations, 8 tables, and 2 appendices. A total of 30 sources were reviewed.

Relevance:

Digital holography is a promising method for obtaining three-dimensional images, as it allows for the capture of the complete amplitude-phase structure of the wavefront and its numerical reconstruction. Due to the development of modern sensors and computational tools, it has found wide application in microscopy, phase visualization, metrology, and 3D display technologies. However, one of the main obstacles remains speckle noise, caused by the coherent nature of laser radiation, which degrades the quality of the reconstructed images. Since no universal method for eliminating speckle noise has been established, the search for effective suppression techniques remains a relevant and pressing issue.

Objective of the work: To improve a digital holographic hardware-software system for three-dimensional image reconstruction.

Tasks:

1. To analyze the theoretical foundations of digital speckle holography and reconstruction methods.
2. To develop a hardware system for controlled generation of variable speckle patterns.
3. To implement control logic for the diffuser and platform using Arduino.

An experimental hardware setup was developed to generate controlled variable speckle patterns. The proposed system modifies the phase and intensity of the optical wavefront using a spatial phase modulator (e.g., a digital micromirror device) and enables the recording of a sequence of speckle holograms with different random phase masks. Numerical modeling of 3D image reconstructions from such multi-frame data demonstrated a significant reduction in speckle noise compared to single-frame holographic reconstruction.

Experimental studies confirmed the effectiveness of the proposed approach: by averaging several reconstructed images, a notable improvement in the quality of 3D

reconstruction was observed, due to the suppression of random amplitude fluctuations and reduction of artifacts. Thus, the use of a dynamic speckle structure enhances the visualization of object information and increases the reliability of reconstructing three-dimensional structures.

The results obtained are of practical significance for the further development of digital holography systems and noise suppression methods in optical systems. The proposed approaches can be applied to improve the quality of 3D visualization in optical metrology, biomedical imaging, augmented reality, and other high-tech scientific fields.

Keywords: speckle imaging, coherent light interference, laser laboratory diagnostics, signal filtering, optical sensors, optical microscopy, three-dimensional reconstruction.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	14
1.1 Основи цифрової голографії та оптичної реконструкції зображень.....	14
1.2 Спекл-структура та її вплив у голографічних системах.....	16
1.3 Методи зменшення спекл-шуму в цифровій голографії	18
1.4 Фазова реконструкція та фазозсувна голографія.....	20
1.5 Математичні методи обробки голограм у частотній області	22
1.6 Обґрунтування методу з рухомим джерелом світла.....	24
1.7 Цифрові методи аналізу та обробки даних.....	25
Висновок до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИЛАДУ	27
2.1 Архітектура пристрою	27
2.2 Принцип роботи	28
2.3 Оптична система	30
2.4 Електронна частина	32
2.5 Програмна частина.....	34
2.6 Моделювання роботи програмної частини.....	36
Висновок до розділу 2	39
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	41
3.1. Характеристика приладу.....	41
3.2. Оцінка потенційних небезпек, що створюються конструкцією приладу, та заходи їх усунення	45
3.3. Інструкція з техніки безпеки при експлуатації приладу.....	52
Висновок до розділу 3:.....	56
ВИСНОВКИ	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	59
ДОДАТКИ.....	62

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ПЗЗ	—	Пристрій із зарядовим зв'язком
КМОН(<i>CMOS</i>)	—	Комплементарний метал-оксид-напівпровідник

ВСТУП

Цифрова голографія сьогодні є одним із найперспективніших методів отримання тривимірних зображень об'єктів[1], оскільки дозволяє захоплювати повну комплексну амплітудно-фазову структуру хвильового фронту від об'єкта та після цього чисельно реконструювати зображення на основі зафіксованої інтерференційної картини. Завдяки використанню сучасних цифрових сенсорів і обчислювальних засобів цифрова голографія знайшла застосування в різноманітних галузях: від мікроскопії і кількісної фазової візуалізації біооб'єктів до оптичної метрології та 3D-дисплеїв[2]. Однак одним із ключових викликів, що стоять на заваді практичному застосуванню цієї технології, є спекл-шум, який неминуче виникає через когерентну природу лазерного випромінювання і випадкову інтерференцію від шорстких дифузних поверхонь об'єктів. В результаті на реконструйованих зображеннях з'являється зерниста структура – спекл-візерунок[1-5], який суттєво погіршує якість і завадостійкість отриманих 3D-зображень. За даними сучасних оглядів, універсальної стратегії повного усунення голографічного спекл-шуму досі не встановлено – проблема його придушення залишається «вузьким місцем» для оптичної та фотонної спільноти. Це обумовлює актуальність пошуку нових рішень підвищення якості голографічної реконструкції за рахунок зменшення спекл-шуму[4,5].

Одним із підходів до зниження спекл-шуму є формування динамічної спекл-структури – тобто створення таких умов освітлення об'єкта, за яких інтерференційний спекл-візерунок змінюється від кадру до кадру. Ідея полягає в тому, що усереднення кількох незалежних реалізацій спекл-візерунка дозволяє частково компенсувати випадкові флуктуації інтенсивності і тим самим зменшити контраст шуму. На практиці цього можна досягти двома підходами: (1) оптичними методами, коли записується кілька голограм одного об'єкта при різних умовах (різні кути або спектри освітлення, поляризація, положення дифузора чи об'єкта тощо), або (2) цифровими методами постобробки однієї голограми (фільтрація, статистичні алгоритми

шумоприглушення). Оптичні методи часто передбачають використання багаторазових вимірювань: так, здавна для зниження зернистості зображень застосовували мікровібрації об'єкта чи фотопластинки під час експозиції або часткове зниження когерентності джерела. Сучасні реалізації цього підходу включають, наприклад, підсумовування реконструкцій з різнокольорових (багатохвильових) голограм, знімків при різній поляризації, використання обертового дифузора для розсіювання променя, зсув об'єкта, а також часову мультиплексію кадрів. Впровадження автоматизованих систем керування такими змінами відкриває нові можливості покращення якості 3D-реконструкції без значного ускладнення оптичної схеми апаратної. Саме тому тема динамічної спекл-структури та її моделювання для голографічної реконструкції тривимірних зображень є науково і практично актуальною, особливо в задачах біомедичної візуалізації, метрології та неруйнівного контролю, де важлива висока інформативність зображення при мінімальному рівні шумів.

Тема роботи: модель динамічної спекл-структури для оптичної реконструкції тривимірних зображень.

Мета роботи: удосконалення програмно-апаратної системи цифрової голографічної для реконструкції тривимірних зображень.

Відповідно до поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати теоретичні основи цифрової спекл-голографії та існуючі методи реконструкції зображень;
- дослідити принцип формування спекл-структури та підходи до її використання для зменшення спекл-шуму;
- розробити апаратну схему установки з можливістю керованого формування змінного спекл-візерунка;
- провести чисельне моделювання процесу голографічної реконструкції та експериментально оцінити вплив усереднення декількох цифрових реконструкцій на зменшення спекл-шуму в зображенні.

Об'єкт дослідження: процес цифрового формування і реконструкції голографічних зображень дифузних тривимірних об'єктів, який супроводжується появою інтерференційного спекл-шуму.

Предмет дослідження: методи динамічної зміни спекл-структури (за рахунок рухомого дифузора чи джерела світла) та їх вплив на якість оптичної реконструкції тривимірних зображень.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Основи цифрової голографії та оптичної реконструкції зображень.

Принцип голографічного запису. Голографія ґрунтується на принципі інтерференції когерентних хвиль: об'єкт, що висвітлюється лазерним пучком, формує об'єктний сигнал – розсіяне хвильове поле, яке несе інформацію про амплітуду та фазу випромінювання після взаємодії з об'єктом[6-10]. Для реєстрації цього поля воно інтерферує з опорним пучком – когерентною хвилею від того ж лазера. Внаслідок накладання двох хвиль утворюється інтерференційна картина (голограма), інтенсивність якої записується сенсором або фотоматеріалом. На відміну від звичайної фотографії, що фіксує лише розподіл інтенсивності світла, голограма містить закодовану інформацію і про фазу світлового поля об'єкта, оскільки інтерференційні смуги виникають саме через різницю фаз між об'єктним та опорним променями.

У класичній (оптичній) голографії записана на фотопластинці голограма згодом оптично просвічується тим самим лазером[9,10], в результаті чого відновлюється об'ємне зображення об'єкта у просторі (спостерігач бачить його як «висяще у повітрі»). При цифровій голографії замість фотопластинки використовується цифрова матриця (ПЗС- або КМОН-камера) для запису інтерферограми[10,11], а подальша реконструкція здійснюється чисельним шляхом на комп'ютер. Цифровий підхід значно розширює можливості голографії: по-перше, зникає потреба у хімічній обробці фотоматеріалів і в точній реставрації геометрії експерименту для спостереження зображення – відновлення здійснюється програмно[11-13]. По-друге, з'являються методи покращення зображення вже на етапі його реконструкції, зокрема фільтрація завад у частотній області, чисельне перефокусування, корекція аберацій, обчислення кількісних фазових зображень тощо. Таким чином, цифрова голографія поєднує оптичний запис голограми з можливостями сучасної

цифрової обробки, що робить її потужним інструментом досліджень і розробок у різних галузях науки і техніки.

Конфігурації запису. Залежно від взаємного розташування об'єктного та опорного пучків розрізняють зонну (*inline*) та позазонну (*off-axis*) схеми голографії[12,13]. У зонній схемі опорний промінь спрямований співвісно з об'єктним (або його взагалі нема – сам об'єктний пучок інтерферує з собою). Перевагою є більш проста оптика, але при цьому інтерференційний запис містить накладені одне на одне зображення об'єкта (основне і дзеркальне, або "двійник"), що ускладнює реконструкцію. У позазонній схемі опорний і об'єктний пучки перетинаються на матриці під невеликим або відсутнім кутом; це призводить до того, що спектр сигналу голограми містить окремо рознесені ділянки, які відповідають корисному сигналу та завадам (нульовий порядок і "двійник"). У цифровій голографії достатньо записати лише одну інтерферограму, після чого її обробка у частотній області (методом Фур'є) дозволяє відфільтрувати потрібний бік спектра[14], що містить зображення об'єкта, і пригнічувати небажані компоненти.

Для відновлення зображення з цифрової голограми застосовують моделі дифракції – наближення Френеля або більш точні методи (конволюційний підхід, метод спектра), які описують поширення хвильового поля від площини запису (сенсора) до певної площини спостереження на відстані z . По суті, алгоритм реконструкції зводиться до обчислення прямого або зворотного перетворення Фур'є з урахуванням відповідних фазових множників. Якщо $H(x, y)$ – інтерференційний патерн (інтенсивність) у площині сенсора, то комплексне поле об'єкта в обраній площині реконструкції $U(x', y')$ можна знайти за допомогою дискретного перетворення Френеля або швидкого Фур'є-перетворення (ШПФ). Для далеких зон використовують одноразове ШПФ (метод Фур'є-дифракції), для ближчих – метод згортки (Френеля) з двома перетвореннями. У даній роботі використовуватиметься алгоритм Френеля на основі ШПФ як компроміс між швидкістю та універсальністю. В результаті

чисельної реконструкції отримуємо комплексне зображення $U(x', y')$, з якого можна проаналізувати як амплітудний розподіл (інтенсивність), так і фазовий розподіл об'єкта[14].

1.2 Спекл-структура та її вплив у голографічних системах.

Природа спекл-візерунка. Когерентне лазерне освітлення дифузних (шорстких) поверхонь приводить до виникнення хаотичного інтерференційного узору, відомого як спекл. Спекл-структура проявляється у вигляді характерної зернистої картини світлих і темних плям[6], що виникають внаслідок випадкового складання багатьох розсіяних хвиль. З точки зору статистичної оптики, спекл є результатом самоінтерференції множини когерентних хвиль, розсіяних від великої кількості мікроскопічних нерівностей на поверхні об'єкта. Якщо розміри цих нерівностей (або неоднорідностей середовища) порівняні з довжиною хвилі, відбиті або пропущені від них хвилі матимуть випадкові фазові зсуви. Коли такі хвилі накладаються у площині спостереження, вони можуть як підсилювати одна одну (даючи яскраві плями), так і гасити (темні ділянки), утворюючи високо-контрастний “шумовий” візерунок. На інтенсивність в окремій точці впливають внески від багатьох незалежних розсіювачів, тому розподіл яскравості спеклів описується статистичними законами (для ідеально когерентного випадку – негативним експоненційним розподілом). Характерний розмір окремих спекл-плям визначається параметрами оптичної системи – довжиною хвилі, числовою апертурою, відстанню до об'єкта, тощо[14]. Зменшення когерентності випромінювання (наприклад, використання ширшого спектра, багатомодових лазерів або просторова декогерентізація) знижує контраст спеклів, оскільки різні хвилі вже не інтерферують сталим чином.

У голографічних системах спекл-візерунок може виникати як при формуванні голограм, так і на етапі реконструкції[6]. Якщо об'єкт є дифузно-відбивальним або напівпрозорим з нерівномірною структурою, то об'єктне

поле, що досягає матриці, вже несе спекл-модуляції. Відтак сама записана голограма містить спекл-шум разом із корисним сигналом[11-14], а під час чисельної реконструкції цей шум проявляється в кінцевому зображенні, погіршуючи його якість. На відміну від адитивного шуму (наприклад, електронного шуму камери), спекл має мультиплікативний характер – він модулює інтенсивність і може суттєво знижувати контраст та заважати розпізнаванню дрібних деталей. В оптичній голографії проблема спеклів проявилася ще в перших експериментах з голографічною мікроскопією і когерентною фотографією – було виявлено, що спекл-шум ставить фундаментальне обмеження на роздільну здатність та якість таких зображень. У цифровій голографії ця проблема не менш актуальна: незважаючи на розвиток алгоритмів обробки, досі не існує універсального методу повного придушення спеклу без втрати корисної інформації. Тому спекл-шум розглядається як один з ключових факторів, що лімітують подальше покращення голографічних технологій відображення і вимірювання.

Метрики оцінки спекл-шуму. Для кількісної характеристики рівня спекл-шуму в зображеннях використовується ряд статистичних показників. Найбільш поширеним є контраст спекл-візерунка[11-13] C , який визначається як відношення стандартного відхилення інтенсивності до її середнього значення на обраній ділянці за (1.1):

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}, \quad (1.1)$$

де:

C – контраст спекл-структури, σ_I – стандартне відхилення інтенсивності, $\langle I \rangle$ – середнє значення інтенсивності

Для повністю розвинутого спеклу (когерентний випадок) контраст C теоретично дорівнює 1 (тобто стандартне відхилення дорівнює середньому, що відповідає експоненційному розподілу інтенсивності). В практичних умовах

значення C менші через часткову когерентність та усереднення. Інші метрики включають сигнал-відношення-шум, ентропію зображення, показник різкості тощо – вони теж можуть застосовуватися для непрямой оцінки ступеня зашумленості спеклом. У даній роботі для оцінки ефективності методів зниження спеклу використовуватиметься коефіцієнт контрасту C як базовий показник.

1.3 Методи зменшення спекл-шуму в цифровій голографії

Оптичні методи (множинні вимірювання). Як зазначалося, один з найефективніших способів боротися зі спекл-шумом – це отримати кілька голограм (або інтенсивних зображень) одного і того ж об'єкта за умов, коли спекл-візерунок змінюється, а потім усереднити результати. При достатній кількості некорельованих реалізацій середнє зображення матиме значно згладжений шум (контраст зменшується пропорційно $\frac{1}{\sqrt{N}}$ для N незалежних кадрів). Щоб реалізувати різні спекл-реалізації, між окремими записами зазвичай модифікують певний параметр оптичної системи. Наприклад, можуть бути застосовані такі підходи[14,15]:

- зміна довжини хвилі випромінювання. Якщо послідовно записати голограми на декількох різних довжинах хвиль (або одночасно висвітлювати об'єкт багатохвильовим джерелом), спекл-візерунок для кожної з них буде іншим. При об'єднанні реконструкцій (наприклад, накладанні зсунутих по фазі комплексних полів або простому додаванні інтенсивностей) відбувається часткове усереднення спеклу. Подібний принцип застосовують у багатоспектральній голографічній інтерферометрії та при побудові голографічних дисплеїв зі зниженим шумом;
- зміна поляризації освітлення. Використання різних поляризаційних станів лазерного променя для декількох послідовних записів також призводить до варіювання спекл-картини. Об'єктні хвилі з різною поляризацією інтерферують незалежно, і середнє зображення зменшує когерентні артефакти.

Цей підхід може поєднуватися з іншими (наприклад, різні комбінації спектра і поляризації);

- дифузор у опорному або об'єктному плечі. Один із дієвих методів – встановити у лазерний пучок дифузор (матове скло), який повільно обертається або рухається, генеруючи динамічний спекл-візерунок. При цьому за час накопичення однієї голограми відбувається усереднення багатьох миттєвих спекл-фасет, що еквівалентно зниженню просторової когерентності освітлення. Якщо швидкість обертання та частота кадрів дозволяють, можна також записати серію голограм з “замороженим” спеклом на кожній, а потім обчислити реконструкції і усереднити їх. У цифровій голографічній мікроскопії описано метод динамічного двійного дифузора, що істотно знижує спекл-шум і артефакти дифракції без втрати роздільної здатності, проте з втратами швидкості запису зображень;

- зміна положення камери або об'єкта. Невеликі латеральні зсуви матриці відносно об'єкта (або навпаки, рух об'єкта в площині паралельно сенсору) між записами приводять до різних реалізацій інтерференційної картини. Цей метод використовують, наприклад, у стерео-голографічних системах або при створенні голографічних зображень з розширеним полем зору;

- часове мультиплексування. Якщо об'єкт чи умови освітлення мають внутрішню динаміку (наприклад, рухоме середовище, коливання тощо), то послідовні голограми одного об'єкта автоматично міститимуть різний спекл-шум. Усереднення таких часових кадрів теж приводить до згладжування зернистості. Важливо, щоб за час між кадрами кореляція спекл-візерунків спадала до нуля.

Дослідження показують, що комбінування декількох таких підходів здатне істотно знизити рівень спекл-шуму. Так, використання динамічного спекл-освітлення може дати якість реконструкції, співставну з системами на основі некогерентних джерел. Звісно, основний недолік методів з множинними

вимірюваннями – ускладнення і подорожчання апаратури (потрібні додаткові модулі: дифузори, світлофільтри, колеса поляризації, спектрометри або багатоканальні лазери тощо) та збільшення часу вимірювань. В рамках цієї роботи обрано стратегію, що мінімізує додаткову складність – керований динамічний дифузор та еквівалентний рух джерела навколо об'єкта, який дозволяє отримати багато незалежних реалізацій спеклу простим механічним шляхом.

Числові методи (обробка однієї голограми): паралельно з оптичними методами, активно розробляються алгоритмічні підходи до придушення спеклу без необхідності кількох вимірювань. В основному вони полягають у застосуванні фільтрації та постобробки вже отриманого реконструйованого зображення або голограми. До таких методів належать: адаптивні фільтри (наприклад, медіанний, або гамма-фільтр, що враховує статистику експоненційного шуму), різноманітні різницеві і кореляційні алгоритми, вейвлет-фільтрація, методи на основі нечеткої логіки та нейронних мереж. Сучасним трендом є використання згорткових нейронних мереж для «очищення» голографічних реконструкцій від спеклу, зокрема поєднання локальних і нелокальних підходів. Хоча суто числові методи привабливі відсутністю потреби в складному обладнанні, їх недоліком є ризик втрати дрібних деталей зображення разом з шумом, а також необхідність попереднього навчання або тонкого налаштування під конкретні статистичні властивості спеклу. Тому в задачах, де критично зберегти всю первинну інформацію (наприклад, в біомедичних зображеннях), часто віддають перевагу оптичним методам або комбінують обидва підходи для досягнення найкращого результату.

1.4 Фазова реконструкція та фазозсувна голографія

Однією з переваг голографії є можливість отримання кількісної фазової інформації про об'єкт [16,17]. Фаза хвильового фронту, що пройшов крізь об'єкт

(або відбився від нього), містить дані про оптичну товщину, показник заломлення, профіль поверхні тощо – це критично для застосувань у мікроскопії живих клітин, де необхідна безмаркерна візуалізація, або у деформаційному аналізі конструкцій. У цифровій голографії після реконструкції автоматично доступне комплексне зображення об'єкта $U(x,y)$, тому фаза $\Phi(x,y) = \arg[U(x,y)]$ може бути побудована напряму. Проте слід врахувати, що отримана фаза модулюється 2π (вимірюється «по колу»); для отримання безперервного фазового профілю зазвичай потрібне розгортання фази – окрема задача обробки. Окрім того, при звичайному записі однієї голограми можлива ситуація, коли інформація про фазу об'єкта змішується з фазою опорного пучка і артефактами (“двійником”). Це може ускладнювати точність фазових вимірювань.

Щоб точно реконструювати фазу об'єктового поля і усунути двозначності[16-18], застосовують метод фазозсувної голографії. Його ідея полягає в тому, що під час запису голограм здійснюється відомий фазовий зсув опорного променя на декілька різних значень, і відповідно записується серія інтерферограм. Наприклад, при чотирьохкратному фазовому зсуві на $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ можна отримати чотири рівняння для інтерференційної картини, розв'язавши які відносно синуса і косинуса, можна точно визначити як амплітуду, так і фазу об'єктового комплексу. Загальніше, фазозсувна цифрова голографія передбачає реєстрацію декількох інтерферограм з контрольованим фазовим зсувом опорної хвилі між ними; з лінійної комбінації цих кадрів конструюється комплексна голограма – масив комплексних значень, що містить у собі як амплітуду, так і фазу дифрагованого об'єктом випромінювання[17-18]. Фазовий зсув може реалізовуватися різними шляхами: зміною оптичної довжини шляху опорного пучка (пізоелектричне переміщення дзеркала), електрооптичними модуляторами, використанням просторового модулятора світла для динамічного керування фазою тощо. Результуючі комплексні голограми після обчислення можуть одразу використовуватися для реконструкції без потреби у

фільтрації, оскільки метод фактично дає розв'язок щодо об'єктного хвильового поля з усуненням паразитних компонент. Фазозсувна голографія є надзвичайно ефективною для високоточного фазового вимірювання в умовах низького освітлення, проте вимагає стабільності експерименту і складнішої системи збору даних.

1.5 Математичні методи обробки голограм у частотній області

Як було зазначено, Фур'є-оптика відіграє ключову роль у теорії голографії. Інтерференційна інтенсивність, записана на матриці, математично описується за (1.2):

$$I(x, y) = |U_{\text{obj}} + U_{\text{ref}}|^2 = |U_{\text{obj}}|^2 + |U_{\text{ref}}|^2 + U_{\text{obj}}U_{\text{ref}}^* + U_{\text{obj}}^*U_{\text{ref}}, \quad (1.2)$$

де $U_{\text{obj}}(x, y)$ – комплексне поле від об'єкта,

$U_{\text{ref}}(x, y)$ – опорна хвиля.

Перші два члени відповідають самоінтерференції (інтенсивності) об'єктного та опорного полів, а останні два – перехресним інтерференційним членам, що містять інформацію про об'єкт (вони є комплексно-спряженими одне до одного). Перехресні члени становлять голографічний сигнал. У позазонній схемі опорна хвиля може бути подана як плоска хвиля $U_{\text{ref}} = A e^{ik_{\text{ref}}x}$ під кутом θ до нормалі матриці. Це призводить до того, що спектр Фур'є голограми $I(f_x, f_y)$ містить два бокових максимуми на просторовій частоті $f_x = \pm \left(\frac{k_{\text{ref}}}{2\pi}\right)$, які відповідають членам $U_{\text{obj}}U_{\text{ref}}^*$ відповідно. Центральна частина спектра містить потужні нульові компоненти $|U_{\text{obj}}|^2 + |U_{\text{ref}}|^2$. Таким чином, у частотній області голограма складається з трьох основних зон: центрального пляму (DC) і двох бокових плям, кожна з яких є носієм інформації про об'єкт. Фур'є-фільтрація полягає в тому, щоб вибрати одну з цих бокових зон і відсікнути решту сигналу[17-20]. Це можна зробити або апаратно (наприклад, помістивши екран з отвором у площині Фур'є при оптичній реконструкції), або програмно – множенням спектра на віконну функцію. Після

цього обрана зона містить комплексно-кодоване поле об'єкта, яке займає приблизно половину смуги пропускання матриці по одному виміру. Застосовуючи зворотне перетворення Фур'є, отримуємо комплексне зображення об'єкта (з точністю до множника, пов'язаного з амплітудою і фазою опорного пучка). Зауважимо, що водночас зникає і “дзеркальне” зображення, оскільки йому відповідає інша бокова зона, яку ми відфільтрували. На практиці реалізація такого підходу потребує, щоб бокові максимуми не перекривалися з нульовим – тобто щоб інтерференційні смуги були достатньо частими. Це досягається вибором оптимального кута θ та співвідношення інтенсивностей об'єкт/опора.

Окрім первинного виділення об'єктового сигналу, методи частотної обробки дозволяють також покращувати якість зображень. Наприклад, можна застосувати фільтрацію високих або низьких частот до амплітудного (інтенсивного) зображення для придушення шуму або фону. Часто у голограмах присутня інтенсивна центральна пляма (від незбалансованої опорної хвилі) або періодичні артефакти – їх теж можна відсіяти фільтрами у спектральній площині. При цифровій реконструкції такі фільтри реалізуються множенням спектра (отриманого ШПФ) на маску заданої форми. Наприклад, для згладжування дрібного шуму застосовують низькочастотний фільтр (ідеальний або гауссів), який пропускає лише область спектру навколо нуля певного радіуса. Навпаки, для підвищення різкості зображення або виділення дрібних деталей можна використати високочастотне підсилення (високочастотний фільтр або фільтр підвищення різкості, який віднімає розмиту копію зображення). У даній роботі в основному використовується смуговий відсікальний фільтр для вибору потрібного інтерференційного максимуму в спектрі голограми (як описано вище). Додаткова післяреконструкційна обробка проводитиметься вже на етапі аналізу отриманих зображень.

Перетворення Гільберта та фазові карти. Окремо згадаємо, що при обробці голограм іноді використовують $2D$ -аналог аналітичного сигналу –

перетворення Гільберта. Якщо взяти голограму і придушити в її спектрі один з бокових інтерференційних максимумів (як описано вище), отриманий комплексний масив можна трактувати як аналітичний сигнал зображення (що містить тільки позитивні частоти). Такий підхід дозволяє обчислити миттєву фазу і миттєву амплітуду сигналу в кожній точці, що еквівалентно побудові фазової та амплітудної карти об'єкта. У голографії це ще один шлях отримати фазове зображення (альтернатива прямій реконструкції), особливо якщо працюємо з інтенсивностями і хочемо оцінити фазу без явного запису комплексної голограми.

1.6 Обґрунтування методу з рухомим джерелом світла

Як було описано, ключова ідея динамічної спекл-структури – це створення різних умов когерентного розсіювання світла на об'єкті з подальшим усередненням ефектів. Рухоме джерело світла, що переміщається навколо об'єкта, по суті змінює кут падіння лазерного променя. Для дифузного об'єкта це означає, що кожне нове положення джерела генерує новий спекл-візерунок в площині реєстрації, оскільки змінюється сукупність оптичних шляхів від різних точок поверхні до камери. Якщо джерело об'їжджає об'єкт по колу (наприклад, на 360°), то набір голограм, записаних на серії кутів, міститиме максимально некорельовані спекли. Усереднення реконструкцій з цих голограм повинно дати значно згладжене зображення. Перевагою підходу з рухомим лазером є те, що не вноситься додаткових елементів у сам промінь (як це було б з дифузором): лазер висвітлює об'єкт безпосередньо, зберігаючи високу яскравість і контраст інтерференції. До того ж, можна досягти великої варіативності спекл (чим більше різних кутів – тим більший ефект придушення шуму).

Проте цей метод вимагає синхронізації руху з реєстрацією зображень. У нашій установці вирішено реалізувати це так: камера працює в режимі відеозахоплення з фіксованою частотою (наприклад, 10 кадрів/с), а лазер

плавно переміщується. Таким чином, кожен кадр відповідає новому положенню лазера. Знаючи частоту кадрів і швидкість руху, можна забезпечити запис заданої кількості кадрів за повний оберт (або за необхідний сектор). Наприклад, для $N=32$ кадрів рівномірно по колу, кожен кадр відповідає кутовому кроку $\sim 11,5^\circ$. Після отримання N голограм проводиться їх цифрова реконструкція (або, альтернативно, накопичення інтерферограм з відповідним зсувом фази опорного променя, щоб одразу усереднити на рівні інтерференційної картини). У цій роботі реалізовано простіший варіант: записується серія голограм, кожна реконструюється окремо, а потім інтенсивності підсумовуються і усереднюються. Такий підхід еквівалентний тому, який застосовано в роботі, де для зменшення спеклу середньо кілька реконструкцій із різним кутовим чи спектральним освітленням.

1.7 Цифрові методи аналізу та обробки даних

Незважаючи на основний ухил у бік оптичних засобів покращення зображень, в рамках дослідження також використовуються числові методи для аналізу результатів. До них належать:

- обчислення показників якості. Як згадувалося, розраховується контраст спекл-шуму C для отриманих реконструйованих зображень – як до усереднення, так і після [16]. Це дозволяє кількісно оцінити ступінь зменшення шуму. Також може обчислюватись відношення сигнал/шум (SNR) та інші статистичні характеристики;
- частотний аналіз спектрів голограм. Для прикладу, будується $2D$ -спектр (модуль ШПФ) оригінальної голограми і голограми після усереднення, щоб перевірити, наскільки знизилися високочастотні флуктуації. Може проводитися порівняння енергетичних спектрів (через інтегральні радіальні профілі).

Цифрова фільтрація зображень. Хоча основний акцент – на оптичному придушенні шуму, доцільно протестувати й деякі прості фільтри.

Аналіз фазових зображень. Якщо вдасться отримати якісну фазову карту об'єкта (наприклад, для плоского об'єкта чи калібрувальної мішені), будуть проведені вимірювання точності фазової реконструкції. Зокрема, можна оцінити, чи зменшиться фазовий шум при усередненні кількох реконструкцій (очікується, що так, адже спекл проявляється і як випадкові фазові флуктуації теж).

Усі цифрові розрахунки здійснюються мовою *Python* з використанням бібліотек *OpenCV*, *NumPy* та *Matlab* (через *MATLAB Engine* для специфічних функцій).

Висновок до розділу 1

У теоретичному розділі розглянуто базові поняття і методи, необхідні для подальшого виконання роботи. Проаналізовано принцип цифрової голографії – процес запису інтерференційної голограми за допомогою ПЗС/КМОН-матриці та її чисельної реконструкції алгоритмами дифракційної оптики. Особливу увагу приділено явищу спекл-шуму: з'ясовано його фізичну природу як наслідку когерентного розсіювання і проаналізовано вплив на якість голографічних 3D-зображень. Описано основні стратегії зменшення спекл-шуму, включно з методами динамічного формування спекл-структури (зокрема, шляхом рухомого дифузора або змінного кута освітлення об'єкта), а також числовими підходами обробки зображень. Розглянуто метод фазозсувної голографії, який дозволяє точно відновлювати фазові зображення і усувати артефакти, що важливо для високоякісної реконструкції. Наведено математичні основи обробки голограм у частотній області – метод Фур'є-фільтрації для виокремлення об'єктового сигналу і підвищення співвідношення сигнал/шум. Також описано створення експериментальної установки: її оптичну схему, апаратні компоненти та програмне забезпечення. Обґрунтовано вибір конфігурації з рухомим джерелом (дифузоров) для генерації змінного спекл-візерунка.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИЛАДУ

2.1 Архітектура пристрою

Пристрій складається з оптичного, електронного та механічного блоків, що взаємодіють для формування динамічної спекл-структури і реєстрації інтерференційних зображень. Оптичний блок включає когерентне джерело (лазер), систему колімації променю, рухомий дифузор для генерування випадкових спекл-патернів, напівпрозорий розділювач, а також дзеркальну систему на двох осях для формування еталонного променю. Наприклад, при створенні компактного проектора випадкових плям використовується простий шаблон спекл-патернів і система обертання дифузора для швидкої зміни патернів. У нашій установці оптичний блок може бути реалізований за аналогією до таких систем: лазер випромінює когерентне світло, яке коліматор перетворює в паралельний пучок. Потім пучок проходить через рухомий дифузор – наприклад, випадкову фазову пластину або грубо відполіроване скло, що розсіює світло і створює спекл-патерн. Частина світла за допомогою напівпрозорого розділювача спрямовується до об'єкта (об'єктивний промінь), а інша частина – до системи двоосьових дзеркал (еталонний промінь), після чого обидва промені інтерферують на ПЗЗ-матриці. Механічний блок включає корпусні деталі для точного позиціонування оптичних елементів, а також приводи (наприклад, крокові або безконтактні електродвигуни) для обертання дифузора і дзеркал. Електронний блок містить керуючі та силові ланцюги: генератори керуючих сигналів, драйвери для двигунів, а також плати введення-виведення для синхронізації роботи компонентів. Для прикладу, у сучасних гальванометричних сканерах використовується закритий цикл з оптичним енкодером положення дзеркала і сервоуправлінням для високої швидкодії і стабільності. Таким чином, архітектура включає чотири блоки: оптичний (лазер, коліматор, дифузор, розділювач, дзеркала, ПЗЗ-камера), електронний (джерело живлення, драйвери двигунів, двигуни, блок синхронізації, вимірювання положення), механічний (корпус, кріплення оптики, обертові механізми) та

комп'ютер з програмним забезпеченням[21]. Функціональна схема приладу зображена на рис.2.1.

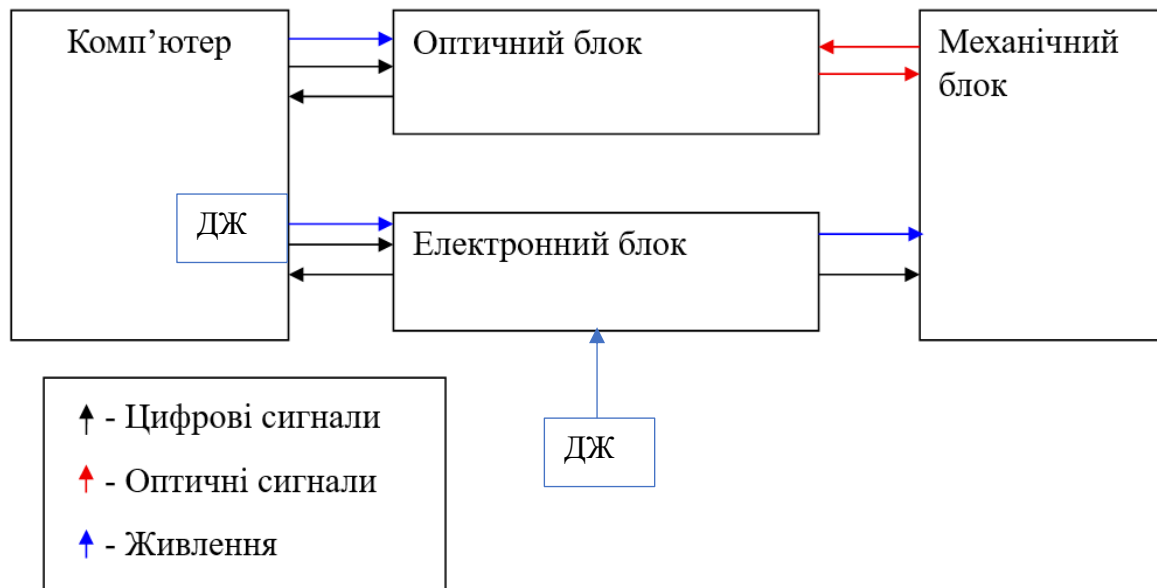


Рисунок 2.1 — Функціональна схема приладу.

Ці блоки спільно забезпечують формування динамічної спекл-послідовності і реєстрацію інтерференційних зображень для подальшої реконструкції об'єкта.

2.2 Принцип роботи

Принцип роботи системи ґрунтується на побудові цифрової голограми методом інтерференції двох когерентних пучків світла: опорного (еталонного) і об'єктивного. Згідно з концепцією цифрової голографії, інтерференційний малюнок, зареєстрований цифровою матрицею, містить повну інформацію про амплітуду і фазу хвильової передньої від об'єкта. Схематичне зображення принципу роботи пристрою зображено на рис.2.2.

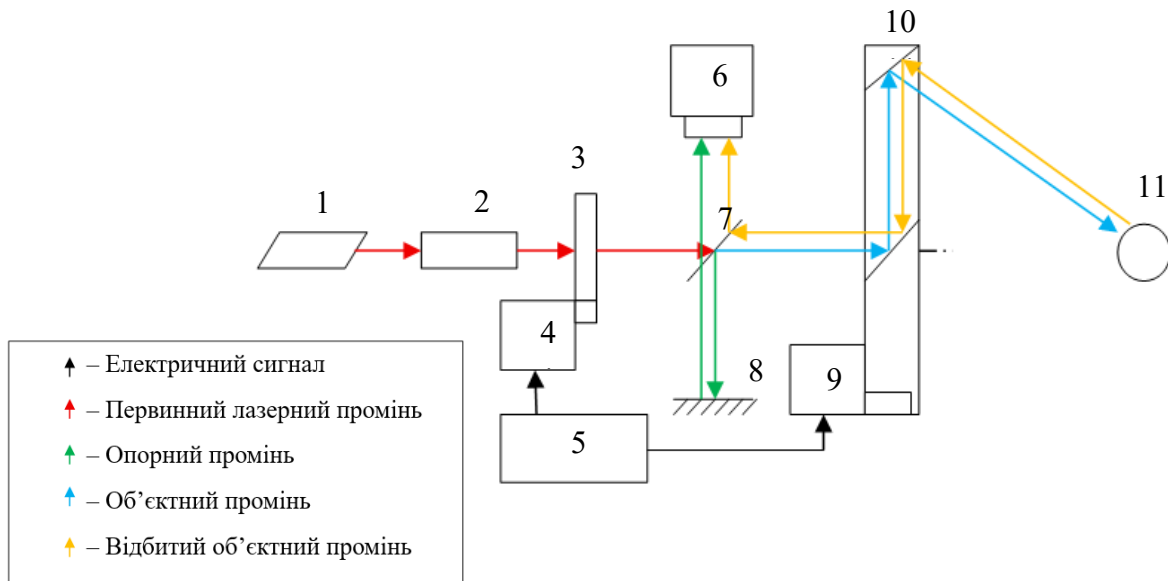


Рисунок 2.2 — Схематичне зображення роботи пристрою: 1 – лазер, 2 – коліматор, 3 – рухомий дифузор, 4 – двигун дифузору, 5 модуль керування двигунами, 6 – камера, 7 – розділяч променю, 8 – дзеркало, 9 – двигун обертальної установки, 10 – обертальна установка з дзеркалами, 11 – досліджуваний об'єкт.

Первинний промінь виходить з лазера 1, проходить коліматор 2 та обертальний дифузор 3 (який приводить до руху двигун 4, що керується модулем 5), поділяється у розділячі 7 на опорний та об'єктний, опорний(еталонний) промінь відбивається від дзеркала 8, і без заломлення або відбиття проходить розділяч 7 і попадає на об'єktiv 6; об'єктний промінь двічі відбивається від дзеркал у обертальній установці 10 (яку приводить до руху двигун 9, що керується модулем 5), після цього він потрапляє на досліджуваний об'єкт 11, відбивається від нього, і тим самим шляхом через установку 10 повертається на розділяч 7 і відбивається від нього у об'єktiv 6, де він вступає в інтерференцію з опорним променем.

Геометрія системи враховує такі параметри: відстань між елементами ~10 мм, розмір зони сканування ~1 мм, радіус обертання дзеркала ~1,56 мм. Ці розміри визначають поляризаційні умови проходження променів і фазову стабільність системи. Наприклад, відстань між дзеркалом і ПЗЗ впливає на

загальну різницю оптичних шляхів, яка має залишатися меншою за довжину когерентності лазера (для Гелій-Неонових лазерів вона зазвичай становить десятки сантиметрів). В обраному конфігураторі рухомі дзеркала зі швидким керуванням забезпечують можливість фазового зсуву променів в обох осях, що в перспективі дозволить реалізувати метод фазозрушення у реконструкції.

2.3 Оптична система

Оптична система включає такі ключові компоненти:

Джерело (лазер): випромінює узгоджене світло з високою когерентністю. Наприклад, гелій-неон [22] ($\lambda=632.8$ нм) або діодний лазер ($\lambda\approx 650\text{--}850$ нм) з довжиною когерентності $\geq 20\text{--}30$ см. Вимоги до джерела: стабільна вихідна потужність, висока просторово-часова когерентність, вузьке спектральне гальмо, низький рівень шуму. Зазвичай використовують малопотужні (<10 мВт) *СW*-лазери, які добре підходять для голографії.

Коліматор: лінза або система лінз, яка перетворює точкове випромінювання лазера в паралельний пучок. Використовують ахроматичні чи високочастотні об'єктиви для мінімізації аберацій. Завдяки коліматору пучок стає рівномірним і спрямованим на наступні елементи системи.

Рухомий дифузор: оптичний елемент з випадковою структурою поверхні (напр., матова скляна пластина чи фазова пластинка), що розсіює світло у великій кількості напрямів і генерує характерний спекл-патерн. Для динамічної роботи дифузор монтується на моторизований привід. Обертання (або коливання) дифузора вводить тимчасову модуляцію спекла: при достатній швидкості руху інтенсивність окремих зерен спекла змінюється, що корисно для отримання статистично незалежних зображень.

Напівпрозорий розділювач (дзеркало): частково віддзеркалює і частково пропускає пучок, поділяючи його на два незалежних шляхи. У багатьох системах використовують дзеркальну пластину під кутом 45° (BS). Важливою вимогою є широкосмугова прозорість та висока оптична якість (площинність поверхні), щоб не вносити додаткових аберацій. Розділювач вводить фіксоване

відношення потужностей між об'єктивним і еталонним променями, яке можна коригувати коефіцієнтом заломлення та товщиною скла.

Дзеркала: опорні дзеркала і дзеркальне скануюче пристрій. Цільове дзеркало має бути високоякісним (покриття сріблом або алюмінієм з захисним шаром), щоб максимізувати відбивання ($>85\%$ в діапазоні 400–800 нм). У нашому випадку використовується двоосьова система обертальних дзеркал, наприклад, гальванометричний сканер. Ці дзеркала мають малу площу (радіус ~ 1.56 мм) і закріплені на осях, що забезпечують повороти з високою швидкістю та точністю. Управління здійснюється за допомогою серво-драйверів[21], які підтримують зворотний зв'язок від внутрішнього оптичного енкодера положення дзеркала.

Зазвичай такі дзеркала забезпечують механічний кут повороту до $\pm 12.5^\circ$ (малий розмір) або $\pm 20^\circ$ (більший), з кроком ~ 15 мкрад і часом кроку $\sim 300\text{--}400$ мкс. ПЗЗ-камера (CCD-матриця): реєструє інтерференційний малюнок[23-25]. Вимоги до камери: висока чутливість у діапазоні довжин хвиль лазера, достатня роздільна здатність для розрізнення інтерференційних смуг, динамічний діапазон та низький шум.

Відстань від об'єкта до матриці встановлюється ~ 85 см, що забезпечує поле зору $\approx 6^\circ$. У нашій системі вибір камери здійснюється на основі необхідної роздільної здатності (щільність інтерференційних смуг), швидкодії (об'єм потокових даних) та синхронізації з іншими елементами системи.

При побудові траєкторії променів враховуються оптичні кути і фазові умови. Фазова різниця між променями повинна залишатися сталою під час запису (усі оптичні шляхи ретельно вирівняні в межах когерентної довжини лазера). Крім того, оптичні компоненти повинні бути монтувальні так, щоб мінімізувати механічні вібрації і температурні коливання, які можуть зруйнувати інтерференційну картину. Отже, кожному елементу оптичної системи відповідають вимоги на оптичні властивості (коефіцієнт

відбиття/пропускання, аберації, дифузність поверхні) та на механічну стабільність (точність виготовлення, термічна стабільність, фіксація).

2.4 Електронна частина

Електронна схема призначена для керування механічними приводами, живлення лазера та генерації синхронізованих імпульсів. Загальня і принципова схеми електронної частини зображено на рис.2.3:

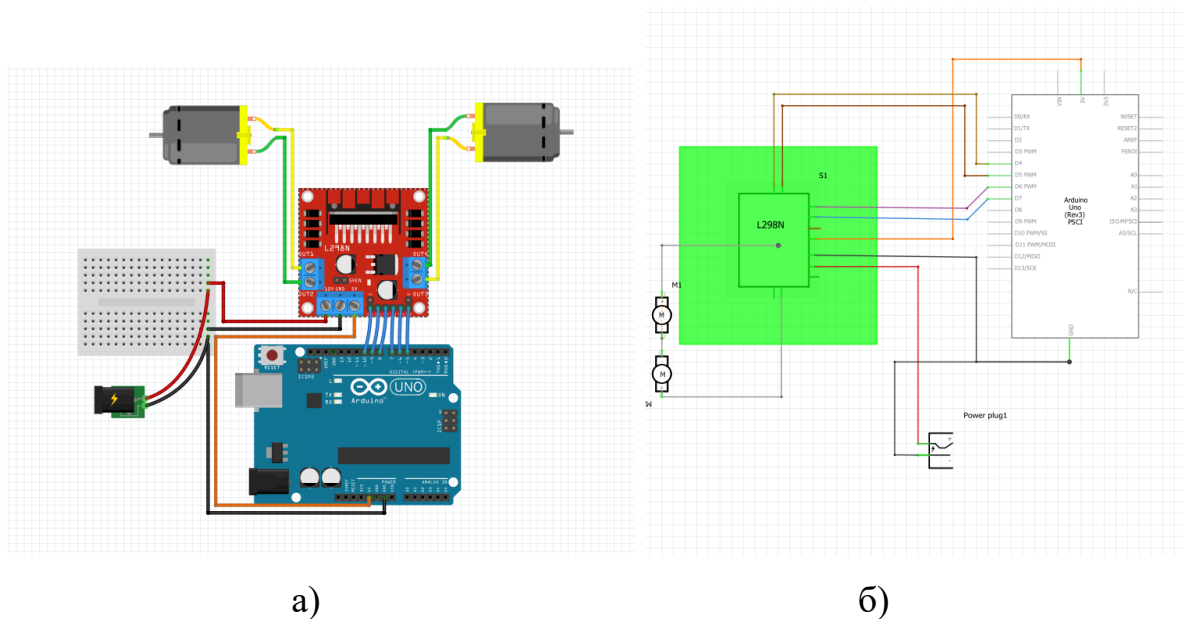


Рисунок 2.3 — Схема електронного блоку приладу: а) Загальна, б) Принципова.

Архітектура керування включає мікроконтролер *Arduino Uno*, драйвер двигунів *L298N*, два компактних *DC*-двигуни з інкрементними енкодерами (по одному для дифузора та для дзеркальної установки)[21], а також зовнішнє джерело живлення. *Arduino Uno* забезпечує обмін даними з комп'ютером через *USB/COM* та формує сигнали керування на входи *L298N*. Драйвер *L298N* виконує роль подвійного *H*-мосту, що комутує полярність живлення на обмотках моторів (входи *IN1–IN4*) і дозволяє регулювати швидкість через входи *ENA/ENB* (широтно-імпульсна модуляція)[26]. До *L298N* підводиться живлення моторів (наприклад, 6–12 В, оскільки модуль *L298N* витримує до ≈ 35 В), а спільна «земля» з'єднує *GND* джерела живлення, *L298N* та *Arduino*. Для обертання дифузора і дзеркальної установки обрано два редукторні мотор-

редуктори з вбудованими енкодерами. Наприклад, двигун *DFRobot* на 12 В зі швидкістю ≈ 251 об/хв має крутний момент ≈ 18 кг·см і вбудований датчик Холла (енкодер) з 16 імпульсами на оберт вала, що відповідає ≈ 700 імпульсів на оберт вихідного вала редуктора. Низькообертовий мотор *Vemomoc* (12 В, 25 об/хв, редуктор 217:1) забезпечує крутний момент ≈ 6 кг·см і має енкодер з ≈ 2604 імпульсами на оберт вихідного вала. Типові роздільності енкодерів дозволяють точно відслідковувати кут повороту; наприклад, мотор *Pololu 25Dx66L* (6 В, редуктор 75:1) з енкодером 48 *CPR* дає ≈ 3592 імпульси на повний оберт вихідного вала. Саме ці імпульси використовуються для визначення абсолютного кутового зсуву двигунів відносно початкового положення. Принцип роботи системи:

Крок повороту дифузора: дифузор повертається на 60° між зупинками. Таким чином формується 6 рівномірних позицій ($360^\circ/6 = 60^\circ$). Після шостого кроку дифузор повертається в початкове положення.

Поворот дзеркальної установки: після повного оберту дифузора (6 кроків) система виконує поворот дзеркала на 11.25° ($360^\circ/11.25^\circ = 32$ положення). Тобто дзеркальна установка має 32 дискретні положення по 11.25° .

Фіксація положень: підрахунок імпульсів інкрементних енкодерів дозволяє точно відстежувати кут повороту. Коли енкодери нарахували необхідну кількість імпульсів (відповідну 60° для дифузора чи 11.25° для дзеркала), двигун зупиняється.

Схематичний опис підключень:

Ардуіно $\rightarrow$ *L298N*: до цифрових виходів *Arduino* під'єднуються входи *L298N IN1–IN4* для керування напрямком обертання кожного двигуна (по дві лінії на двигун). Входи *ENA* та *ENB* *L298N* зазвичай з'єднуються з ШІМ-виходами *Arduino* (наприклад, *D9*, *D10*) для керування швидкістю моторів.

Двигуни $\rightarrow$ *L298N*: кожен мотор підключається до вихідних клем *L298N* (*OUT1–OUT4*). Зміна полярності поданої напруги (через *IN*-входи) забезпечує обертання двигуна вперед чи назад.

Живлення: позитивний полюс джерела живлення подано на клему $+V$ (VIN) модуля *L298N*, негативний («земля») — на *GND*. При цьому «земля» джерела обов'язково з'єднується з *GND Arduino*. Напруга живлення підбирається відповідно до характеристик моторів (прикладом, 6–12 В)[27].

Енкодери $\rightarrow$ *Arduino*: сигнали каналу *A* кожного енкодера (наприклад, перший канал дифузора на *D2*, дзеркала на *D3*) підключаються до входів зовнішніх переривань *Arduino*, а канали *B* — до будь-яких цифрових входів (наприклад, *D11*, *D12*). Це дозволяє за допомогою процедур переривань підраховувати імпульси та визначати напрям обертання.

2.5 Програмна частина.

У додатку А наведено приклад програми для *Arduino*, яка реалізує описану логіку: вона чекає команду від комп'ютера (через послідовний порт), крок за кроком обертає дифузор на 60° (6 кроків по 60°) і після повного оберту виконує поворот дзеркальної установки на 11.25° . Після кожної операції контролер надсилає вхідні позиції двигунів (номер кроку дифузора від 0 до 5 та номер положення дзеркала від 0 до 31).

Основне програмне забезпечення (Додаток Б) виконує реконструкцію тривимірної моделі на основі послідовності інтерференційних зображень[28]. У нашому випадку програмний модуль реалізований на мові Python, що дозволяє гнучко організувати обробку даних з ПЗЗ-камери. Основними блоками програми є: зчитування та попередня обробка зображень, фільтрація просторових спектрів голограм, розрахунок комплексних амплітуд за фазозсувом, отримання глибинної карти та побудова *STL*-моделі об'єкта. Алгоритми фільтрації реалізовані методом дискретного перетворення Фур'є: з голограми виділяють центральний і бічні порядки інтерференції в частотній області, після чого застосовують просторовий фільтр (зазвичай із вікном Гаусса або прямокутником), щоб ізолювати один з порядків. Цей підхід відомий із літератури з цифрової голографії, де підкреслено важливість просторового

фільтрування офсетних голограм. Наступний етап – обчислення комплексної амплітуди хвильового поля. Якщо використовується фазозсувний метод, то за кількома послідовними інтерферограмами з відомими фазовими зсувами, модульованими електронікою, можна відновити фазовий та амплітудний компоненти хвилі. У рамках пакету *pyDHM* такі алгоритми реалізовано для різних конфігурацій (зсув в лінійній, поза-віській системах тощо). У цій реалізації модуль фазозсуву наразі планується впровадити надалі, а зараз використовується простіша модель, що об'єднує дані за поза-віською голограмою. Після отримання комплексного поля проводиться чисельна поширювальна операція (метод Кірхгофа-Френеля або метод кутового спектра), яка дозволяє сфокусувати хвилю і побудувати глибинну карту об'єкта. На практиці ми поєднуємо такі реконструйовані карти у єдину тривимірну хмару точок. Для генерації *STL*-моделі використовується алгоритм «*Marching Cubes*» (або аналогічний), який витягує поверхню рівня з об'ємних даних. Готова *3D*-модель може бути повернена та масштабована користувачем, що реалізовано в додаткових утилітах *Python*. Отже, основні блоки програмного забезпечення включають:

Модуль зчитування та відображення зображень: бібліотеки *OpenCV* чи *NumPy* для імпорту кадрів з камери, виведення їх на екран, перетворення типів, нормалізацію.

Фур'є-фільтрація: обчислення *2D-FFT* для кожного кадру, застосування ідеалізованих фільтрів (біжуче вікно, Гаусівське та ін.), щоб виключити небажані частоти та шум. Це дозволяє відділити реальне та уявне зображення об'єкта.

Фазозсув та згортка хвиль: якщо активовано фазозсув, з точки зору коду необхідно скласти інтерферограми з відповідними фазовими множниками $e^{i\varphi}$. Для однокадрового режиму без фазозсуву ми отримуємо складну амплітуду з одного голограмного знімка.

Будування об'ємного поля: застосування обраного методу поширення (Френель, Фур'є-спектр) для відновлення об'єктивного фронту хвилі на різній глибині.

Створення *STL*-файлу: з отриманої карти висот будуємо полігональну модель поверхні з порогом інтенсивності. Підібрані критерії вирізки (висота, контраст) забезпечують найкращу якість моделі без зайвих артефактів.

Візуалізація та повернення: реалізовані функції повертання (ротації) тривимірної моделі для аналізу з різних ракурсів.

Таким чином, програмне забезпечення вирішує класичні задачі цифрової голографії: просторове фільтрування, реконструкцію комплексної амплітуди та реконструкцію поверхні об'єкта (побудова *STL*). При цьому *Python*-код модульний і відкритий для подальшого розширення (наприклад, додавання фільтрів шумозниження, валідації зображень, використання бібліотек машинного навчання для покращення реконструкції).

2.6 Моделювання роботи програмної частини.

Було змодельовано 32 інтерференційні картини які утворюються при відбиванні об'єктного світла від рівної опуклої поверхні (сектору сфери), з дефектом – діркою на поверхні.

На площині реєстратора (зазвичай фотопластинки або CCD) фіксується інтенсивність поля. В моделі розраховують комплексні значення $E_o(x, y)$ та $E_r(x, y)$ амплітуди об'єктної та опорної хвиль у кожній точці (x, y) площини детектора (з врахуванням розповсюдження хвиль від джерел до цієї площини). Припускаючи скалярний метод, можна застосувати інтеграл Френеля–Кірхгофа (2.1):

$$E_o(x, y) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{S_{\text{об'єкт}}} E_{\text{inc}}(X, Y) \cdot \frac{e^{iks}}{s} \cdot \cos \chi \, dS, \quad (2.1)$$

де s — відстань від елемента dS об'єкта до точки (x, y) детектора,

χ — кут нахилу хвилі.

Аналогічно обчислюється поле опорної хвилі. На практиці часто використовують апроксимацію Френеля або засоби БПФ (швидкого перетворення Фур'є) для обчислення цих інтегралів. Важливо, що амплітуда опорної хвилі $|E_r|$ часто вважається відносно сталою по площині, а об'єктної — залежить від геометрії відбиття і відстані до поверхні.

Після цього інтенсивність обчислюється як квадрат модуля сумарного поля (2.2):

$$I(x, y) = |E_o(x, y) + E_r(x, y)|^2, \quad (2.2)$$

Отримане зображення (оскільки моделюється сфера, то одне зображення можна використовувати повторно, оскільки сфера є однаковою при спостереженні зі всіх кутів). Отримані зображення показано на рисунках 2.4 та 2.5:

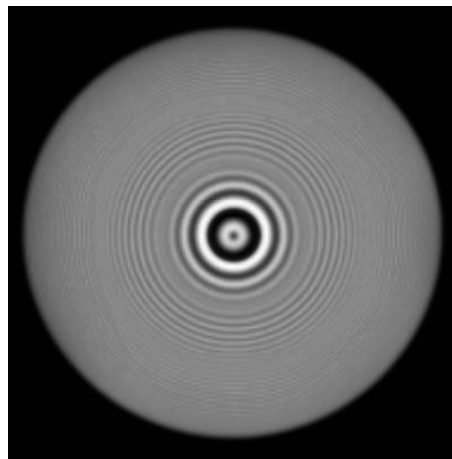
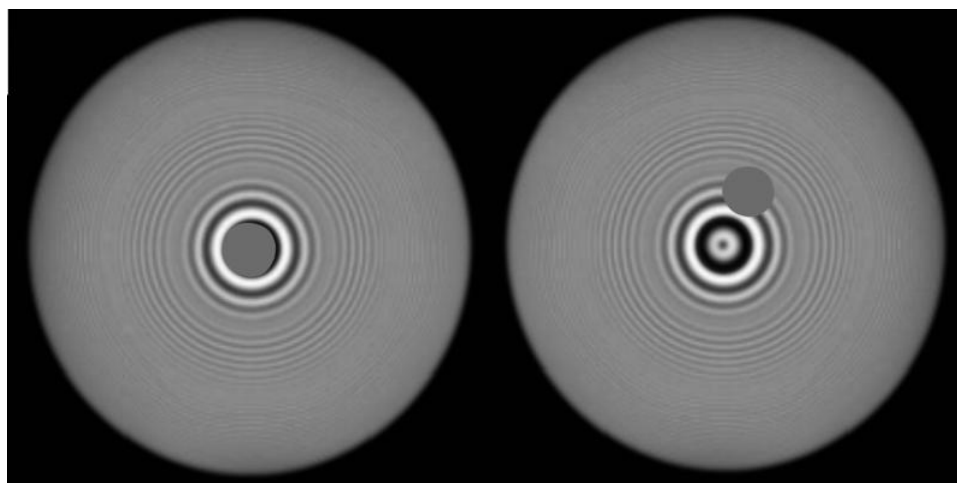


Рисунок 2.4 — Змодельована інтерференційна картина рівної поверхні сфери.

Щоб змодельовати дефект поверхні сфери—, вводять просту маску, що робить об'єктний внесок нульовим у цій області.



а)

б)

Рисунок 2.5 — Змодельовані інтерференційні картини ділянки з дефектом: а) у позиції повороту 0° , б) у позиції повороту 45° .

Тривимірні зображення отримані з різних ракурсів зображено на рисунках 2.6 та 2.7.

При завантаженні цих зображень отримуємо тридцять дві 3D-моделі:

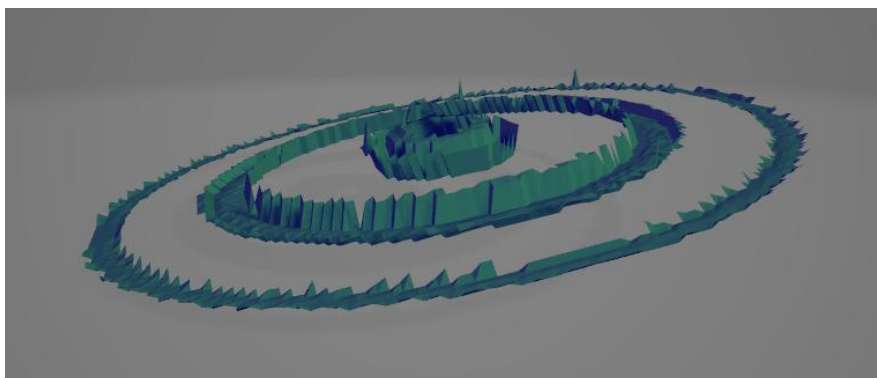


Рисунок 2.6 — Модель отримана з рівної ділянки.

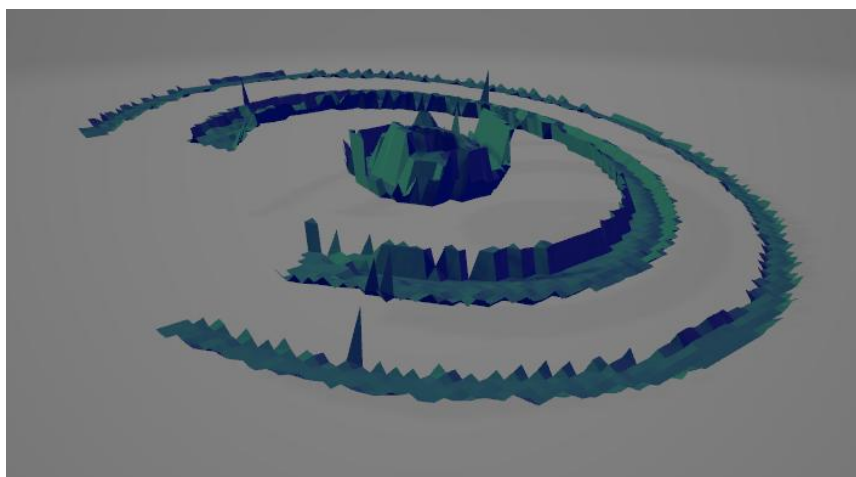


Рисунок 2.7 — Одна з моделей ділянки з дефектом.

Далі програма з отриманих моделей реконструює тривимірне зображення
споверхні (рис.2.8) :

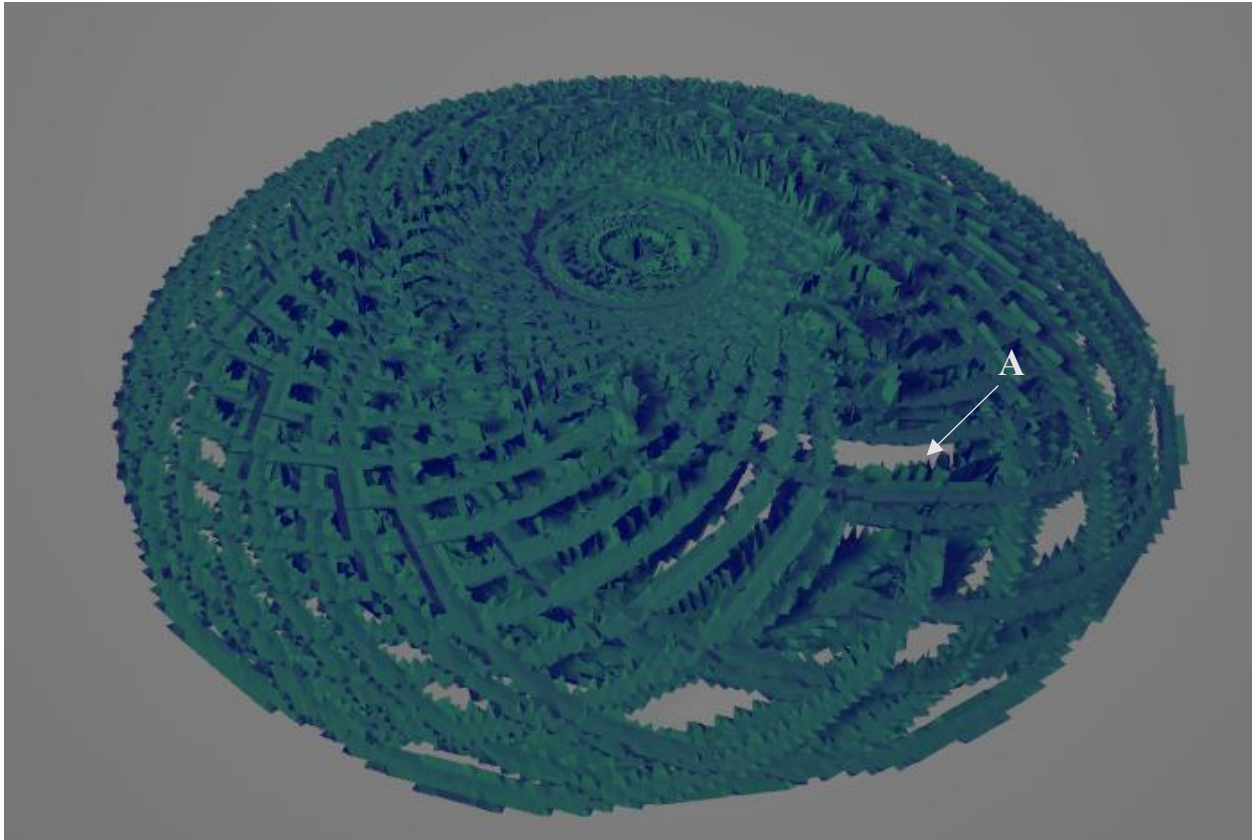


Рисунок 2.8 — Реконструйоване зображення: А – дефект (дірка).

Висновок до розділу 2

Розглянута динамічна спекл-структура поєднує оптичні, електронні та програмні складові для отримання тривимірної інформації через інтерференційні зображення. Оптичний блок забезпечує формування статичного та рухомого спекл-патерну на об'єкті та еталонному промені, електронний – синхронне управління рухомими елементами і зчитування інтерференційних голограм, а програмний – реконструкцію 3D-моделі. Загальні характеристики електроніки (аналогове управління гальванометрами, живлення лазера, синхронізація) сумісні з інженерними практиками. Програмна частина, реалізована на *Python*, включає всі необхідні алгоритми цифрової голографії: Фур'є-перетворення, фазове зрушення, чисельне поширення хвиль, побудова об'ємної моделі. Таким чином, сформована динамічна спекл-

структура може стати основою експериментальної установки для оптичної реконструкції тривимірних зображень із високою точністю.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Метою даного розділу є виявлення та оцінка потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що створюються конструкцією приладу, який проектується, а також визначення заходів їх усунення або зменшення впливу відповідно до чинних норм охорони праці та безпеки життєдіяльності.

3.1. Характеристика приладу

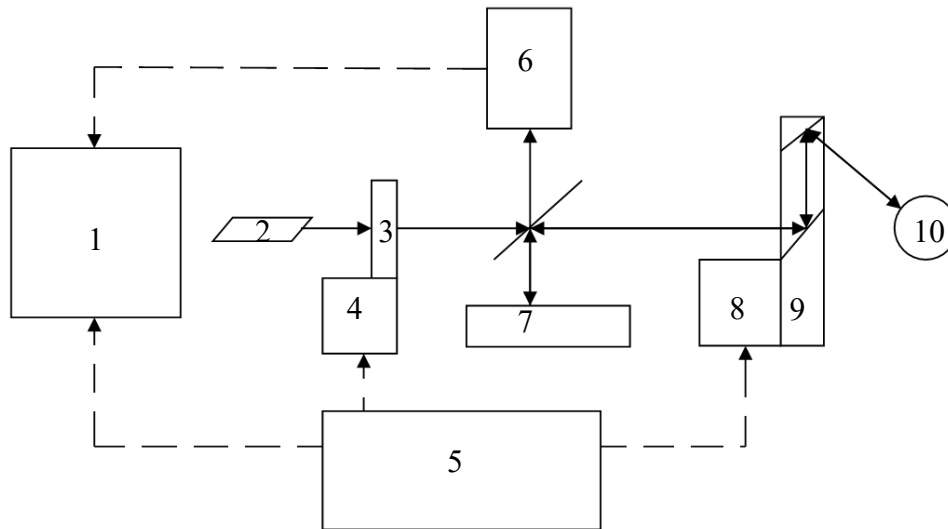


Рисунок 3.1 — Спрощена функціональна схема приладу: 1 – комп'ютер, 2 – лазер, 3 – дифузор, 4 – двигун дифузору, 5 – модуль управління двигунами, 6 – камера, 7 – дзеркало, 8 – двигун обертальної установки, 9 – обертальна установка, 10 – досліджуваний об'єкт.

Промінь світла зображається суцільною лінією, електричний сигнал – штрихованою: світло з лазера 2, проходить рухомий дифузор 3, який приводиться до руху мотором 4, що керується модулем управління 5 (що складається з мікроконтролеру та модулю керування (контролер Arduino також подає зворотній сигнал комп'ютеру 1), далі промінь розділяється на два – опорний та об'єктивний, опорний промінь відбивається від дзеркала 7 та попадає на камеру 6, об'єктивний – попадає на дзеркала обертальної установки 9, що приводиться до руху двигуном 8 (який також керується модулем управління 5), далі він попадає на досліджуваний об'єкт 10, відбитий промінь рухається назад, проходить через установку 9, заломлюється і потрапляє на

камеру 6 утворюючи з опорним сигналом інтерференційну картину, яка надходить у вигляді цифрового сигналу комп'ютеру 1.

Таблиця 3.1 – Характеристики компонентів приладу, що проектується

№	Найменування приладу та його функціональних блоків	Основні характеристики	Кількість
1.	Лазер He-Ne з оптичною системою	Газовий гелій-неоновий лазер безперервного випромінювання, довжина хвилі 632,8 нм; вихідна потужність 5 мВт (когерентне монохроматичне світло з рівномірним розподілом); вбудоване високовольтне живлення (~1500 В для запалювання, ~800 В робоча напруга, струм ~5 мА); ресурс роботи $\geq 10\,000$ год. Оптичні елементи: дзеркала з діаметром 25 мм (відбивна здатність >99% на 632,8 нм) для напрямку променя; лінза колімуюча ($f=50$ мм) для формування рівномірного профілю пучка.	1 лазер, 1 розділяч променя, 2 дзеркала, 1 лінза
2.	Мікроконтролерний модуль (Arduino)	Плата Arduino (ATmega328P), тактова частота 16 МГц; робоча напруга 5 В (живлення від USB-порту); споживаний струм до 500 мА; 14 цифрових і 6 аналогових входів/виходів для керування лазером,	1

		двигуном та зчитування датчиків; габарити плати ~68 x 53 мм.	
3.	Модуль керування двигуном L298N	Двофазний <i>H</i> -міст (драйвер двигуна) тип <i>L298N</i> ; напруга живлення двигуна 5–35 В (живиться від 12 В зовнішнього джерела); вихідний струм до 2 А на канал; падіння напруги на виході ~2 В; забезпечує зміну напрямку та швидкості обертання двигуна (через <i>PWM</i> з <i>Arduino</i>); має вбудовані діоди захисту від ЕРС та радіатор охолодження.	1
4.	Електродвигун обертального столу та дифузору	Колекторний <i>DC</i> -двигун з редуктором; номінальна напруга 12 В; редукція ~50:1 (вихідна швидкість ~60 об/хв без навантаження); стартовий струм (струм заклинювання) ~1 А, номінальний струм ~0,2 А; орієнтовний крутний момент на валу 0,2 Н·м; використовує керування від <i>L298N</i> для підтримки стабільної швидкості.	2
5.	CMOS-камера (модуль реєстрації зображення)	Оптичний сенсор (<i>CMOS</i>) для фіксації спеклових зображень; роздільна здатність, наприклад, 1920×1080 (<i>HD</i>) при 30 кадр/с; інтерфейс передачі даних <i>USB 2.0</i> (підключення до ПК); чутливість в червоному діапазоні 600–	1

		700 нм; оснащена об'єктивом з фокусною відстанню 12 мм для фокусування на області спеклового поля.	
6.	Зовнішнє джерело живлення 12 В	Адаптер змінного струму 220 В AC/12 В DC, із гальванічною розв'язкою (трансформаторний або імпульсний тип, клас II з подвійною ізоляцією); максимальний вихідний струм 2 А; забезпечений запобіжником на первинній стороні; робочий температурний діапазон 0...40 °C.	1

Для взаємодії оператора з приладом передбачено мінімально необхідні засоби індикації та керування. Зокрема, на корпусі приладу встановлено індикатор роботи лазера, а запуск та зупинка обертання платформи можуть здійснюватися через команду з ПК або перемикач на блоці керування. Основні елементи системи «людина – прилад» та способи їх взаємодії наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Взаємодія приладу в системі «людина – об'єкт»

№	Найменування функціонального блока	Вид індикації або керування	Кількість
1.	Блок індикації живлення та лазерного випромінювання	Світлодіодний індикатор показує наявність живлення та увімкнення лазера (свічення при увімкненому лазері); попереджувальна табличка «Лазерне випромінювання» на корпусі інформує оператора про небезпечний фактор.	1

2.	Блок керування живленням і режимами	Тумблер живлення/лазера з ключем (ключ-блокування) для ввімкнення приладу і активації лазерного модуля – запобігає несанкціонованому ввімкненню; кнопка « <i>Start/Stop</i> » для запуску або зупинки обертового столу вручну (альтернативно керування з ПК через <i>Arduino</i>).	1
3.	Модуль реєстрації та відображення результатів	Цифрова камера передає зображення спеклів на персональний комп'ютер, де програмне забезпечення відображає їх на моніторі та виконує реконструкцію; таким чином результати дослідження надаються оператору у зручній формі.	1

Пояснення: блок індикації (1) містить світлодіод та попереджувальні знаки, що сигналізують про стан лазера і живлення. Блок керування (2) включає електричний вимикач з ключем для подачі живлення на лазер (вимикач оснащено індикатором) та кнопку керування двигуном. Модуль реєстрації (3) фактично реалізований комп'ютерною системою обробки: з'єднання камери з ПК здійснюється через *USB*, і на екран комп'ютера виводяться отримані спеклові зображення в режимі реального часу.

3.2. Оцінка потенційних небезпек, що створюються конструкцією приладу, та заходи їх усунення

У конструкції приладу для реконструкції динамічних спеклових зображень присутні компоненти, що можуть створювати небезпеки фізичного, електричного та пожежного характеру. До них відносяться джерело лазерного випромінювання, електричні вузли та рухомі механічні елементи. Нижче подано аналіз кожної з небезпек та основні заходи безпеки.

3.2.1 Фізичні фактори: лазерне випромінювання та механічний рух

Пристрій використовує гелій-неоновий лазер потужністю 5 мВт (клас 3R), що створює ризик пошкодження органів зору при прямому або відбитому попаданні променя в очі. З метою усунення небезпеки лазерна частина обладнується захисними кожухами, а користувачі повинні застосовувати захисні окуляри для довжини хвилі 632,8 нм. Також в конструкції передбачено фіксацію всіх оптичних елементів та попереджувальне маркування.

Механічна небезпека пов'язана з обертальною платформою, яка приводиться в дію малопотужним мотором (12 В, 0.5 А, 6 Вт). Хоча швидкість обертання невелика, існує ризик затягування предметів або частин тіла. Тому рекомендується встановлення захисного кожуха, а обслуговування – лише у вимкненому стані[29-30].

3.2.2 Електрична небезпека

Пристрій використовує кілька джерел живлення: *USB 5 В* для *Arduino*, 12 В – для двигуна та лазерного модуля. Незважаючи на відносно низьку напругу, у складі є високовольтний модуль запалювання лазера (до кількох кіловольт), а також мережевий адаптер (220 В). Ураження можливе при пошкодженні ізоляції або втручанні у вузли живлення.

Для зменшення ризику електротравм всі струмопровідні елементи мають бути ізольовані, а адаптер – сертифікований. Обов'язкове заземлення корпусу та інструктаж персоналу щодо правил експлуатації.

Таблиця 3.3 – Небезпеки електричного характеру

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Лазерний модуль (високовольтна частина)	Висока напруга живлення лазера ($\approx 1-1,5$ кВ)	Пробій ізоляції, випадковий дотик до внутрішніх елементів приладу, неправильне	Ураження електричним струмом оператора

			заземлення корпусу лазера	
2.	Мережевий адаптер 220 В/12 В (блок живлення)	Напруга мережі 220 В змінного струму	Пошкодження ізоляції на первинній стороні, контакт оголених проводів або внутрішніх частин адаптера з користувачем, відсутність заземлення при його необхідності	Ураження електрострумом високої напруги замикання і вихід з ладу адаптера, пожежа.
3.	Електродвигун з драйвером L298N	Електричний струм (12 В)	Перевищення струму (заклинювання двигуна, перевантаження по струму через L298N), порушення ізоляції проводів живлення двигуна	Нагрів і пошкодження ізоляції проводів, можливе іскріння; ураження людини малими напругами (при дотику до оголених проводів)

На основі наведених даних сформовано табл. 3.4, у якій відображено порівняння основних електричних параметрів роботи приладу з їх гранично допустимими значеннями за нормативами.

Таблиця 3.4 – Реальні та нормативні фактори електричної небезпеки.

№	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативне значення
1.	Напруга на доступних частинах	12 В пост. струму (макс.)	110 В пост. струму (гранично допустима напруга дотику в сухих умовах)
2.	Струм через тіло людини	0 мА (в нормальному режимі)	2 мА (поріг небезпечно відчутного струму за ДСТУ ГОСТ 12.1.038)

Таблиця 3.5 – Заходи із забезпечення охорони праці щодо електробезпеки

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору (очікуваний ефект)
1.	Технічні засоби	Застосування подвійної ізоляції та екранування високовольтних ланцюгів лазера; встановлення запобіжника на вході 12 В; використання сертифікованого адаптера живлення класу II з вбудованим захистом від перенапруги.	Виключення можливості дотику до небезпечної напруги; автоматичне
2.	Організаційні заходи	Інструктаж та навчання персоналу з електробезпеки при роботі з приладом; маркування небезпечних зон (наклейки «Висока напруга», «Не відкривати під напругою» на корпусі лазера та адаптера).	Підвищення обізнаності користувача щодо можливих електробезпек;
3.	Режимні (режим експлуатації)	Не передбачені спеціальні режимні вимоги (пристрій працює від низької напруги постійно). Оператору заборонено експлуатувати прилад у вологих приміщеннях або з мокрими руками.	Дотримання стандартних вимог до умов експлуатації електроприладів
4.	Експлуатаційні заходи	Періодична перевірка цілісності ізоляції проводів та справності заземлення металевих частин (якщо такі наявні); візуальний огляд адаптера і кабелів перед кожним використанням.	Своєчасне виявлення пошкоджених дротів або ізоляції; запобігання ситуаціям з прямим доступом до струмоведучих частин.
5.	Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)	Не потрібні (не передбачено постійне використання діелектричних рукавичок чи килимків при роботі з приладом, достатньо дотримуватися організаційних та технічних заходів).	За умови виконання вищенаведених заходів експлуатація приладу не потребує додаткових ЗІЗ від ураження електричним струмом.

3.2.3 Пожежна безпека

Пристрій містить електронні та електромеханічні компоненти, які при несправності або порушенні умов експлуатації можуть бути джерелом займання. Незважаючи на малу потужність і низьковольтне живлення більшості елементів, наявність мережевого адаптера, драйвера двигуна та високовольтного модуля лазера потребує врахування пожежної безпеки.

Таблиця 3.6 – Основні небезпеки, пов’язані з виникненням пожежі

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Електродвигун обертальної платформи	Іскріння щіток, нагрів обмоток	Заклинювання рухомих частин, зростання струму вище номінального; знос щіткового вузла двигуна, що викликає іскри; тривала робота двигуна без перерв	Сильний нагрів двигуна; займання ізоляції обмоток або пластикових деталей поблизу; локальне загоряння всередині корпусу приладу.
2.	Лазерний модуль (блок живлення лазера)	Висока напруга, тепло виділення на резисторах/трансформаторі	Несправність у високовольтному блоці (пробій, витік струму), що веде до безперервного нагрівання; робота лазера в неприпустимому тепловому режимі (відсутність вентиляції)	Критичний перегрів компонентів живлення лазера; пропалювання ізоляції, іскріння; можливий спалах всередині лазерного блока або вибух конденсатора, подальше загоряння приладу.
3.	Блок живлення 220 В/12 В (адаптер)	Іскріння, коротке замикання в адаптері	Стрибок напруги в мережі; внутрішня несправність (пробій діода, конденсатора); пошкодження мережевого шнура або його неправильна	Виникнення іскри або дуги в місці пошкодження; загоряння ізоляції дротів; пожежа всередині корпусу адаптера з можливим викидом полум’я назовні; ураження користувача електричним струмом під час пожежі.

			експлуатація (перегин, замикання жил)	
--	--	--	---	--

Таблиця 3.7 – Реальні та нормативні фактори пожежної небезпеки

№	Фактор пожежної небезпеки	Реальні значення	Нормативні значення
1.	Максимальна температура нагріву компонентів	~60 °C (драйвер <i>L298N</i> при номінальному навантаженні); ~80 °C (обмотка двигуна при тривалій роботі)	< 90 °C – допустима температура нагріву електрообладнання приладів класу E (безпечна для навколишніх матеріалів)
2.	Наявність горючих матеріалів	Є невелика кількість полімерів: ізоляція проводів (ПВХ), плата (склотекстоліт з полімерним сполучним), пластиковий корпус лазера	Використання негорючих або важкогорючих матеріалів (клас горючості не нижче Г1–Г2 за ДСТУ 30244–94); самозагасання матеріалів корпусу та плати (клас <i>UL94 V-0</i>)
3.	Струмовий захист електроланцюга	Номінальний струм живлення 0,5 A (обмежений виходом <i>USB</i>) та 2 A (обмежений адаптером 12 В); в схемі є запобіжник 2 A на 12 В ланцюзі	Наявність захисту від перевищення струму обов'язкова згідно ПУЕ; гранично допустимий струм короткого замикання для даних проводів < 5 A (вище – ризик займання ізоляції)

4.	Категорія приміщення за пожежною небезпекою	Лабораторне або офісне приміщення, відсутні горючі гази чи пил; наявні засоби пожежогасіння (вуглекислотний або порошковий вогнегасник)	Категорія В (пожежовибухонебезпека відсутня, горюче навантаження незначне); оснащення приміщення первинними засобами пожежогасіння згідно ДСТУ Правила пожежної безпеки.
----	--	---	--

Таблиця 3.8 – Заходи із забезпечення охорони праці щодо пожежної безпеки

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору (очікуваний ефект)
1.	Технічні засоби	Забезпечення належного тепловідведення: встановлення радіаторів на силові елементи (драйвер, регулятор лазера); вентиляційні отвори в корпусі приладу. Використання негорючих матеріалів: корпус з металу або вогнетривкого пластику; кабелі в подвійній ізоляції, що самозгасає. Вбудований запобіжник (2 А) на лінії 12 В.	Запобігання перегріву елементів у штатних і аварійних режимах; зменшення ймовірності займання навіть при перегріві (відсутність легкозаймистих матеріалів); автоматичне вимкнення при надмірному струмі, що усуває причину перегріву/пожежі.
2.	Організаційні заходи	Інструкція з експлуатації з розділом про пожежну безпеку: заборона залишати ввімкнений прилад без нагляду; заборона експлуатації поблизу легкозаймистих матеріалів (штор, паперу, летких рідин). Навчання персоналу діям при пожежі (використання вогнегасників, відключення живлення).	Виключення людського фактора, що може призвести до пожежі (необережність, порушення правил); підготовка користувача до швидкого і правильного реагування у разі виникнення займання.

3.	Режимні заходи	Дотримання режиму роботи: періодично вимикати прилад для охолодження (наприклад, через кожні 2 години безперервної роботи робити 15-хвилинну перерву). Не використовувати прилад при перевищенні температури довкілля $> +30^{\circ}\text{C}$.	Обмеження тривалості безперервної роботи знижує ризик накопичення тепла; дотримання температурного режиму гарантує роботу компонентів в штатному діапазоні без перегріву.
4.	Експлуатаційні заходи	Регулярний огляд та обслуговування: перевірка відсутності пилу всередині приладу (пил може сприяти займанням); контроль стану ізоляції проводів та надійності контактів; заміна зношених компонентів (щіток двигуна) до того, як їх несправність призведе до іскріння.	Підтримання приладу в належному стані знижує ймовірність аварійних режимів (коротких замикань, іскріння); видалення пилу зменшує пожежне навантаження та ризик тління.
5.	Засоби індивідуального захисту	Не передбачені (спеціальні костюми або вогнестійкий одяг не потрібні при нормальній роботі з приладом). Оператору достатньо мати навички користування вогнегасником та при наявності задимлення швидко знеструмити прилад.	За штатних умов експлуатації ризик для оператора мінімальний і не вимагає спецодягу; у разі пожежі оператор діє за інструкцією, застосовуючи загальноприйняті засоби пожежогасіння.

3.3. Інструкція з техніки безпеки при експлуатації приладу

Загальні положення:

Роботи з приладом для реконструкції динамічних спеклових зображень допускаються особи, які пройшли відповідний інструктаж з техніки безпеки та ознайомлені з керівництвом по експлуатації даного приладу.

Прилад належить до лазерних вимірювальних систем малого рівня небезпеки (клас 3R за лазерною безпекою) та електротехнічних виробів класу III (працює від низьковольтного джерела живлення)[29-30]. Незважаючи на це, слід суворо дотримуватися наведених вимог безпеки.

Вимоги до приміщення: експлуатація приладу повинна проводитися у сухому, чистому приміщенні при температурі від +10 °C до +30 °C. Не дозволяється використання приладу у вибухонебезпечних або пожежонебезпечних зонах, поблизу легкозаймистих матеріалів. Заборонено працювати мокрими руками або розміщувати прилад у вологому середовищі.

Перед початком роботи необхідно оглянути прилад на відсутність пошкоджень: перевірити цілісність ізоляції проводів, надійність з'єднання кабелів, відсутність тріщин на оптичних елементах. Переконайтеся, що лазерний модуль правильно встановлений і зафіксований, а всі відбивачі (дзеркала) знаходяться в проектному положенні. У разі виявлення будь-яких несправностей експлуатацію заборонено до їх усунення.

Заборонено вносити будь-які конструктивні зміни в прилад, особливо у високовольтний лазерний блок та електросхему, без узгодження з відповідальним конструктором або керівником робіт.

Живлення приладу здійснюється штатним адаптером 12 В, що входить до комплекту, та від *USB*-порту комп'ютера (5 В). Використання несправного або саморобного блоку живлення заборонено. При підключенні до мережі 220 В слід користуватися розеткою зі справним заземленням та захисним відключенням (УЗО) – згідно з вимогами ПУЕ.

Вимоги безпеки під час роботи:

1. **Підготовка до запуску:** Встановити досліджуваний об'єкт або розсіювач на обертальну платформу і надійно його закріпити. Переконайтеся, що в зоні обертання відсутні сторонні предмети, які можуть заважати руху або бути захоплені платформою. Зона виходу лазерного променя має бути вільною: приберіть дзеркальні предмети, що можуть випадково відбити

промінь в сторону оператора. Надіти захисні лазерні окуляри перед увімкненням лазера.

2. **Увімкнення приладу:** Підключити мережевий адаптер до розетки 220 В, а кабель 12 В – до відповідного гнізда на приладі. Під'єднати USB-кабель Arduino до комп'ютера (прилад отримає живлення 5 В). Перевести ключ-блокування лазера у позицію «ввімкнено» і натиснути головний вимикач живлення. Загориться індикатор живлення, що сигналізує про готовність приладу до роботи. **Увага:** лазерний промінь може увімкнутися відразу після подачі живлення – тримайтеся осторонь його напрямку.
3. **Налаштування режиму роботи:** Запустити програмне забезпечення на ПК для керування приладом і переконатися, що встановлено з'єднання з *Arduino*. У програмі або апаратно (кнопкою «Start») активувати обертання платформи. Встановити необхідну швидкість обертання згідно методики експерименту (в програмі або регулювальним потенціометром, якщо він передбачений схемою).
4. **Виконання вимірювань:** Увімкнути лазерний модуль (через програму або перемикач лазера, якщо він окремий). Переконатися, що індикатор лазера світиться, а промінь падає точно на цільову зону. Запустити запис зображень з *CMOS*-камери на ПК. Під час роботи **заборонено** дивитися в сторону лазерного променя без захисту або переміщувати оптичні елементи голими руками. Не торкайтеся рухомої платформи. Стежте за показаннями системи: при виникненні нестабільності (ривків двигуна, миготіння лазера) призупиніть експеримент і перевірте справність.
5. **Завершення роботи:** Після отримання необхідних даних вимкніть лазер (кнопкою або командою з ПК) – індикатор лазера має погаснути. Зупиніть обертання платформи (натиснути «Stop»). Далі вимкніть живлення приладу загальним вимикачем: індикатор живлення згасне. Від'єднайте

USB-кабель та адаптер від мережі. Дочекайтеся повної зупинки всіх частин і лише після цього зніміть з платформи зразок.

6. **Прибиральні заходи:** Після вимкнення пристрою накрийте лазерний випромінювач захисною кришкою або чохлам (якщо передбачено конструкцією) для запобігання забрудненню оптики. Зберігайте прилад у сухому провітрюваному місці. Переконайтеся, що поблизу не залишилося увімкнених приладів або відкритих вогнищ.

Аварійні ситуації: У разі виникнення будь-якої нештатної ситуації (поява диму, запаху горілого, іскріння або відмова механізмів) необхідно **негайно знеструмити прилад** – вимкнути живлення кнопкою, від'єднати адаптер від мережі та *USB*-кабель від ПК. Якщо загорівся елемент приладу, використати вуглекислотний або порошковий вогнегасник для гасіння (ніколи не гасити водою через наявність електричної напруги!). При ураженні оператора електричним струмом – негайно відключити живлення і надати першу допомогу, при необхідності викликати медичну службу. Про всі випадки несправностей або травм повідомити відповідальну особу з охорони праці. Відновлення роботи приладу дозволяється тільки після усунення причин аварії та перевірки його працездатності.

Увага! При роботі з лазерним випромінюванням **суворо забороняється** знімати захисні кожухи лазерного модуля або оптичних деталей. У разі необхідності сервісного обслуговування лазера (наприклад, юстування оптики) роботи повинні виконуватися спеціалістом з відключеним від мережі живленням приладом.

Увага! Заборонено спрямовувати лазерний промінь на віддзеркалюючі поверхні чи людей. Перед ввімкненням лазера переконайтеся, що в зоні його дії немає нікого без захисних окулярів. Всі відбиті пучки повинні поглинатися безпечними екранами або пастками для променя.

Увага! Не залишайте працюючий прилад без нагляду. Після завершення експерименту завжди вимикайте лазер і двигун, а також від'єднуйте прилад від мережі. Це попередить перегрів та можливу пожежу, а також виключить випадковий доступ сторонніх осіб до ввімкненого лазера.

Висновок до розділу 3:

У даному розділі було розглянуто та проаналізовано основні потенційні небезпеки, що можуть виникати при експлуатації приладу для реконструкції динамічних спеклових зображень. Визначено небезпечні та шкідливі фактори фізичного, електричного і пожежного характеру, розроблено необхідні заходи щодо їх усунення або мінімізації. Зокрема, запропоновано технічні рішення для забезпечення електробезпеки (подвійна ізоляція, захисні пристрої) та пожежної безпеки (охолодження, вогнестійкі матеріали), а також організаційні заходи і рекомендації щодо безпечної експлуатації. Розроблено чітку інструкцію з техніки безпеки при роботі з приладом, яка враховує особливості його конструкції та небезпечні чинники (лазерне випромінювання, низьковольтні електричні кола, рухомі частини). Дотримання наведених вимог і рекомендацій забезпечить надійну та безпечну роботу створеного приладу відповідно до норм охорони праці.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було досягнуто поставлену мету — удосконалено апаратно-програмну систему цифрової голографії для тривимірної реконструкції зображень із покращеними характеристиками. Проведене дослідження ґрунтується на ґрунтовному теоретичному аналізі цифрової спекл-голографії, зокрема особливостей формування спекл-структури при когерентному освітленні та методів зменшення спекл-шуму, таких як статистичне усереднення, фазові модуляції та мультиголографічні підходи. Цей аналіз дозволив систематизувати знання про природу шумів, які обмежують якість голографічної реконструкції.

Особлива увага була приділена дослідженню принципів утворення спекл-візерунків і впливу параметрів фази та інтенсивності світлового фронту на характер інтерференційної картини. Показано, що варіація фазових масок під час освітлення об'єкта дозволяє змінювати просторовий розподіл спекл-шуму, що забезпечує можливість зменшення його впливу через цифрове усереднення реконструкцій.

На основі цього теоретичного підґрунтя була розроблена апаратна схема установки, яка дозволяє реалізувати контрольоване формування динамічної спекл-структури. Схема включає в себе просторовий фазовий модулятор, завдяки якому формується керована флуктуація хвильового фронту, а також засоби синхронізації реєстрації голограм із різними фазовими конфігураціями. Реалізована система дозволила отримати серію спекл-голограм, що містять некорельовані шуми.

Далі було проведено чисельне моделювання реконструкції тривимірних зображень із використанням даних, отриманих на основі змінного спекл-візерунка. Моделювання показало, що усереднення декількох незалежних реконструкцій суттєво покращує точність відновлення об'єкта, зменшує фоновий шум і дає змогу краще відтворити контурні характеристики складної просторової поверхні.

Таким чином, в рамках цієї роботи розроблено ефективну апаратно-програмну систему для цифрової голографічної реконструкції, що використовує динамічну спекл-структуру як інструмент зниження шуму. Запропонована система забезпечує підвищену точність та стабільність тривимірного зображення й має високий потенціал для подальшого вдосконалення і впровадження в практичні наукові та технологічні застосування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Подобрій, А. Д. Електронна система голографічного відображення інформації : кваліфікаційна робота магістра. Суми, 2024.
2. Тищенко, І. А. Інформаційні технології експлуатації голографічних 3D-вітрин : дис. д-ра філос. наук. Київ, 2023.
3. Селятенко, В. О. Амплітудно-фазові голограми, створені методами оптичної скануючої голографії : магіст. дис. Київ : КПІ, 2018.
4. Енциклопедія сучасної України. Голографія. Київ : НАН України, 2004.
5. Левченко, І. П. Голографічні методи неруйнівного контролю : монографія. Київ : Політехніка, 2021.
6. Муравський, Л. І., Вороняк, Т. В. Методи електронної спекл-інтерферометрії : огляд // Електроніка та інформаційні технології. — 2013. — № 3. — С. 3–27.
7. Варишчук, В. І. Інтерферометр на полімерному оптичному волокні ... : дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2021.
8. Гудмен, Дж. У. Вступ до оптики Фур'є. 3-є вид. Вашингтон, 2005.
9. Гудмен, Дж. У. Спекл-явища в оптиці : теорія та застосування. Бінгемтон, 2007.
10. Гаріхаран, П. Оптична голографія. 3-є вид. Кембридж, 2008.
11. Kim, M. K. Digital Holographic Microscopy: Principles, Techniques, and Applications. — Springer, New York, 2011. — XVI, 240 с. — ISBN 978-1-4419-7792-2; DOI: 10.1007/978-1-4419-7793-9 mitpressbookstore.mit.edu.
12. Kreis, M. Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods. Wiley, 2005.
13. Zhang, Y., Peng, P. Digital Holography and Fourier Transform Holography. Wiley, 2013.
14. Денисенко, П. С. Оптичні методи вимірювань. Київ : Либідь, 2020.

15. Кучеренко, Ю. О. Основи когерентної оптики та голографії. Львів : Видавництво ЛНУ, 2020.
16. Kim, T. et al. Analysis of speckle noise suppression ... // Optics Letters. — 2020. — Vol. 45(6).
17. Hahn, J. et al. Image Enhancement in Digital Holography ... // Journal of Display Technology. — 2021.
18. Poon, T. C. Introduction to Modern Digital Holography. Cambridge University Press, 2014. — 223 с. — ISBN 978-1-107-01670-5; DOI: 10.1017/CBO9781139061346 dbc.wroc.pl.
19. Rabal, H. J., Braga, R. A. Digital Holography and Speckle Metrology. CRC Press, 2019.
20. Schnars, U., Juptner, W. Digital Recording and Numerical Reconstruction of Holograms // Measurement Science and Technology. — 2002. — Vol. 13, № 9. — С. R85–R101.
21. Белов, А. В. Arduino: від азів програмування до створення практичних пристроїв. Харків : Наука і Техніка, 2018.
22. Siegman, A. E. Lasers. Stanford : University Science Books, 1986.
23. Svelto, O. Principles of Lasers. 5-е вид. Springer, 2010.
24. Goodno, J. W., Seewald, S. T. Design of Digital Interferometric Systems. New York : Wiley, 2012.
25. Мельник, В. І., Паламарчук, А. В. Основи схемотехніки з використанням Arduino. Київ : Ліра-К, 2022.
26. Глинський, Я. М., Тарасенко, О. А. Електронні системи керування. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019.
27. Raj, R. Embedded System Design using STM32 and Arduino. Springer, 2020.
28. Яницький Д. Т., Богомолів М. Ф. Реконструкція тривимірних спеклових зображень біологічних середовищ // Біомедична інженерія. — 2025. — Вип. 18.
29. ДСТУ EN 60825-1:2016. Безпека лазерних виробів. Частина 1. — Київ, 2016.

30.ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. – Київ, 2011.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Програма для *Arduino*, яка реалізує описану у розділі 2.4 логіку:

```
// Налаштування пінів підключення
#define ENA 9 // PWM-ENA L298N для двигуна дифузора
#define IN1 4 // IN1 L298N для дифузора
#define IN2 5 // IN2 L298N для дифузора
#define ENB 10 // PWM-ENB L298N для двигуна дзеркала
#define IN3 7 // IN3 L298N для дзеркала
#define IN4 8 // IN4 L298N для дзеркала
#define enc1A 2 // Канал А енкодера дифузора (переривання 0)
#define enc1B 11 // Канал В енкодера дифузора
#define enc2A 3 // Канал А енкодера дзеркала (переривання 1)
#define enc2B 12 // Канал В енкодера дзеркала
volatile long encoderCount1 = 0, encoderCount2 = 0;
int diffIndex = 0; // поточне положення дифузора (0..5)
int mirrorIndex = 0; // поточне положення дзеркала (0..31)
// Кількість імпульсів енкодера на один крок (прикладові значення)
const int PULSES_PER_STOP = 600; // імпульсів для 60° (дифузор)
const int PULSES_PER_MIRROR = 125; // імпульсів для 11.25° (дзеркало)
void isr1() {
    // Обробник переривання для енкодера дифузора (канал А)
    if (digitalRead(enc1B) == HIGH) encoderCount1++;
    else encoderCount1--;
}
void isr2() {
    // Обробник переривання для енкодера дзеркала (канал А)
    if (digitalRead(enc2B) == HIGH) encoderCount2++;
    else encoderCount2--;
```

```

}

void setup() {
    // Налаштовуємо виходи для моторів
    pinMode(ENA, OUTPUT); pinMode(IN1, OUTPUT); pinMode(IN2,
OUTPUT);
    pinMode(ENB, OUTPUT); pinMode(IN3, OUTPUT); pinMode(IN4,
OUTPUT);
    // Налаштовуємо входи енкодерів
    pinMode(enc1A, INPUT_PULLUP); pinMode(enc1B, INPUT_PULLUP);
    pinMode(enc2A, INPUT_PULLUP); pinMode(enc2B, INPUT_PULLUP);
    // Прив'язуємо переривання на сигнали каналів А енкодерів
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(enc1A), isr1, RISING);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(enc2A), isr2, RISING);
    Serial.begin(9600); // Ініціалізуємо послідовний порт для зв'язку з ПК
}

void loop() {
    if (Serial.available()) {
        char cmd = Serial.read();
        if (cmd == 'N') { // команда «Next» від ПК – виконати наступний крок
            // Крок обертання дифузора
            if (diffIndex < 5) {
                // Обертання дифузора
                digitalWrite(IN1, HIGH); digitalWrite(IN2, LOW); // напрям обертання
                analogWrite(ENA, 200); // увімкнути обертання з ШІМ-значенням
швидкості
                while (encoderCount1 < PULSES_PER_STOP) { /* чекаємо */ }
                analogWrite(ENA, 0); // зупиняємо мотор
                encoderCount1 = 0; // скидаємо лічильник імпульсів
                diffIndex++; // оновлюємо індекс позиції дифузора
            }
        }
    }
}

```

```

    } else {
        // Останній крок дифузора (6-й), після якого повернути дзеркало
        digitalWrite(IN1, HIGH); digitalWrite(IN2, LOW);
        analogWrite(ENA, 200);
        while (encoderCount1 < PULSES_PER_STOP) {}
        analogWrite(ENA, 0);
        encoderCount1 = 0;
        diffIndex = 0;
        // Обертання дзеркала на 11.25°
        digitalWrite(IN3, HIGH); digitalWrite(IN4, LOW);
        analogWrite(ENB, 200);
        while (encoderCount2 < PULSES_PER_MIRROR) {}
        analogWrite(ENB, 0);
        encoderCount2 = 0;
        mirrorIndex++;
        if (mirrorIndex > 31) mirrorIndex = 0;
    }
    // Передаємо поточні номери позицій дифузора і дзеркала назад на ПК
    Serial.print(diffIndex);
    Serial.print(',');
    Serial.println(mirrorIndex);
}
}
}

```

ДОДАТОК Б

Основне програмне забезпечення, що виконує реконструкцію тривимірної моделі:

```
import os

import numpy as np

from math import sin, cos, radians, pi

from tkinter import Tk, Button, Label, filedialog, StringVar

from PIL import Image


# --- Параметри ---
WAVELENGTH = 0.0006328 # мм
PIXEL_SIZE = 0.005 # мм
TILT_ANGLE_DEG = 9.0 # нахил по XZ
ROTATION_STEP_DEG = 11.25


# --- Завантаження зображення ---
def load_image(filepath):
    img = Image.open(filepath).convert('L')
    return np.array(img, dtype=float)


# --- Обробка одного зображення ---
def reconstruct_from_image(I_obj, I_ref):
    I_obj = I_obj - I_ref
    I_obj[I_obj < 0] = 0


# --- поріг фільтрації темних ділянок ---
threshold = 2.5 # Попіг
I_obj[I_obj < threshold] = 0
```

```

amp = np.sqrt(I_obj)
phase = np.zeros_like(I_obj)
U0 = amp * np.exp(1j * phase)

```

```

H, W = U0.shape
fx = np.fft.fftfreq(W, d=PIXEL_SIZE)
fy = np.fft.fftfreq(H, d=PIXEL_SIZE)
FX, FY = np.meshgrid(fx, fy)
k = 2 * np.pi / WAVELENGTH

```

```

def propagate(U0, z):
    arg = 1 - (WAVELENGTH * FX)**2 - (WAVELENGTH * FY)**2
    arg[arg < 0] = 0
    H_prop = np.exp(1j * k * z * np.sqrt(arg))
    U0_spectrum = np.fft.fft2(U0)
    Uz_spectrum = U0_spectrum * H_prop
    Uz = np.fft.ifft2(Uz_spectrum)
    return Uz

```

```

z_range = np.arange(0, 15.1, 0.1)
best_depth = np.zeros_like(I_obj)
max_amp = np.zeros_like(I_obj)

```

```

for z in z_range:
    Uz = propagate(U0, z)
    amp_z = np.abs(Uz)
    mask = amp_z > max_amp
    max_amp[mask] = amp_z[mask]
    best_depth[mask] = z

```

```

best_depth[I_obj < threshold] = np.nan
return best_depth

# --- Обертання та збереження ---
def depth_to_points(depth_map):
    H, W = depth_map.shape
    cx, cy = W // 2, H // 2
    yy, xx = np.indices(depth_map.shape)
    X = (xx - cx) * PIXEL_SIZE
    Y = (yy - cy) * PIXEL_SIZE
    Z = depth_map.copy() * 0.0025 # Масштаб Z

    # --- Центр обертання ---
    x0 = 0.0    # координата по X
    z0 = -1.0   # координата по Z — наприклад, 5 мм глибше

    # --- Поворот навколо точки (x0, z0) в площині XZ ---
    theta = radians(TILT_ANGLE_DEG)
    X_shifted = X - x0
    Z_shifted = Z - z0
    X_rot = X_shifted * cos(theta) + Z_shifted * sin(theta)
    Z_rot = -X_shifted * sin(theta) + Z_shifted * cos(theta)
    X_rot += x0
    Z_rot += z0
    return X_rot, Y, Z_rot

# --- Побудова STL ---
def build_stl(points, output_file):
    from stl import mesh

```

```

H, W = points[0].shape
vertices = []
faces = []
index_map = -np.ones((H, W), dtype=int)
index = 0
for i in range(H):
    for j in range(W):
        x, y, z = points[0][i, j], points[1][i, j], points[2][i, j]
        if np.isnan(z):
            continue
        vertices.append([x, y, z])
        index_map[i, j] = index
        index += 1
for i in range(H - 1):
    for j in range(W - 1):
        idxs = [index_map[i, j], index_map[i, j+1], index_map[i+1, j],
index_map[i+1, j+1]]
        if all(x >= 0 for x in idxs):
            faces.append([idxs[0], idxs[1], idxs[3]])
            faces.append([idxs[0], idxs[3], idxs[2]])

vertices = np.array(vertices)
faces = np.array(faces)
solid = mesh.Mesh(np.zeros(faces.shape[0], dtype=mesh.Mesh.dtype))
for i, f in enumerate(faces):
    for j in range(3):
        solid.vectors[i][j] = vertices[f[j]]
solid.save(output_file)

```

```

# --- Основна функція ---
def process(folder):
    files = [os.path.join(folder, f) for f in os.listdir(folder) if f.endswith('.png')
and 'Сфера' in f]
    files.sort(key=lambda x: int("."join(filter(str.isdigit, os.path.basename(x))))))
    ref_path = os.path.join(folder, 'Sphere_ref.png')
    I_ref = load_image(ref_path)
    all_points = []
    for idx, file in enumerate(files):
        I = load_image(file)
        depth = reconstruct_from_image(I, I_ref)
        X, Y, Z = depth_to_points(depth)
        phi = radians(ROTATION_STEP_DEG * idx)
        Xr = X * cos(phi) - Y * sin(phi)
        Yr = X * sin(phi) + Y * cos(phi)
        all_points.append((Xr, Yr, Z))

    # Зберегти окрему STL для кожного знімка
    build_stl((Xr, Yr, Z), os.path.join(folder, f'model_{idx+1}.stl'))
    # Об'єднання всіх точок
    # Об'єднання всіх точок в один STL
    combined_X = np.concatenate([pts[0] for pts in all_points], axis=1)
    combined_Y = np.concatenate([pts[1] for pts in all_points], axis=1)
    combined_Z = np.concatenate([pts[2] for pts in all_points], axis=1)
    build_stl((combined_X, combined_Y, combined_Z), os.path.join(folder,
'reconstruction_combined.stl'))
    status_label.config(text="Готово. STL-файли збережено.")
# --- GUI ---
root = Tk()

```

```
root.title("3D реконструкція зображень")
folder_path = StringVar()
folder_path.set("...")
Button(root, text="Обрати папку", command=lambda:
folder_path.set(filedialog.askdirectory())).grid(row=0, column=0)
Button(root, text="Запуск", command=lambda:
process(folder_path.get())).grid(row=0, column=1)
status_label = Label(root, text="Очікування дій...")
status_label.grid(row=1, column=0, columnspan=2)

root.mainloop()
```