

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВАРИЩУК ВАСИЛЬ ІГОРОВИЧ

УДК 535.417

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНТЕРФЕРОМЕТР НА ПОЛІМЕРНОМУ ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ ЯК
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН**

05.11.01 Прилади та методи вимірювання механічних величин

152 - метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ / В.І. Варищук/

Науковий керівник:

Бобицький Ярослав Васильович,
доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04

_____ / Ваикурак Ю. З. /

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Варищук В.І. Інтерферометр на полімерному оптичному волокні як перетворювач для вимірювання механічних величин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

Дисертація присвячена розробленню теоретичних і практичних засад побудови функціональних схем волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів механічних величин на базі інтерферометра на полімерному оптичному волокні. Проведено теоретичне узагальнення основних фізичних властивостей спекл-структур, які формуються на виході багатомодових полімерних оптичних волокон внаслідок міжмодової інтерференції, з точки зору їх можливого використання в якості інформативного параметру для метрологічних застосувань. На основі результатів досліджень запропоновано новий підхід до розроблення волоконно-оптичних сенсорів та вимірювальних перетворювачів механічних величин на базі багатомодових полімерних оптичних волокон. Розроблений метод опрацювання сигналів інтерферометра на полімерному оптичному волокні, який базується на прямому кореляційному порівнянні розподілів інтенсивності опорного та поточного спекл-зображень, дозволяє проводити автоматизований контроль параметрів деформації технічних об'єктів. В результаті досліджень механізму модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних волокнах при селективному збудженні мод запропоновано метод для вимірювання частоти механічних коливань та вібрації, який дозволяє підвищити ефективність перетворення модуляції фази в модуляцію інтенсивності випромінювання на виході волокна. Проведені в роботі дослідження щодо опрацювання та інтерпретації сигналів вимірювальних перетворювачів на багатомодових полімерних волокнах можуть слугувати основою для створення контрольно вимірювальних приладів,

призначених для дослідження різних фізичних полів, а також контролю та діагностики напружено-деформованого стану технічних об'єктів. Враховуючи механічні властивості чутливих елементів вимірювальних перетворювачів на основі полімерних оптичних волокон, їх здатність до мультиплексування та створення протяжних каналів для передачі інформативного сигналу, можуть бути реалізовані розподілені волоконно-оптичні вимірювальні системи.

У **першому розділі** проведено огляд та аналіз існуючих схем волоконно-оптичних інтерферометрів та основних областей їх застосування. Розглянуто методи для реєстрації, обробки та інтерпретації сигналів волоконно-оптичних інтерферометрів при їх використанні в схемах давачів та вимірювальних перетворювачів механічних величин. Проаналізовано останні досягнення в галузі розробки сенсорів та перетворювачів механічних величин на основі багатомодових полімерних оптичних волокон. Обґрунтовано доцільність використання полімерних оптичних волокон в якості чутливих елементів для вимірювальних перетворювачів інтерференційного типу, принцип дії яких заснований на аналізі спекл-структури випромінювання, яка утворюється внаслідок міжмодової інтерференції у волокні.

У **другому розділі** описано та узагальнено основні фізичні властивості спекл-структур, які формуються на виході багатомодових оптичних волокон внаслідок міжмодової інтерференції. Встановлено, що характер зміни спекл-структури при деформації волокна вимагає використання методів прямого кореляційного порівняння опорного та поточного спекл-зображення, без формування картини інтерференційних смуг чи смуг кореляції. Розглянуто питання, пов'язані з цифровою реєстрацією та опрацюванням спекл-структур для їх використання в якості інформативного параметра для волоконно-оптичних перетворювачів механічних величин. Проведено моделювання вихідного сигналу інтерферометра на основі багатомодового полімерного волокна при просторовій фільтрації частини випромінювання.

Третій розділ присвячено експериментальному дослідженню запропонованих методик для вимірювання та інтерпретації інформативного сигналу інтерферометра на полімерному оптичному волокні. Представлено структурні та функціональні схеми вимірювальних перетворювачів на базі багатомодового полімерного оптичного волокна для вимірювання параметрів механічних величин, які працюють на явищі міжмодової інтерференції. Наведено результати дослідження механізму модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод для підвищення ефективності перетворення модуляції фази в модуляцію інтенсивності випромінювання на виході волокна.

У **четвертому розділі** представлено вибрані приклади практичного застосування інтерферометра на полімерному оптичному волокні. Показано, що запропоновані методи опрацювання сигналів інтерферометра на багатомодовому волокні може бути використаний для побудови волоконних перетворювачів та датчиків контролю деформаційного стану конструктивних елементів та матеріалів, з можливістю інтегрування чутливого елемента вимірювального перетворювача в досліджуваний зразком.

У **висновках** викладені основні результати дисертаційної роботи, розкрито їх науково-практичну цінність та наведено рекомендації щодо їх практичного впровадження.

Ключові слова: волоконно-оптичний інтерферометр, міжмодова інтерференція, спекл-структура, вимірювальний перетворювач.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Варищук В.І. Контроль малих деформацій багатомодового полімерного волокна шляхом аналізу спекл-картин на його виході. / В.І. Варищук, Я.В. Бобицький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»

Радіоелектроніка та телекомунікації. — 2014. — №796 — С. 243-248.

2. Петровська Г.А. Дослідження оптичних волокон методом цифрової голографічної інтерферометрії. / Г.А. Петровська, В.І. Варищук, В.М. Фітьо. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації. — 2014. — №796 — С. 249-253.

3. Варищук В.І. Дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод. / В. І. Варищук, В. Я. Татарин, Я. В. Бобицький // Східно-Європейський журнал передових технологій – 2014. – № 6(9) – С. 17-22.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

4. V. Varyshchuk, Y. Bobitski, H. Poisel. Multimode polymer fiber strain gauge based on speckle correlation, Int. J. Microelectron. Comput. Sci., Vol.5, No3, 2014, pp. 111-115.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science:

5. V. Varyshchuk, Ya. Bobotski, (2015). Correlation Processing of Speckle Pattern in Multimode Polymer Optical Fiber for Deformation Monitoring in Nanometer Range. In O. Fesenko, L. Yatsenko (Ed.), Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies (pp. 329 – 338). Springer International Publishing.

6. V. Varyshchuk, Y. Bobitski, H. Poisel, Deformation sensing with multimode POF using speckle correlation processing method // Opto-Electronics Review 25(1), 2017, P. 19-23.

Праці опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій:

7. V. Varyshchuk, H. Poisel, Y. Bobitski. “Polymer Optical Fiber Based Strain Sensor” Proc. of XII international conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, Lviv-Slavske, February 25 – March 1, 2014, P. 314-316.

8. Варищук В.І. «Алгоритм кореляційного аналізу спекл-картин на виході багатомодових полімерних волокон при використанні в системах томографічного типу» матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Інформаційні та моделюючі технології», Черкаси, 29-31 травня 2014 р., С. 105.

9. V. Varyshchuk, Y. Bobitski, H. Poisel. “Using a multimode polymer optical fiber as a high sensitivity strain sensor”, Proc. of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES), Lublin, Poland, June 19 - 21, 2014, P. 464 – 467.

10. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. “Correlation processing of speckle pattern in multimode polymer optical fiber for deformation monitoring in nanometer range” International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO 2014), Lviv, Ukraine, August 27-30, 2014, P. 485.

11. В.І. Варищук, Я.В. Бобицький. «Метод кореляційної обробки сигналів інтерферометрів на багатомодових полімерних волокнах» матеріали VI-ї Українсько-польської науково-практичної конференції Електроніка та Інформаційні Технології (ЕЛІТ-2014), Львів-Чинадієво, 28-31 серпня 2014 р., С. 17-19.

12. V.I. Varyshchuk, V.Y. Tataryn, Y.V. Bobitski, “Polymer optical fiber vibration measuring based on speckle phenomena” Proc. of the X International Conference Electronics and Applied physics, Kyiv, Ukraine, October 22 – 25, 2014, P. 11 – 12.

13. Варищук В.І., Татарин В.Я, Бобицький Я.В. “Дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод” матеріали IV-ї міжнародної науково-практичної конференції “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”, м. Чернівці, Україна, 23 – 25 жовтня 2014 р., с. 37.

14. Варищук В.І., Татарин В.Я., Бобицький Я.В. Волоконно-оптичний

сенсор частоти вібрації на багатомодовому полімерному волокні, матеріали VII-ї міжнародної науково-технічної конференції Оптоелектронні інформаційні технології «ФОТОНІКА-ОДС-2015», м. Вінниця, 21-23 квітня 2015 р., с.113.

15. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. “An Experimental Study of Utilizing Multimode Polymer Fiber for Load Detection” Proc. of XII international conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, Lviv-Slavske, February 23 – 26, 2014, P. 399-401.

16. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. Prediction of the output signal of multimode fiber speckle sensor. // Матеріали Міжнародної конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016): Збірник тез. – 2016 – С.318-321.

17. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. Algorithm for automated diagnosis of object technical state with multimode fiber sensor. In: Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 IEEE First Ukraine Conference on. IEEE, 2017. p. 744-747.

ABSTRACTS

Varyshchuk V.I. The polymer optical fiber based interferometer as a transducer for measuring mechanical values. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for a scientific degree of Candidate of Technical Sciences on the specialty 05.11.01 “Devices and methods for mechanical values measurement”. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

The thesis is devoted to the development of theoretical and practical principles of construction functional schemes of fiber optic measuring transducers of mechanical values based on polymer optical fiber interferometer. Theoretical generalization of the main physical properties of speckle structures formed at the output of multimode polymer optical fibers due to intermodal interference for their possible use as an informative parameter for metrological applications was conducted. Based on the research results, a new approach to the development of fiber-optic sensors and

measuring transducers of mechanical values based on multimode polymer optical fibers is proposed. The developed method for processing signals of polymer optical fiber interferometer which is based on a direct correlation comparison of the intensity distributions between the reference and current speckle images allows to carry out automated control of the deformation parameters of technical objects. As a result of studies of the mechanism of radiation intensity modulation in multimode polymer fibers with selective excitation of modes, a method for measuring the frequency of mechanical oscillations and vibrations is proposed, which allows increasing the efficiency of phase modulation conversion into the modulation of radiation intensity. Researches in the processing and interpretation of measuring transducers on multimode polymer fibers can be used as a basis for the creation of control and measuring devices designed to study different physical fields, as well as for control and diagnosis of stress-strain state of technical objects. Given the mechanical properties of the sensitive elements of measuring transducers based on polymer optical fibers as well as their ability for multiplexing and creating long channels for information signal transmission, distributed fiber-optic measuring systems can be implemented.

In the first chapter, a review, and analysis of existing schemes of fiber-optic interferometers and the main areas of their application is conducted. Methods for registration, processing, and interpretation signals of fiber-optic interferometers at their use in schemes of sensors and measuring converters of mechanical values are considered. The latest achievements in the development of sensors and transducers of mechanical values based on multimode polymer optical fibers are analyzed. The expediency of using polymer optical fibers as sensing elements for interference-type measuring transducers, the principle of operation of which is based on the analysis of the speckle structure of radiation formed due to intermodal interference in the fiber, is substantiated.

The second section describes and summarizes the main physical properties of speckle structures that are formed at the output of multimode optical fibers due to

intermodal interference in terms of their metrological application. It is established that the nature of the change of the speckle structure during fiber deformation requires the use of methods of direct correlation comparison between the reference and current speckle images, without forming a picture of interference fringes or correlation bands. Issues related to digital registration and processing of speckle structures for their use as an informative parameter for fiber-optic transducers of mechanical values are considered. The simulation of the output signal of the multimode polymer fiber based interferometer at spatial filtering of a part of the radiation is carried out.

The third section is devoted to the experimental study of the proposed methods for measuring and interpreting the informative signal of the polymer optical fiber based interferometer. Structural and functional schemes of transducers based on multimode polymer optical fiber for measuring the parameters of mechanical values operating on the phenomenon of intermodal interference are presented. The results of the study of the mechanism of modulation radiation intensity in a multimode polymer fiber with selective excitation of modes to increase the efficiency of conversion of phase modulation into the modulation of radiation intensity at the fiber output are presented.

The fourth section presents selected examples of the practical application of the interferometer based on polymer optical fiber. It is shown that the proposed methods of processing signals of an interferometer based on a multimode fiber can be used to construct fiber transducers and sensors for control the deformation state of structural elements and materials, with the possibility of integrating a sensitive element of the transducer into the sample.

The conclusions present the main results of the thesis, reveal their scientific and practical value, and provide recommendations for their practical implementation.

Keywords: fiber-optic interferometer, intermodal interference, speckle structure, measuring transducer.

Зміст

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ІНТЕРФЕРОМЕТРИ ЯК	
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН	23
1.1. Принципи роботи та конфігурації схем волоконно-оптичних інтерферометрів	23
1.1.1. Волоконно-оптичні інтерферометри Маха-Цендера та Майкельсона.....	25
1.1.2. Волоконно-оптичний інтерферометр Фабрі-Перо	28
1.1.3. Волоконно-оптичний інтерферометр Саньяка	31
1.2. Використання полімерних оптичних волокон в давачах інтерференційного типу.....	32
1.3. Давачі інтерференційного типу на основі полімерних оптичних волокон: аналоги традиційних схем інтерферометрів.....	37
1.3.1. Давачі на основі інтерферометрів Маха-Цендера і Майкельсона.....	37
1.3.2. Давачі на основі інтерферометра Фабрі-Перо.....	39
1.3.3. Давачі, які застосовують інтерференцію між модами в одному оптичному волокні.....	41
Висновки та постановка задач дослідження.....	46
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ІНТЕРФЕРОМЕТРА	
НА БАГАТОМОДОВОМУ ПОЛІМЕРНОМУ ВОЛОКНІ.....	48
2.1. Основні властивості та особливості формування спекл-структур в багатомодових оптичних волокнах.....	48
2.2. Алгоритм опрацювання спекл-зображень сформованих інтерферометром на полімерному волокні при вимірюванні параметрів деформації.....	53

	11
2.3. Особливості кореляційної обробки спекл-структур на виході багатомодових волокон з використанням ПЗЗ камер	62
2.4. Методика вимірювання частоти механічних коливань та вібрації з використанням інтерферометра на полімерному волокні	65
Висновки до розділу 2	73
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ІНФОРМАТИВНОГО СИГНАЛУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА	74
3.1. Вимірювання параметрів деформації полімерного волокна з використанням методу кореляційного аналізу спекл-зображень.....	74
3.2. Дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод	87
3.3. Опрацювання спекл-інтерферограм на виході багатомодового волокна в реальному часі.....	99
3.3.1. Опис запропонованого алгоритму опрацювання зображень	100
3.3.2. Експериментальна перевірка та оцінка похибок отриманих результатів	102
Висновки до розділу 3	107
РОЗДІЛ 4 ВИБРАНІ ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРА НА ПОЛІМЕРНОМУ ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ.....	108
4.1. Контроль деформації бетонних балок з використанням інтерферометра на полімерному волокні.....	108
4.2. Вимірювання частоти механічних коливань з використанням інтерферометра на полімерному волокні.....	116
4.3. Визначення вібраційних характеристик лотка-транспортера за допомогою інтерферометра на полімерному волокні.....	126
Висновки до розділу 4	131

	12
ВИСНОВКИ	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	136
Додаток А. Акти впровадження результатів дисертації	145
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	147

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ВОІ – волоконно-оптичний інтерферометр

КМОН – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник

КОВ – кварцове оптичне волокно

ПЗЗ – пристрій з зарядовим зв'язком

ПК – персональний комп'ютер

ПММА – поліметилметакрилат

ПОВ – полімерне оптичне волокно

ШПФ – швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

Обґрунтування теми дослідження. За останнє десятиліття спостерігається стрімкий розвиток промислової інфраструктури, у зв'язку з чим все частіше виникають завдання діагностики та контролю працездатності інженерних конструкцій, деталей машин та інших складних технічних об'єктів. Одними з основних параметрів таких об'єктів, що підлягають вимірюванню, є механічна деформація і вібрація. Своєчасне виявлення досягнення зазначеними параметрами критичних значень дозволяє запобігти виникненню можливих аварійних ситуацій.

Сьогодні для вирішення завдання контролю напружено-деформованого стану технічних об'єктів застосовують різні методи вимірювання, основними з яких є механічні, тензометричні та п'єзоелектричні методи. Для вимірювання незначних за абсолютною величиною деформацій можуть бути використані індикатори годинникового типу. Ціна поділки таких приладів становить 0.01 мм при діапазоні вимірювань 0 ... 50 мм, та 0.001 мм при обмеженнях діапазону вимірювань до 1мм. Переваги індикаторів годинникового типу полягають в простоті конструкції, малій вартості та доступності приладу, а основним недоліком є обмеженість діапазону вимірювання. Для вимірювання лінійних деформацій елементів під час випробувань використовують також тензометри. Розрізняють механічні тензометри, електромеханічні, струнні та тензорезистивні. До групи механічних тензометрів відноситься важільний тензомер з ціною поділки 0,001 мм, що дозволяє при базі вимірювання 100 мм оцінювати відносні деформації з точністю до 10^{-5} . Широко використовуються електромеханічні тензометри, що закріплюються на досліджуваному елементі з допомогою струбцини. У струнних тензометрах використовується залежність між частотою власних коливань і натягом струни. Вони застосовуються приставними або закладаються в товщу досліджуваного матеріалу в захисній трубці і, як правило, використовуються для тривалих вимірювань.

Розроблено велику кількість засобів, що дозволяють вимірювати параметри механічних вібрацій. Існує дві основних групи методів вимірювання

параметрів вібрації: контактні, які передбачають механічний зв'язок давача з досліджуваним об'єктом, і безконтактні методи. Найбільш поширеним є метод вимірювання вібрації за допомогою п'єзоелектричних давачів. Вони дозволяють проводити вимірювання з високою точністю в діапазоні низьких частот і великих амплітуд вібрації, але внаслідок своєї високої інерційності, яка призводить до спотворення форми сигналу, неможливо проводити вимірювання механічних коливань з високою частотою та малої амплітудою. Крім того, якщо маса досліджуваного об'єкта, а отже, і його інерційність не велика, то давач такого типу може істотно впливати на характер вібрації, що вносить додаткову похибку при вимірюваннях. Використання безконтактних методів вимірювання частоти вібрації виключає вплив на досліджуваний об'єкт і забезпечує малу інерційність. Істотним недоліком групи безконтактних методів є високі вимоги до якості поверхні досліджуваного об'єкта та стану атмосфери (вологість, запиленість і т.п.).

Завдяки інтенсивному розвитку волоконної оптики були розроблені та отримують все більше поширення волоконно-оптичні давачі, які мають низку переваг у порівнянні з тензодатчиками: більш високу чутливість, завадостійкість і стійкість до впливів агресивних середовищ, а також меншу вартість. Волоконно-оптичні інтерферометри знаходять щораз ширше застосування в різних галузях науки і техніки. В першу чергу це машинобудування, метрологія, будівництво та охоронні системи, де волоконно-оптичні перетворювачі складають основу вимірювальних перетворювачів та сенсорів механічних величин. Переважна більшість таких пристроїв базується на одномодових оптичних волокнах, які мають високі технічні, насамперед трансмісійні характеристики. Використання багатомодових волокон дещо обмежується через погіршення якості сигналу, що відбувається через інтерференцію між модами волокна. Внаслідок такої інтерференції, на виході волокна утворюється так звана спекл-картина, більше відома як модальний шум при передачі інформації. Однак, такий недолік можна використати для створення нових типів волоконно-оптичних сенсорів та перетворювачів, що

послугувало мотивом для даної роботи. Вповні можливою є реалізація інтерферометрів на багатомодовому волокні, в яких інтерференційний сигнал буде визначатись різницею фаз між інтерферуючими модами. Використання цього принципу дозволяє зменшити як елементну базу волоконного інтерферометра, так і його масо-габаритні розміри, що призводить до зменшення його вартості в цілому, а також дає змогу реалізувати адаптивні сенсори та перетворювачі фізичних величин на базі такого інтерферометра.

Оскільки полімерні оптичні волокна можуть бути легко інтегровані у дослідні зразки, монтуватись в об'ємі або на поверхні металевих чи композитних структур, вони забезпечують унікальні можливості для моніторингу їх напруженого-деформованого стану. Крім того, волоконно-оптичні сенсори дають можливість створювати протяжні вимірювальні системи (так звані антени), забезпечуючи таким чином моніторинг технічного стану обширних ділянок досліджуваних об'єктів. Це дає додаткові переваги, такі як чутливість сенсора по всій довжині досліджуваного об'єкта, простоту вимірювальної системи та зменшення вартості чутливого елемента, в результаті чого такі сенсори можуть знайти застосування у різних сферах науки і техніки. Зокрема, за рахунок можливості вбудовування волоконно-оптичних чутливих елементів всередину залізобетонних конструкцій чи композитних матеріалів, без суттєвої зміни їх механічних властивостей, відкриваються перспективи для створення так званих «розумних» матеріалів та інженерних конструкцій.

Актуальність даної роботи пов'язана з можливостями створення і застосування нових інтерферометричних методик та пристроїв які базуються на явищі інтерференції між модами в полімерному оптичному волокні. Проведення досліджень за даною тематикою та визначення основних принципів та особливостей роботи таких інтерферометрів дозволить не лише розширити область їх застосування, але і може дати поштовх для розвитку та вдосконалення волоконно-оптичних інтерференційних сенсорів. Таким чином, наукова задача розробки методів, засобів та технічної реалізації контролю параметрів механічних величин з використанням сенсорів та перетворювачів на

основі полімерних оптичних волокон є актуальною на сьогоднішній день та має важливе значення для розвитку оптичного приладобудування та широкого кола метрологічних застосувань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до основних напрямів наукових досліджень кафедри фотоніки Національного університету “Львівська політехніка”, частина результатів яких увійшла до звітів по госпдоговірних та держбюджетних темах: Г/д № 0471 «Розроблення методологічних засад технічного діагностування характеристик матеріалів та елементів конструкцій методами голографічної цифрової інтерферометрії»; Г/д № 0505 «Розроблення методологічних засад технічного діагностування матеріалів та елементів конструкцій з допомогою волоконно оптичних інтерферометрів»; «Архітектоніка мікро- та наноструктур в умовах оптичної дифракції та плазмонного резонансу для потреб сучасної фотоніки» (реєстраційний номер 0115U000427, 2015-2017 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розроблення і застосування нових інтерферометричних методів вимірювання параметрів деформації та вібраційних характеристик інженерно-технічних об'єктів на основі явища інтерференції між модами в багатомодових полімерних оптичних волокнах.

Для досягнення поставленої мети в роботі виконано наступні науково-технічні завдання:

1. Провести порівняльний аналіз існуючих вимірювальних методик та схем волоконно-оптичних інтерферометричних сенсорів і перетворювачів на основі багатомодових волокон.
2. Розробити та експериментально дослідити методи опрацювання сигналів інтерферометрів на основі багатомодових полімерних оптичних волокон та розробити на їх основі методи вимірювання параметрів деформації та частоти механічних коливань технічних об'єктів.

3. Розробити структурні та функціональні схеми інтерферометричних перетворювачів на базі багатомодових полімерних оптичних волокон, які використовують явище інтерференції між модами у волокні.
4. Розробити макети інтерферометричних вимірювальних перетворювачів параметрів деформації та частоти механічних коливань технічних об'єктів.
5. Розробити методики вимірювання параметрів деформації та частоти механічних коливань технічних об'єктів та застосувати їх для вимірювання параметрів напружено-деформованого стану інженерно-технічних об'єктів.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання механічних величин на основі аналізу явища взаємної інтерференції між направленими модами в багатомодовому полімерному оптичному волокні.

Предмет дослідження – методи вимірювання параметрів деформації та вібрації технічних об'єктів на основі опрацювання інтерференційної спекл-структури випромінювання на виході багатомодових полімерних волокон.

Методи досліджень. Дослідження ґрунтуються на методах вимірювання параметрів фізичних величин з використанням волоконно-оптичних інтерферометрів, методах реєстрації та цифрової обробки зображень, кореляційного опрацювання спекл-інтерферограм, методах спектрального аналізу сигналів.

Наукова новизна одержаних результатів. До основних наукових результатів, одержаних в дисертаційній роботі, можна віднести наступні:

- проведено теоретичне узагальнення особливостей опрацювання інформативного сигналу інтерферометра, отриманого внаслідок міжмодової інтерференції світлових хвиль у полімерному оптичному волокні, що дало можливість сформулювати вимоги до реєстрації спекл-картини випромінювання на виході оптичного волокна;
- вперше одержано аналітичну залежність зміни додаткової різниці фаз між модами світлової хвилі на виході відрізка багатомодового полімерного

волокна від його поздовжньої деформації, що дає змогу визначити оптимальні конструктивні параметри вимірювального перетворювача з волоконним чутливим елементом;

- вперше отримано залежність між значенням коефіцієнта кореляції опорного та поточного спекл-сигналів і видовженням полімерного оптичного волокна при його деформації, що дало можливість виділити діапазон значень видовження, де залежність є однозначною та близькою до лінійної;
- розроблено новий метод вимірювання поздовжньої деформації елементів конструкцій, який базується на залежності коефіцієнта кореляції розподілів інтенсивності опорного та поточного спекл-зображень від видовження багатомодового полімерного волокна;
- набув подальшого розвитку метод формування інформативної частини спекл-картини за рахунок модуляції інтенсивності випромінювання при збудженні мод вищих порядків в багатомодових полімерних волокнах, що дає можливість реалізувати прості схеми вимірювання інтенсивності спекл-сигналу за допомогою фотоелемента;

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що:

- сформовані в дисертації рекомендації щодо особливостей реєстрації спекл-структур на виході багатомодових оптичних волокон із застосуванням цифрових матричних сенсорів дають можливість проводити пряме кореляційне порівняння зареєстрованих спекл-зображень;
- на основі розробленого методу вимірювання поздовжньої деформації запропоновано схему волоконно-оптичного вимірювального перетворювача деформації, що може бути використана для вимірювання параметрів деформації технічних об'єктів та елементів інженерних конструкцій; створено спеціалізоване програмне забезпечення, що дозволяє проводити моніторинг та діагностику технічних об'єктів на основі розробленого методу;

- розроблено експериментальну установку для дослідження деформації елементів будівельних конструкцій та застосовано розроблений волоконно-оптичний вимірювальний перетворювач деформації для дослідження видовження бетонних балок; встановлено, що відносна похибка вимірювання деформації балок довжиною до 70 см не перевищує 4.8%;
- результати дослідження модуляції інтенсивності випромінювання при збудженні мод вищих порядків в багатомодових полімерних волокнах застосовано для побудови структурних та функціональних схем волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів частоти механічних коливань та вібрації;
- запропоновано та експериментально досліджено схему вимірювального перетворювача частоти вібрації та механічних коливань на основі багатомодового ПОВ при збудженні в ньому мод вищих порядків; підтверджено лінійність характеристики вимірювального перетворювача для частоти механічних коливань до 10 кГц;
- розроблено методику інтерпретації вихідного сигналу вимірювального перетворювача на базі ПОВ, застосованого для вимірювання частоти вібрації лотка-транспортера; за результатами експериментальних досліджень встановлено, що розроблена методика дає можливість вимірювати значення частоти вібрування лотка при амплітуді не менше 0.1 мм з відносною похибкою не більше 0.3 %, що задовольняє вимоги контролю параметрів вібрації лотків.

Отримані під час створення макетів волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів деформації та вібрації результати можуть бути використані для проектування елементів та схем волоконних інформаційно-вимірювальних систем для автоматизованого вимірювання та контролю механічних величин, для оцінювання технічного стану протяжних об'єктів та компонентів інженерно-технічних конструкцій в процесі їх експлуатації..

Особистий внесок здобувача. Основні результати, представлені у дисертації, отримані автором особисто, або за його безпосередньої участі. В усіх наукових працях опублікованих у співавторстві здобувач брав участь як у постановці загальної проблеми і конкретних задач, пошуку шляхів їх розв'язання, теоретичних розрахунках, експериментальних дослідженнях, так і аналізі, інтерпретації та узагальненні висновків отриманих результатів, зокрема: в роботах [1, 4, 6, 7, 9, 11] здобувачем було розроблено та досліджено метод для вимірювання та контролю параметрів деформації, який базується на кореляційному порівнянні спекл-картин на виході багатомодових полімерних оптичних волокон. Було продемонстровано можливості використання багатомодових полімерних волокон для вимірювання та контролю малих деформаційних впливів; в роботах [3, 13, 15] здобувачем проведено дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних оптичних волокнах при збудженні мод вищих порядків. Автор експериментально дослідив залежність амплітуди сигналу на виході багатомодового полімерного волокна від амплітуди сигналу модуляції; в роботах [8, 5, 10, 17] встановлено та обґрунтовано основні вимоги до інтерферометричних вимірювальних систем на основі полімерних волокон та особливості реєстрації спекл-структур на виході багатомодових волокон з використанням цифрових матричних відеосенсорів; в роботах [12, 14, 16] автором запропоновано методику для вимірювання частоти вібрації та механічних коливань на основі аналізу спекл-картин на виході багатомодового полімерного волокна; в роботі [2] здобувач приймав участь у розробці методики для дослідження розподілу показника заломлення в оптичних волокнах методом цифрової голографічної інтерферометрії.

Обробку усіх результатів експериментальних досліджень представлених у дисертації здобувач здійснив самостійно. Принципові положення, що виносяться на захист, та висновки до роботи сформульовані здобувачем особисто.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційних досліджень викладено у доповідях міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій: 12-тій Міжнародній науково-технічній конференції TCSET'2014 (Львів–Славсько, 25 лютого – 1 березня 2014 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні та моделюючі технології» (Черкаси, 29 – 31 травня 2014 р.); 21-й Міжнародній конференції MIXDES-2014 (Люблін, Польща, 19 – 21 червня, 2014 р.); XII Міжнародній конференції NANO 2014 (Львів, 27 – 30 серпня, 2014 р.); 6-й Українсько-польській конференції ЕлІТ-2014 (Львів-Чинадієво, 28 – 31 серпня 2014 р.); IX Міжнародній конференції «Electronics and Applied Physics» (Київ, 22 – 25 жовтня, 2014 р.); IV-тій Міжнародній науково-практичній конференції “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, 23 – 25 жовтня 2014 р.); XII Міжнародній конференції ФОТОНІКА-ОДС-2015 (Вінниця, 21 – 23 квітня 2015 р.); 13-тій Міжнародній науково-технічній конференції TCSET'2016 (Львів–Славсько, 23 – 26 лютого 2016 р.); Міжнародній конференції УкрМіКо'2016 (Київ, 11–15 вересня 2016 р.); Першій міжнародній науково-технічній конференції UkrCon 2017 (Київ, 29 травня – 2 червня 2017 р.).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано в 17 наукових працях, у тому числі з яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави та 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури із 85 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 150 сторінок друкованого тексту, у тому числі 114 сторінок основного тексту, включаючи 69 ілюстрацій і 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ІНТЕРФЕРОМЕТРИ ЯК ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

1.1. Принципи роботи та конфігурації схем волоконно-оптичних інтерферометрів

Явище інтерференції світла лежить в основі багатьох високоточних вимірювальних систем та сенсорів механічних величин. Використання оптичних волокон дозволяє зробити такі пристрої надзвичайно компактними, адаптивними та економічними. У волоконно-оптичних інтерферометрах використовуються різні функціональні можливості оптичного волокна. Найбільш типовими вимірюваними величинами являються температура, механічне переміщення, вібрація та тиск. У відповідності до їхньої зміни в таких пристроях змінюється показник заломлення оптичного волокна, що спричиняє зміну фази світлової хвилі, яка поширюється вздовж оптичного каналу. Вимірювані величини, відмічені в правій крайній частині рис. 1.1, перетворюються в одну з вказаних величин, наприклад з допомогою нанесеного на оптичне волокно відповідного покриття [1]. На даний час запропоновано амперметри на оптичному волокні з алюмінієвим покриттям, акселерометр з стисненням (або розтягом) оптичного волокна від переміщення вантажу, вимірювачі напруженості електричного і магнітного поля або електричного струму і напруги – з покриттям волокна відповідно із магнітострикційного і електрострикційного матеріалу, або з оптичним волокном намотаним на циліндр виготовлений з цих матеріалів.

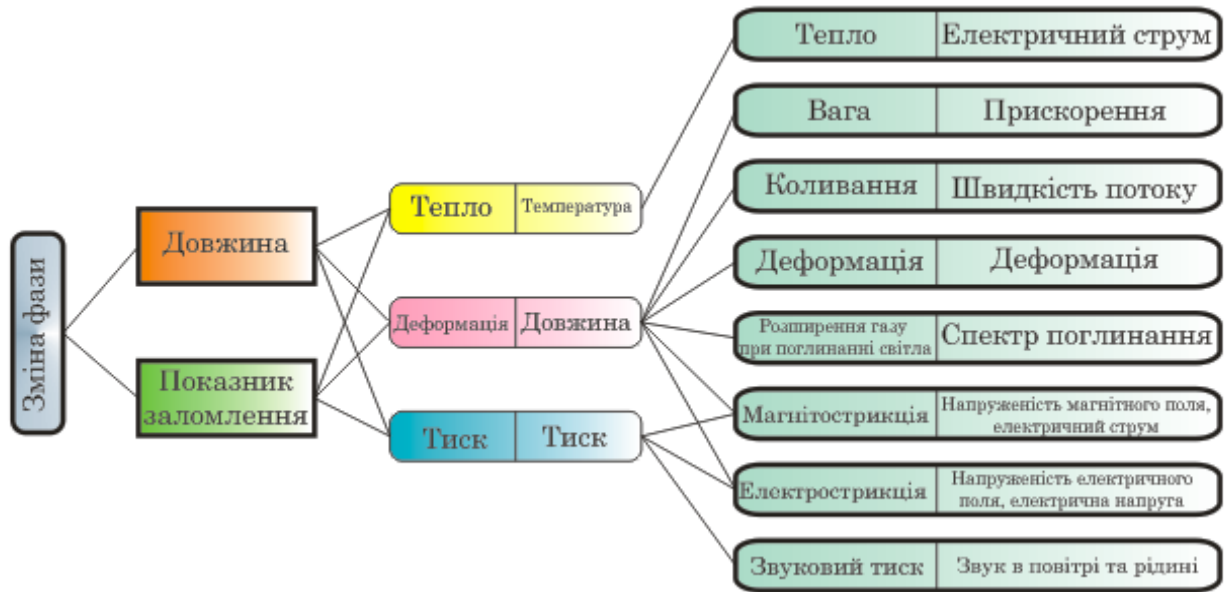


Рис. 1.1. Функціональні можливості волоконно-оптичного чутливого елемента, який працює на основі зміни фази світлової хвилі

Окрім того можлива реалізація різних конструкцій інтерференційних давачів на основі оптичних волокон. Принцип інтерференційних вимірювань базується на накладанні двох або більше когерентних променів та вимірювання різниці фаз між ними. Зазвичай, промінь який входить у волоконний інтерферометр розділяють на дві або більше частин, а потім знову зводять разом для утворення інтерференційної картини. Ціле число довжин хвиль для оптичної різниці ходу між двома променями відповідає максимуму інтенсивності інтерференційної картини, а непарному числу півхвиль відповідає мінімум інтенсивності. Таким чином, на виході волоконно-оптичного інтерферометра (ВОІ) положення мінімуму інтенсивності інтерференційної картини можна змістити до положення максимуму, якщо оптичну різницю ходу променів змінити на непарне число довжин хвиль. Тому, для інтерферометричних досліджень необхідно щонайменше два оптичних тракту для створення різниці ходу променів між ними. Різницю ходу між променями також можна реалізувати в оптичному хвилеводі з двома або більше модами, які поширюються в ньому. Кожна з мод характеризує одне оптичне плече інтерферометра, наприклад як в інтерферометрі Саньяка, де оптична

довжина ходу визначається модами які поширюються за годинниковою стрілкою і проти годинникової стрілки. Оптичні довжини ходу променів можуть визначатись і окремими оптичними каналами передачі у волокнах, наприклад, як у схемі волоконно-оптичному інтерферометра Маха-Цендера. На теперішній час вже реалізовано багато схем інтерферометрів на оптичних волокнах, найбільш поширеними з яких є волоконно-оптичні інтерферометри Саньяка, Маха-Цендера, Майкельсона та Фабрі-Перо. У всіх згаданих схемах інтерферометрів випромінювання потрапляє на вхід інтерферометра, і внаслідок інтерференції може бути представлене через зміну інтенсивності випромінювання на виході. Для розділення чи суміщення випромінювання в двоплечевих інтерферометрах, або формування багаторазового проходження випромінювання в схемах багатопроменевих інтерферометрів, використовують волоконні розгалужувачі та діелектричні дзеркала. Далі в цьому розділі буде коротко розглянуто основні принципи роботи та схеми конфігурації найбільш поширених волоконно-оптичних інтерферометрів.

1.1.1. Волоконно-оптичні інтерферометри Маха-Цендера та Майкельсона

Основними параметрами двоплечевих волоконних інтерферометрів є геометричні довжини плечей інтерферометра, що визначають різницю ходу променів Δl , яка для інтерферометрів Маха-Цендера та Майкельсона становить:

$$\Delta l = |l_1 - l_2|$$

Слід зазначити, що для знаходження значень вихідної інтенсивності потрібно враховувати значення різниці ходу променів з точністю до малих доль мікрона. Також розглядають різницю фаз інтерферуючих променів $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda},$$

де Δl – оптична різниця ходу променів, λ – довжина хвилі випромінювання.

В схемі волоконно-оптичного інтерферометра Маха-Цендера дві інтерферуючі хвилі утворюються за рахунок поділу вхідного випромінювання

оптичним розгалужувачем Х-типу, яке потім знову з'єднується іншим розгалужувачем. Структурна схема волоконного інтерферометра Маха-Цендера зображена на рис. 1.2.

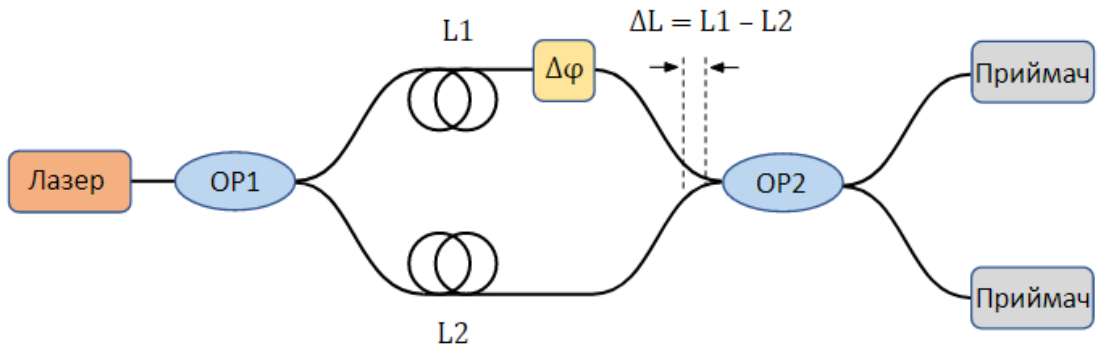


Рис. 1.2. Схема волоконно-оптичного інтерферометра Маха-Цендера

Використовуючи оптичні з'єднувачі типу $N \times N$ з одномодовими оптичними волокнами, можна реалізувати інтерферометр з $N \times N$ кількістю оптичних трактів передачі сигналу, що дозволяє здійснювати паралельне опрацювання інформації та призводить до підвищення точності вимірювання і збільшення інформативності отриманого сигналу [2]. Схематичне зображення конструкції багатоканального волоконного інтерферометра Маха-Цендера зображено на рис.1.3.

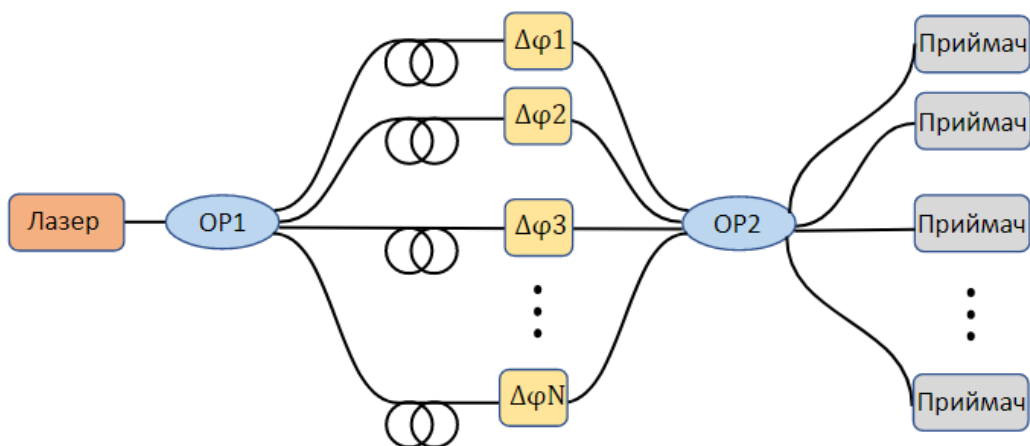


Рис. 1.3. Схема конфігурації волоконно-оптичного інтерферометра Маха-Цендера з N -ю кількістю оптичних каналів

Традиційний метод вимірювання поздовжніх деформацій з використанням волоконно-оптичного інтерферометра Маха-Цендера полягає в тому, що ділянка волокна вимірювального плеча інтерферометра закріплюється в двох точках і зміна довжини волокна перетворюється в зміну фази світлової хвилі, що розповсюджується в вимірювальному плечі. На виході інтерферометра зміна фази перетворюється в зміну інтенсивності випромінювання в результаті інтерференції зі світловою хвилею, яка поширюється в опорному каналі.

Волоконний інтерферометр Маха-Цендера може бути використаний в якості волоконного сенсора, оскільки оптична різниця ходу між його плечима може бути змінена за рахунок дії зовнішніх впливів, наприклад, таких як деформація волокна. Випромінювання в оболонці волокна є більш чутливим до зовнішніх впливів ніж в серцевині. Ґратки з великим періодом, які можуть з'єднати випромінювання від серцевини до оболонки і навпаки, добре підходять для використання у волоконно-оптичних перетворювачах на основі інтерферометра Маха-Цендера.

Базова структурна схема волоконного інтерферометра Майкельсона зображена на рис.1.4. Пучок когерентного світла розділяється на два окремих пучки у верхньому та нижньому одномодових оптичних волокнах за допомогою волоконного розгалужувача X-типу. Промені, відбиті дзеркалами 1 та 2 знову з'єднуються волоконно-оптичним розгалужувачем для створення інтерференційної картини на фотоприймачі.

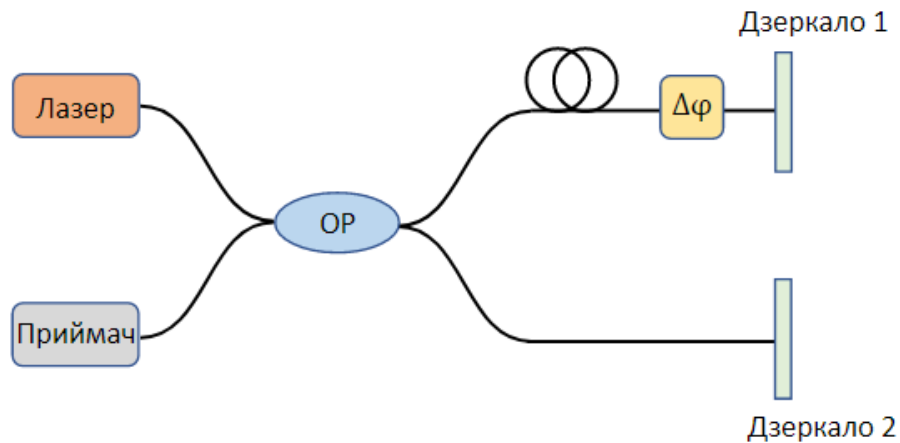


Рис. 1.4. Схема конфігурації волоконного інтерферометра Майкельсона

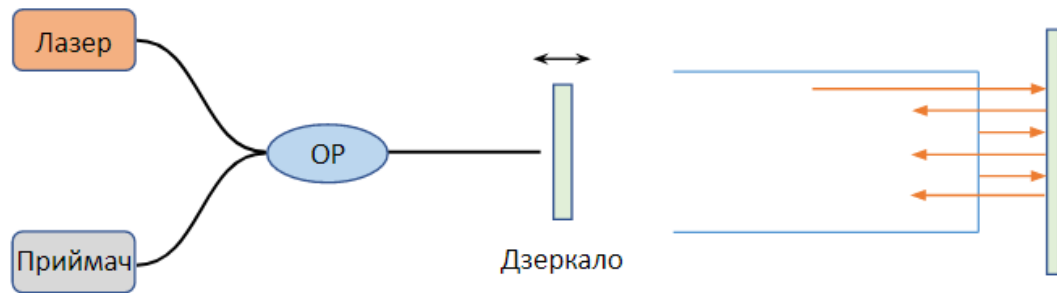
Подібно до волоконно-оптичного інтерферометра Маха-Цендера, можна побудувати волоконний інтерферометр Майкельсона з N -ю кількістю каналів передачі, використавши волоконно-оптичний з'єднувач типу $N \times N$, що дозволяють підвищити чутливість та точність вимірювання інтерферометра.

1.1.2. Волоконно-оптичний інтерферометр Фабрі-Перо

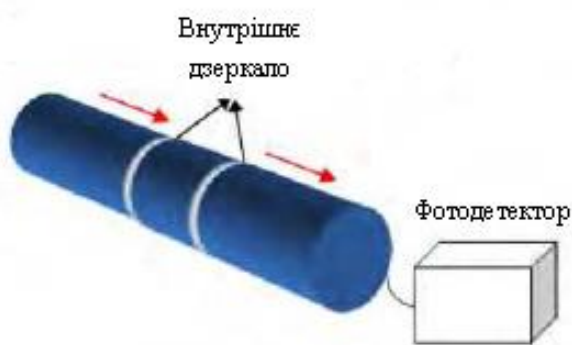
Волоконний інтерферометр Фабрі-Перо складається з двох паралельних відбивачів з коефіцієнтами відбивання R_1 та R_2 , розділених резонатором довжиною l . Різницю ходу променів Δl для інтерферометра Фабрі-Перо становить:

$$\Delta l = 2l$$

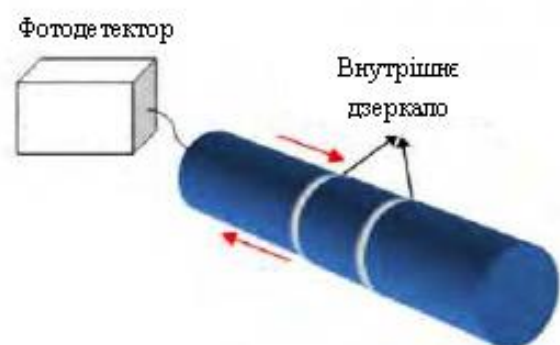
Відбивачами можуть служити дзеркала, межа розділу двох діелектриків чи волоконні Брегівські ґратки. В якості резонатора може бути використано як оптичне волокно, так і інші оптичні середовища. Дві різні схеми волоконного інтерферометра Фабрі-Перо показані на рисунку 1.5.



а)



б)



в)

Рис. 1.5. Схеми інтерферометра Фабрі-Перо на проходження світла (б) і на відбивання світла (в)

Волоконно-оптичні інтерферометри Фабрі-Перо поділяють також на схеми із внутрішнім та зовнішнім резонатором. В схемі із внутрішнім резонатором два дзеркала розділені одномодовим волокном, а в схемі із зовнішнім резонатором дзеркала розділені повітряним проміжком або деяким однорідним матеріалом, відмінним від матеріалу волокна. В обох схемах для передавання світла від джерела випромінювання, через резонатор Фабрі-Перо на детектор використовують одномодове оптичне волокно.

На рис. 1.6. показано три схеми конфігурації волоконних інтерферометрів Фабрі-Перо із внутрішнім резонатором. Один кінець волокна показаного на рис. 1.6.(а) полірують для отримання високого коефіцієнта відбивання. Для збільшення відбивання відполірований торець покривають шарами діелектрика.

Друге дзеркало резонатора є внутрішнім дзеркалом, яке можна отримати шляхом склеювання відполірованих торців волокна або відполірованих торців покритих шаром діелектрика. Обидва дзеркала інтерферометра показаного на рис. 1.6. (б) є внутрішніми дзеркалами оптичного волокна, а в схемі інтерферометра, показаному на рис. 1.6. (в) використовують волоконні Брегівські відбивачі.

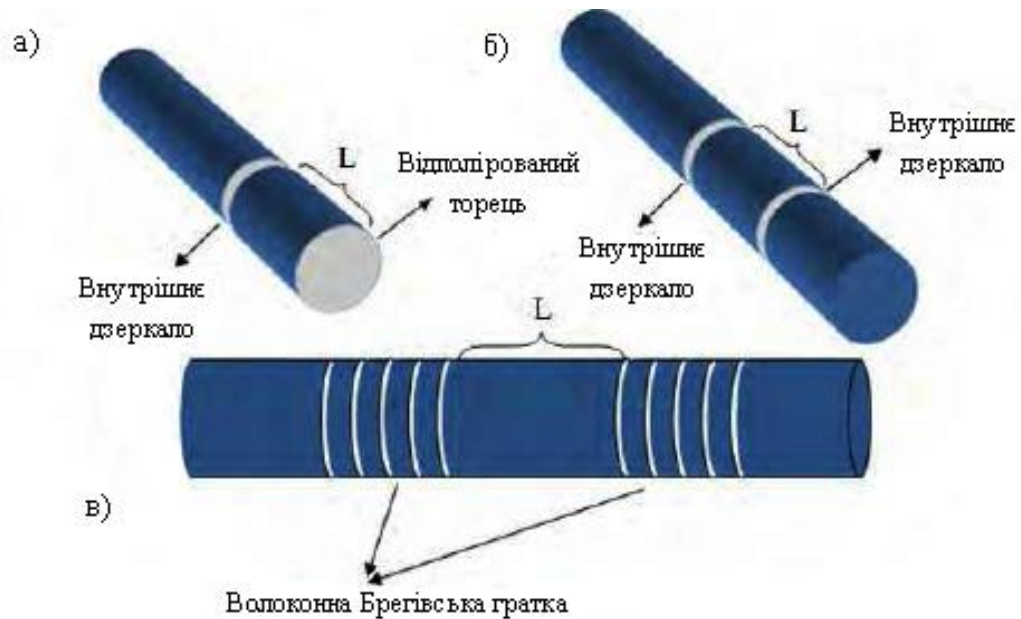


Рис. 1.6. Різні схеми конфігурацій волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо з внутрішнім резонатором.

Чотири різних схеми конфігурації волоконного інтерферометра Фабрі-Перо із зовнішнім резонатором представлені на рис. 1.7.

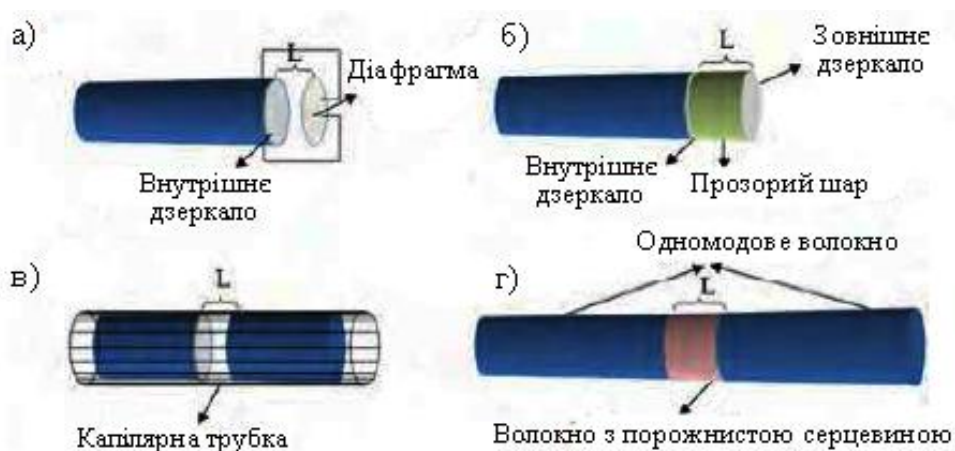


Рис. 1.7. Різні схеми конфігурацій волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо із зовнішнім резонатором

На рис.1.7 (а) повітряний проміжок резонатора обмежується відполірованим торцем волокна і зовнішнім дзеркалом. Довжина резонатора становить приблизно декілька мікрон і може бути збільшена шляхом переміщення зовнішнього дзеркала. В іншій схемі конфігурації, представленій на рис. 1.7 (б) тонка плівка прозорого однорідного матеріалу наноситься на вихідний торець волокна. В схемі представлений на рис. 1.7 (в), повітряний проміжок створюється між відполірованими торцями оптичних волокон, які розташовані на одній осі в порожній капілярній трубці. Структура, показана на рис. 1.7 (г) складається з волокна з порожньою серцевиною, яке з'єднане з двома одномодовими оптичними волокнами. На практиці, дифракційні втрати створюють обмеження в використанні довжини резонатора таких інтерферометрів до декількох сотень мікрон [3].

1.1.3. Волоконно-оптичний інтерферометр Саньяка

Структурна схема волоконного інтерферометра Саньяка зображена на рис. 1.8. Лазерний промінь вводиться в волоконно-оптичний з'єднувач, в середині якого введене випромінювання розділяється на дві частини з однаковими інтенсивностями, кожна з яких проходить по колу через кільце одномодового оптичного волокна в протилежних напрямках. Вихід кільця одномодового волокна спрямовується у напрямку фотодетектора.

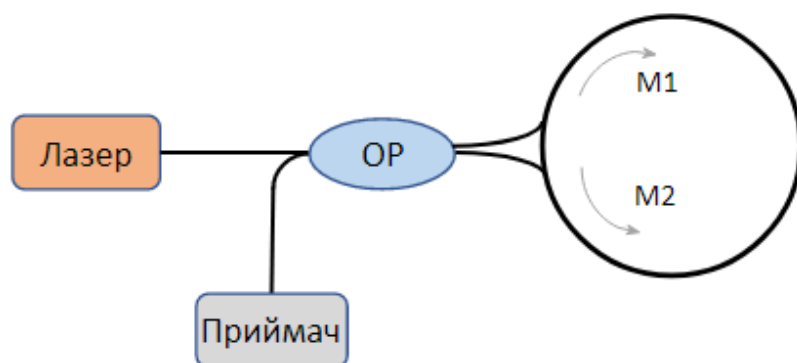


Рис. 1.8. Схематичне зображення волоконного інтерферометра Саньяка

Відповідно до такої схеми конфігурації волоконного інтерферометра Саньяка, його в першу чергу використовують для детектування обертання та визначення кутової швидкості. Якщо інтерферометр Саньяка не обертається, моди які рухаються за годинниковою стрілкою і проти годинникової стрілки мають однакову фазу, тоді як при обертанні інтерферометра Саньяка з деякою швидкістю, оптична довжина ходу однієї з мод є меншою, а інша збільшується. Ефект Саньяка спричинений інтерференцією хвиль, яка залежить від кутової частоти обертання схеми. Аналіз результатів дослідження може бути побудований на Доплерівській різниці частот між різними модами, а вихідний сигнал на детекторі являє собою частоту биття між цими модами.

1.2. Використання полімерних оптичних волокон в давачах інтерференційного типу

Протягом останніх років спостерігається підвищення інтересу до використання полімерних оптичних волокон (ПОВ) в якості чутливих елементів давачів та перетворювачів фізичних величин [4]. Це зумовлено тим, що ПОВ володіють значними перевагами над традиційними кварцовими оптичними волокна (КОВ) при використанні в давачах, які включають велику числову апертуру, малу масу, більшу межу пружної деформації, механічну міцність, високу еластичність при деформації та згинах волокна, а також високу чутливість до деформаційних впливів.

У роботі [11] повідомляється, що давачі на полімерних волокон дозволяють забезпечити вищу чутливість до деформації ніж кварцові оптичні волокна. Це відбувається за рахунок кращого узгодження механічного опору полімерних волокон з іншими матеріалами та набагато нижчого модуля Юнга. Відповідно до цього, автори зазначають, що сучасні волоконно-оптичні сенсори та перетворювачі деформації повинні виготовлятися на базі полімерних волокон. Сучасні полімерні оптичні волокна на основі поліметилметакрилату (ПММА) доступні для одномодового режиму з діаметром серцевини близько 10 мкм, що відповідає діаметру традиційних

кварцових одномодових волокон. Проте, недоліком волокон на основі ПММА є більше затування сигналу на довжинах хвиль, що відповідають ближній інфрачервоній області спектру. Для подолання цього недоліку можна застосувати два підходи. Перший полягає у зміні довжини хвилі детектування до видимого діапазону, де затування ПММА волокон є набагато меншим. Іншою можливістю є використання так званих перфторованих ПОВ, де атоми водню в полімері обмінюється атомами фтору, які зміщують смугу поглинання матеріалу. Затування такого перфторованого ПОВ в ближній ІЧ області спектру є набагато меншим в порівнянні зі звичайним полімерними волокнами.

На відміну від кварцових оптичних волокон, більшість ПОВ є в загальному багатомодовими волокнами, які мають великий діаметр сердцевини і здатні поширювати велику кількість мод, які взаємодіють між собою. На протязі останніх десяти років в багатьох дослідницьких цілях були використані також одномодові та мікроструктуровані ПОВ [5]. Зокрема, останні досягнення у технології виготовлення одномодових ПОВ дозволили суттєво розширити їх використання для інтерференційних вимірювань [11].

Завдяки великому діаметру сердцевини ПОВ є більш простими в механічній обробці та при з'єднанні волокон, тому давачі на основі багатомодових ПОВ позиціонують як більш дешеві і простіші в експлуатації у порівнянні з аналогічними давачами на кварцових волокнах [6]. Перевага низької вартості стала вагомим фактором для дослідження властивостей ПОВ і підштовхує рух технологій детектування до дослідження потенційно дешевих давачів інтенсивності, які використовують багатомодові ПОВ [7].

При використанні ПОВ для вимірювання деформації, основною перевагою полімерних сенсорних матеріалів є їхня пластичність і високі межі пружної деформації. ПОВ природно володіють великою межею пружної деформації, що потенційно забезпечує максимальний діапазон деформації близько 6% – 12%, у порівнянні з 1 – 3% для кварцового волокна [8, 9]. Також, однією з основних переваг ПОВ є малий модуль Юнга, значення якого для

типових ПОВ є значно меншим ніж у кварцових оптичних волокон, що створює передумови для їх застосування в давачах деформації [10].

Менш відомими перевагами ПОВ є їхня висока чутливість до деформації (коефіцієнт оптичної чутливості до деформації) та від'ємний термо-оптичний коефіцієнт. В роботі [11] проведено вимірювання фазової чутливості одномодового ПОВ до деформації та температурних змін. Для досліджень було використано ПОВ з діаметром оболонки з ПММА розміром 125 мкм і діаметром серцевини 6 мкм на основі ПММА/ПС. Вимірювання проводились за допомогою інтерферометра Маха-Цендера, і інтерференція спостерігалась між випромінюванням, яке пройшло через досліджуване волокно, і випромінюванням, що пройшло через друге плече інтерферометра. В процесі вимірювання деформації здійснювався контроль напруження прикладеного до волокна, що давало змогу розрахувати модуль Юнга. Отримане середнє значення при вимірюванні фазової чутливості до деформації $d\Phi/dL$ становило $131 \pm 3 \times 10^5$ рад m^{-1} при довжині хвилі $\lambda = 632.8$ нм. Фазова чутливість до зміни температури волокна $d\Phi/dT$ склала 212 ± 26 рад $m^{-1}K^{-1}$. В таблиці 1. представлено порівняння експериментальних даних, отриманих в роботі [11] з даними для стандартних кварцових волокон, та даними отриманими з теоретичних розрахунків на основі параметрів ПММА.

Таблиця 1.

Порівняння параметрів звичайних кварцових волокон з експериментальними даними отриманими для ПОВ і значень розрахованих на основі опублікованих даних для об'ємного ПММА при довжині хвилі 0.6328 мкм

Параметр	ПОВ, [8]	ПММА, [9, 10]	КОВ, [11, 12]
$\frac{d\Phi}{dL}$	$131 \pm 3 \times 10^5$ рад m^{-1}	132×10^5 рад m^{-1}	115×10^5 рад m^{-1}
$\frac{d\Phi}{dT}$	212 ± 26 рад $m^{-1}K^{-1}$	156 рад $m^{-1}K^{-1}$	99.8 рад $m^{-1}K^{-1}$
Модуль Юнга	2.8 ± 0.2 ГПа	3.3 ГПа	71.7 ГПа

Фазова чутливість полімерних волокон до деформації є приблизно на 15% більшою ніж для кварцових волокон. Крім того, модуль Юнга для ПОВ становить лише близько 5% від значення для кварцових волокон, що відображає високу пружність полімерного матеріалу.

Дослідження фазової чутливості полімерних волокон в роботі [11] проводились в діапазоні деформації 0 – 0.04%. Кісель та ін. [16] продемонстрували вимірювання фазової чутливості одномодових ПОВ на основі ПММА при відносній деформації волокна до 15.8 %. Значення фазової чутливості ПОВ в цьому діапазоні деформації становило 1.39×10^7 рад м⁻¹ при довжині хвилі 632.8 нм, що добре узгоджується з результатами досліджень проведеними в роботі [11]. Слід зазначити, що фазовий відгук ПОВ не є лінійним у всьому діапазоні деформації. При деформації ПОВ більше 1% починає проявлятися нелінійність залежності фазової чутливості до деформації. Аналітичний опис такого ефекту представлено в роботі [17].

При використанні ПОВ в якості чутливих елементів для волоконно-оптичних інтерферометрів та давачів інтерференційного типу важливу роль відіграють їх механічні властивості. Зокрема в роботах [18-20] повідомляється про дослідження на розтяг одномодових ПОВ на основі ПММА при різних швидкостях деформації та умовах циклічного навантаження.

Типовий вигляд кривої залежності деформації від прикладеного напруження для ПОВ представлено на рис. 1.9, (а). Величина деформації є лінійною функцією напруження до досягнення межі плинності, після якої твердість волокна зменшується, в результаті чого невеликий приріст напруження призводить до значного збільшення довжини волокна. Такий ефект відбувається через розщеплювання полімерних ланцюгів та їх зсув один відносно одного і має назву «деформаційне пом'якшення». При більших напруженнях ланцюги починають вирівнюватись і волокно стає більш жорстким. Цей ефект має назву «деформаційне зміцнення». Подальше збільшення напруження буде приводи до руйнування волокна [18]. На

рис. 1.9, (б) зображено типові криві залежності деформації від прикладеного напруження для одномодового ПОВ, виміряні при різних швидкостях деформації. Швидкість деформації волокна змінювалась в діапазоні $0.01 - 0.35 \text{ хв}^{-1}$. При деформації волокна близько 30% спостерігалось руйнування більшості досліджуваних зразків [20]. Швидкість деформації впливає на межу плинності ПОВ (рис. 1.9, (б)) таким чином, що по мірі зростання швидкості деформації збільшується межа плинності і величина прикладеного напруження.

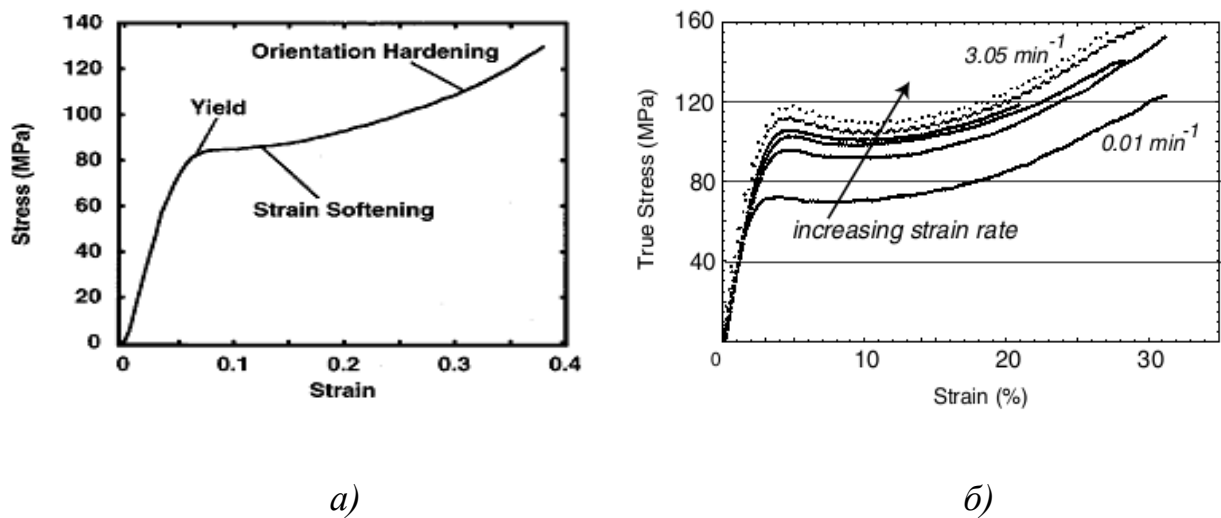


Рис. 1.9. Криві залежності деформації від прикладеного напруження для одномодових ПОВ в діапазоні швидкостей деформації $0.01 - 0.35 \text{ хв}^{-1}$ [20]

При дослідженні ПОВ в умовах циклічного напруження волокно навантажувалось до 0.5% деформації, після чого напруження знімалось. Вимірювання повторювались десять разів і криві залежності деформації від прикладеного напруження для першого, другого, третього і десятого повторень представлено на рис. 1.10.

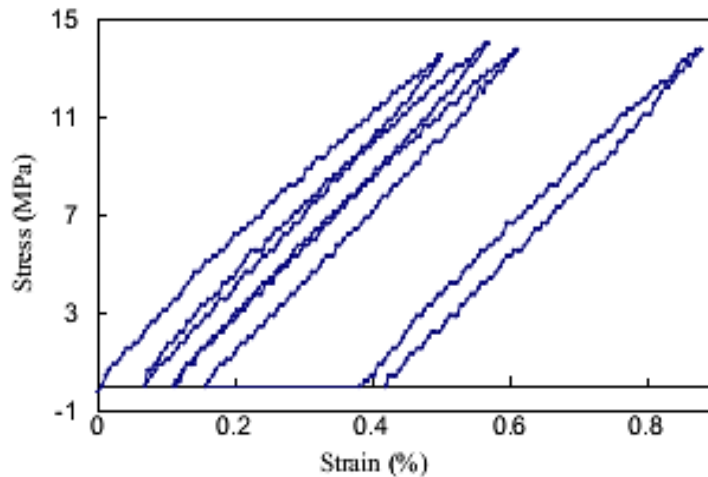


Рис. 1.10. Криві залежності деформації від напруження при циклічному навантаженні ПОВ на основі ПММА

Представлені криві демонструють подібність залежності деформації від напруження для процесів навантаження волокна та при знятті навантаження. Однак, спостерігається наявність залишкових деформацій, середнє значення яких склало 0.045%. Це накладає певні обмеження у використанні ПОВ при дослідженні швидкоплинних деформаційних процесів, оскільки необхідно додатковий час для зникнення залишкових деформацій [19].

1.3. Давачі інтерференційного типу на основі полімерних оптичних волокон: аналоги традиційних схем інтерферометрів

Найбільш поширеними інтерференційними схемами які використовуються у волоконно-оптичних давачах на основі полімерних волокон для прецизійних вимірювань є схеми інтерферометра Майкельсона, інтерферометра Маха-Цендера, інтерферометра Фабрі-Перо інтерферометра Саньяка та схема міжмодового інтерферометра.

1.3.1. Давачі на основі інтерферометрів Маха-Цендера і Майкельсона

Найбільш поширеною схемою волоконно-оптичних давачів інтерференційного типу на основі ПОВ є схема інтерферометра Маха-Цендера. В роботі [16] представлено конфігурацію волоконно-оптичного інтерферометра Маха-Цендера (рис.1.11) при використанні одномодового волокна на основі

ПММА з діаметром серцевини 3.4 мкм легованої полістиролом ($n=1.4954$), та діаметром оболонки 125 мкм ($n=1.4906$). Така схема дозволяє вимірювати зміну фази світлової хвилі, що поширюється у волокні, в залежності від величини прикладеного напруження. Чутливість інтерферометра до зміни фази при напруженні волокна становила 1.39×10^7 рад м^{-1} в діапазоні напруження до 15.8 %. В подальших дослідженнях [21] для такої схеми давача були прокалібровані лінійний та нелінійний фазовий відгук до прикладеного напруження. Прокалібровані значення фазової чутливості для лінійного та нелінійного відгуку становили 1.37×10^7 рад м^{-1} та 3.1×10^6 рад м^{-1} відповідно.

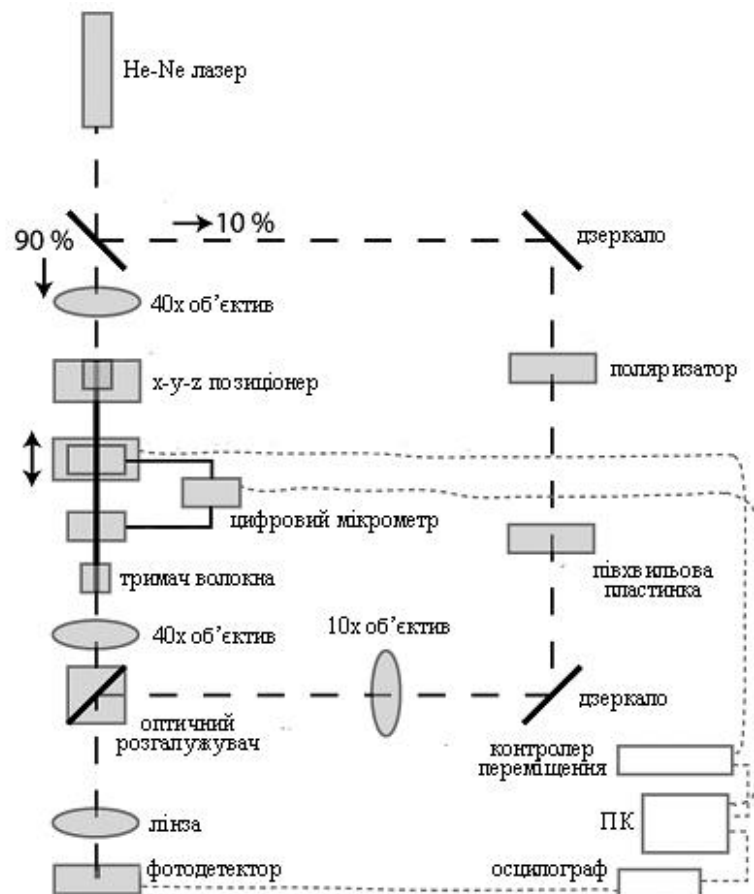


Рис. 1.11. Волоконно-оптичний давач на основі інтерферометра Маха-Цендера для вимірювання фазової чутливості ПОВ [21]

Для забезпечення функціонування давача деформації на основі ПОВ схема інтерферометра Маха-Цендера, зображена на рис. 1.11, була дещо модифікована [22], що дозволило автоматизувати процес вимірювання зміни фази випромінювання.

Подібний принцип був застосований для побудови ультразвукового давача інтерференційного типу на основі одномодового ПОВ [23]. Зсув фази, спричинений ультразвуковою хвилею, яку випромінював відкалібрований п'єзоелектричний перетворювач на чутливу ділянку волокна занурену у воду, був виміряний з використанням волоконно-оптичного інтерферометра Маха-Цендера. Чутливість такого давача на основі ПОВ до виявлення ультразвукових хвиль виявилась більш ніж на один порядок вищою у порівнянні з аналогічною схемою на основі кварцового волокна. В продовженні досліджень у цьому напрямку, в якості чутливого елемента давача ультразвукових хвиль було використано мікроструктуроване ПОВ на основі ПММА з зовнішнім діаметром 125 мкм [24]. Дослідження чутливості давача до впливу ультразвукових коливань проводились в діапазоні частот від 100 кГц до 10 МГц. Порівняння чутливості мікроструктурованих ПОВ з результатами, отриманими для різних типів волокон, показали, що давачі на основі мікроструктурованих ПОВ володіють більшою чутливістю у порівнянні з давачами на кварцових волокнах і дозволяють створювати вимірювальні схеми із значно нижчим рівнем шумів ніж при використанні багатомодових ПОВ.

Схеми волоконно-оптичних давачів на основі інтерферометра Майкельсона є в певній мірі подібними до схем інтерферометра Маха-Цендера. Фактично, волоконно-оптичний інтерферометр Майкельсона являє собою половину схеми інтерферометра Маха-Цендера. Головна відмінність між ними полягає в тому, що інтерферометр Майкельсона потребує лише один волоконно-оптичний розгалужувач і дзеркала для відбивання променів на виході кожного з плечей інтерферометра.

1.3.2. Давачі на основі інтерферометра Фабрі-Перо

Доволі проста та надійна схема давача зміщення на базі волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо з використанням багатомодового полімерного волокна представлена у роботі [25]. Розроблений прототип працює на модуляції інтенсивності відбитого світла при зміщенні чутливої мембрани.

Для його реалізації використано оптичний розгалужувач (1 × 2) багатомодового волокна зі ступінчастим профілем показника заломлення з діаметром серцевини 980 мкм та числовою апертурою 0.5. На рисунку 1.12 показано схематичне зображення чутливого елемента датчика.

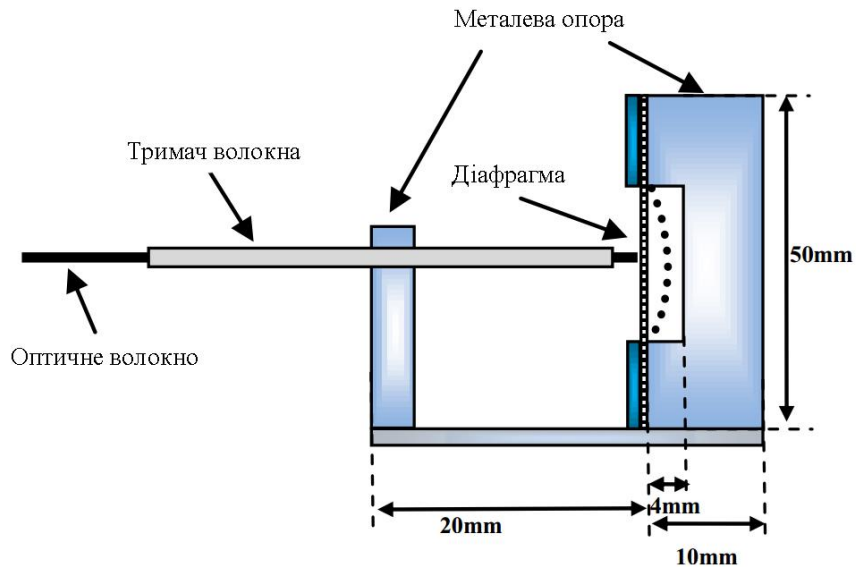


Рис. 1.12. Схема чутлого елемента датчика тиску на основі інтерферометра Фабрі-Перо з використання полімерного оптичного волокна [25]

Мембрана виконана з мідної фольги щільно монтувалась на металевий тримач товщиною 10 мм з порожниною для мембрани товщиною 4 мм. Багатомодове волокно фіксувалось за допомогою металевого тримача таким чином, щоб вихідний торець волокна був розташований у безпосередній близькості з мідною мембраною. Тиск на мембрану спричиняв її відхилення від положення рівноваги, в результаті чого збільшувався проміжок між кінцем волокна і мембраною, що реєструвалось за допомогою фотоприймача розташованого у вихідному плечі інтерферометра Фабрі-Перо. Такий давач має хороші показники лінійності і досягає чутливості 0.0004 В/мм.

В роботах [26, 27] повідомляється про досягнення значень діапазону вимірювання деформацій 1 та 12 мікрострейн відповідно при використанні волоконного інтерферометра Фабрі-Перо. Розроблено також волоконно-оптичні

сенсори на основі інтерферометра Фабрі-Перо з можливістю вбудовування їх в середину досліджуваних матеріалів [28].

Волоконно-оптичні сенсори Фабрі-Перо для вимірювання вібрації знаходять широке застосування при діагностиці масштабних інженерних структур (< 10 Гц) та в інерціальних навігаційних системах [29]. Для вимірювання параметрів періодичних та неперіодичних коливань використовується волоконні інтерферометри Фабрі-Перо із подвійним резонатором [30, 31]. Крім того, розроблено безконтактну самокалібровану волоконну систему детектування вібрації [32] та сенсори для низькочастотних вібраційних вимірювань [33].

1.3.3. Давачі, які застосовують інтерференцію між модами в одному оптичному волокні

Як показали результати багатьох досліджень, волоконно-оптичні інтерферометри потенційно дозволяють досягнути найбільшої чутливості для вимірювальних пристроїв. Необхідність у забезпеченні високої метрологічної якості під час їх практичного застосування веде за собою підвищення вимог до вибору волокон, які застосовуються в якості чутливих елементів інтерферометрів. В зв'язку з цим, в більшості реалізованих на сьогодні схем волоконних інтерферометрів застосовуються одномодові оптичні волокна, в тому числі із збереженням стану поляризації випромінювання. Проте, використання одномодових волокон в інтерференційних схемах, окрім підвищення вартості вимірювальних систем, призводить також до виникнення ряду технологічних і експлуатаційних труднощів. Перш за все це пов'язано з підвищенням вимог до юстування оптичної схеми, і як наслідок до більш жорстких вимог щодо забезпечення захисту пристрою від дії неконтрольованих зовнішніх впливів. Крім того, мала числова апертура одномодових волокон не дозволяє забезпечити ввід в них випромінювання великої потужності, величина якої також обмежується у зв'язку з розсіянням і нелінійними ефектами взаємодії випромінювання у волокнах з малим діаметром серцевини [34].

Перераховані вище фактори чинять негативний вплив на динамічний діапазон і метрологічні характеристики вимірювальних систем. Тому постійно ведуться дослідження спрямовані на вирішення проблеми використання багатомодових волокон в якості чутливих елементів для волоконно-оптичних інтерферометрів, оскільки для багатьох практичних застосувань використання багатомодових оптичних волокон є більш зручними у порівнянні з одномодовими волокнами.

Як відомо, при поширенні когерентного випромінювання через багатомодове оптичне волокно на виході волокна формується так звана «спекл-картина», яка є результатом інтерференції між модами, що поширюються у волокні з різними фазовими швидкостями. Зовнішня дія на волокно приводить до появи додаткових фазових зсувів між направленими модами, що призводить до зміни просторового розподілу інтенсивності спекл-картини. Таким чином, після виділення результату цих змін, можна виміряти величину зовнішньої дії на волокно. Такий принцип використовують для розробки давачів інтерференційного типу на основі аналізу спекл-структури на виході багатомодових волокон [35–37]. Зокрема, в роботах [38,39] представлено методику вимірювання деформації з субмікронною точністю яка базується на аналізі зміни нормованої інтенсивності спекл-картини на виході багатомодового волокна. Автори демонструють, що чутливість даної методики є співмірною з чутливістю вимірювальних схем на основі традиційних волоконних інтерферометрів.

Більшість відомих на сьогодні схем давачів інтерференційного типу на багатомодових ПОВ виявились непридатними для прецизійних вимірювань і переважно використовуються для виявлення та контролю параметрів фізичних величин. Тим не менше, в роботі [40] було продемонстровано можливість застосування звичайних багатомодових ПОВ в схемах електронної спекл-інтерферометрії. Отримані результати демонструють суттєві переваги полімерних багатомодових оптичних волокон над кварцовими волокнами в конфігурації схем електронних спекл-інтерферометрів.

В роботах [41, 42] було використано фоторефрактивні кристали BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) для стабілізації спекл-сигналу на виході багатомодового полімерного волокна. Випромінювання на виході ПОВ фокусувалось на кристал за допомогою лінзи з розміщеною позаду неї апертурною діафрагмою (рис. 1.13). Діаметр апертурної діафрагми визначав розмір спеклів сформованої спекл-картини. На кристалі реєструється результат інтерференції між зображенням спекл-картини на виході ПОВ сформованим лінзою та опорним променем. Вимірювання деформації волокна проводились методом двохекспозиційної голографічної інтерферометрії. Такий підхід дозволяє понизити шуми викликані високою фазовою чутливістю полімерного волокна до деформації, а також дає можливість змінювати динамічний діапазон вимірювальної схеми. Однак, запропонована схема давача є достатньо складною для практичної реалізації і вимагає використання додаткових оптичних елементів. Крім того, такі давачі мають доволі малий діапазон вимірювань і не можуть бути використанні для вимірювання великих величин деформації, зокрема для вимірювання та контролю деформації конструкційних елементів будівель та інженерних споруд.

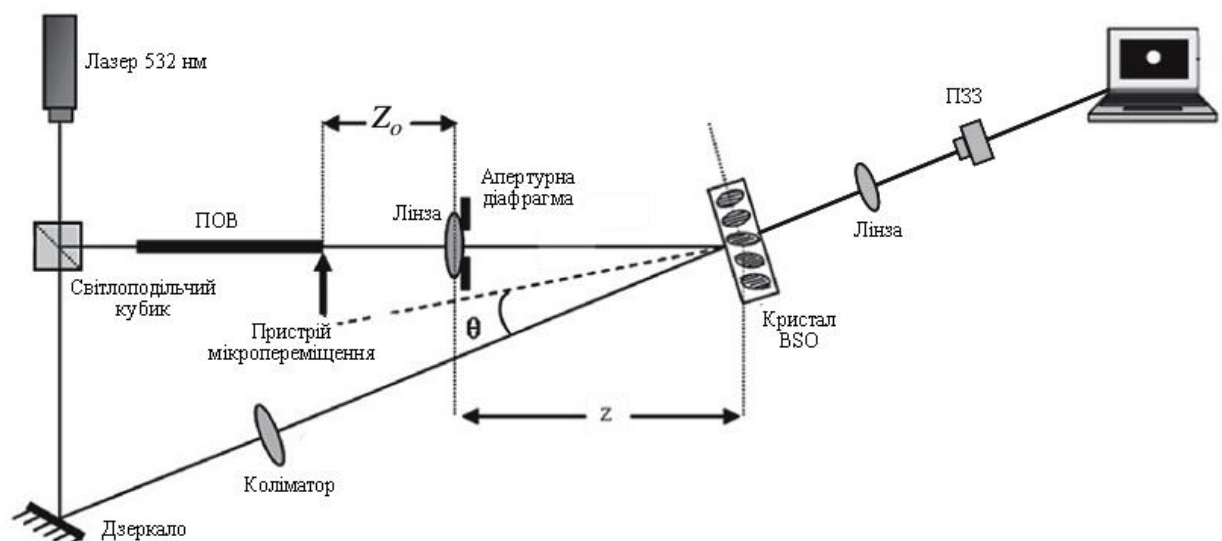


Рис. 1.13. Схема давача деформації на основі ПОВ з голографічним записом спекл-картини на кристалі BSO [41]

В роботі [43] запропоновано метод вимірювання деформаційного зміщення багатомодового ПОВ в мікронному діапазоні шляхом кореляційного порівняння спекл-картин. Для деформації волокна було використано механізм модуляції побудований на періодичних мікрозгинах чутливої ділянки волокна при поперечному переміщенні мікрометричного гвинта. Спекл-структури на виході ПОВ реєструвались за допомогою цифрового пристрою з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), після чого проводилась їх кореляційна обробка для отримання інформації про величину деформаційного зміщення. Для вимірювань було використано полімерні волокна з діаметром серцевини 50 мкм, 240 мкм та 980 мкм, з метою дослідження впливу числа мод у волокні на чутливість та діапазон вимірювань методу. Результати експериментальних досліджень показали, що найкращу чутливість можна отримати для волокна з діаметром серцевини 980 мкм для діапазону переміщення рівному приблизно 100 мкм. Результати отримані для волокна з діаметром серцевини 240 мкм показали найвищу точність, однак діапазон вимірювання переміщення в цьому випадку становив лише 40 мкм. Волокно з діаметром серцевини 50 мкм виявилось найменш придатним для використання у запропонованому методі через велику кількість хибних результатів при вимірюванні деформаційного зміщення.

Для розширення динамічного діапазону давача деформації на основі багатомодового ПОВ, в роботі [44] було запропоновано методику обробки спекл-інтерферограм на виході волокна, яка базується на їхній морфологічній структурі. Розроблений алгоритм використовує морфологічні відмінності спекл-картин при різних значеннях деформації, для отримання так званих «key-specklegrams», які потім використовуються як опорні точки під час вимірювання деформації (рис. 1.13).

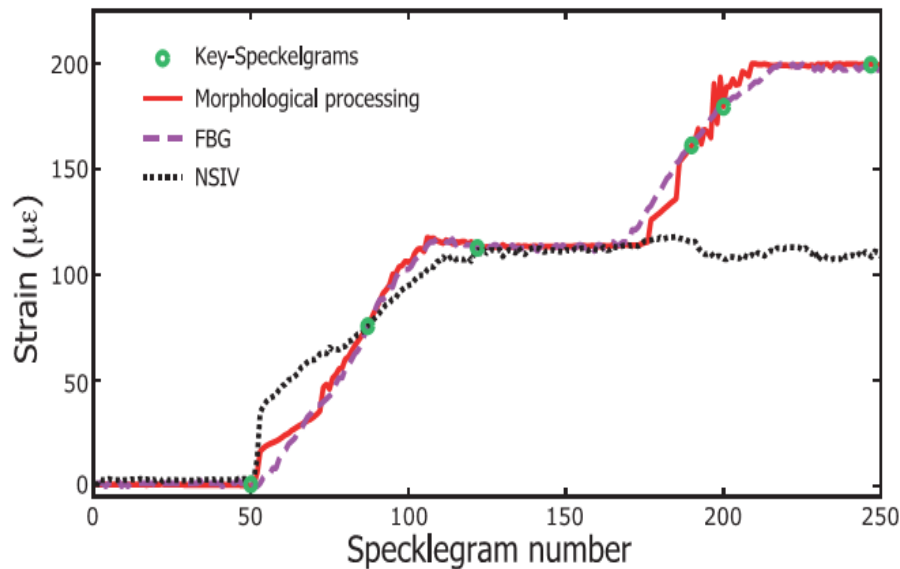


Рис. 1.13. Порівняння значень деформації волокна отриманих з використанням алгоритму морфологічного аналізу спекл-картин (суцільна лінія) та з використанням сенсора на основі волоконної ґратки Брегга (пунктирна лінія). Точкова лінія відповідає зміні інтенсивності спекл-картин при деформації [43].

Зміна інтенсивності спекл-картини обчислюється до найближчої опорної точки і абсолютне значення деформації волокна може бути отримане при визначенні зміни інтенсивності. Розроблений алгоритм був перевірений експериментальним шляхом, і середнє значення абсолютної похибки вимірювання деформації склало 13.2 мікрострейн. Запропонований підхід дозволяє використовувати такі давачі для моніторингу напружено-деформованого стану технічних об'єктів. Простота схеми давача робить його привабливим для багатьох інженерних застосувань, де визначальними факторами є компактність та вартість вимірювальної системи.

Отже, аналіз науково-технічної літератури показує, що волоконно-оптична когерентна інтерферометрія, в даний час, є добре розробленим методом для детектування параметрів фізичних величин. Волоконно-оптичні інтерферометри на основі одномодових оптичних волокон широко використовуються для прецизійних вимірювань в різних вимірювальних пристроях та системах. Використання спекл-структури, утвореної внаслідок інтерференції між направленими модами в багатомодових оптичних волокнах

дозволяє створювати компактні інтерферометричні схеми без використання опорного вимірювального плеча. За чутливістю такі давачі не поступаються схемам на основі традиційних волоконно-оптичних інтерферометрів, однак, потребують в свою чергу спеціальних методів опрацювання та інтерпретації вимірювальних сигналів для отримання інформації вимірювані параметри. За рахунок простоти схеми та компактності давачі та перетворювачі на основі багатомодових полімерних оптичних волокон можуть слугувати ефективними засобом при вимірюванні та діагностиці напружено-деформованого стану технічних об'єктів.

Висновки та постановка задач дослідження

Незважаючи на значні досягнення у розробці волоконно-оптичних сенсорів та перетворювачів на основі ПОВ, зокрема в плані розробки методів реєстрації інформаційного сигналу, залишаються невивченими особливості реалізації вимірювальних систем з використанням цифрової кореляційної обробки спекл-сигналів інтерферометрів на основі багатомодових полімерних волокон. Для таких систем необхідно розробити спеціальні алгоритми для опрацювання та інтерпретації масивів одержуваної інформації. Також потребують обґрунтування топології волоконно-оптичних вимірювальних ліній в залежності від особливостей геометрії і фізико-механічних властивостей досліджуваного об'єкта. Таким чином, в науковому та практичному аспекті залишаються актуальними і не вирішеними завданнями теоретичні та експериментальні дослідження інтерференційних сенсорів та перетворювачів на, власне, багатомодових полімерних волокнах та розроблення на їх основі розподілених волоконно-оптичних вимірювальних систем для тривалого моніторингу та діагностики технічного стану об'єктів.

Таким чином, основною метою даної роботи є розроблення і застосування нових інтерферометричних методів вимірювання параметрів деформації та вібраційних характеристик інженерно-технічних об'єктів на основі явища

інтерференції між модами в багатомодових полімерних оптичних волокнах. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні завдання:

1. Провести порівняльний аналіз існуючих вимірювальних методик та схем волоконно-оптичних інтерферометричних сенсорів і перетворювачів на основі багатомодових волокон.

2. Розробити та експериментально дослідити методи опрацювання сигналів інтерферометрів на основі багатомодових полімерних оптичних волокон та розробити на їх основі методи вимірювання параметрів деформації та частоти механічних коливань технічних об'єктів.

3. Розробити структурні та функціональні схеми інтерферометричних перетворювачів на базі багатомодових полімерних оптичних волокон, які використовують явище інтерференції між модами у волокні.

4. Розробити макети інтерферометричних вимірювальних перетворювачів параметрів деформації та частоти механічних коливань технічних об'єктів.

5. Розробити методики вимірювання параметрів деформації та частоти механічних коливань технічних об'єктів та застосувати їх для вимірювання параметрів напружено-деформованого стану інженерно-технічних об'єктів..

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ІНТЕРФЕРОМЕТРА НА БАГАТОМODOVOMY ПОЛІМЕРНОМУ ВОЛОКНІ

2.1. Основні властивості та особливості формування спекл-структур в багатомодових оптичних волокнах

Дослідженню явища міжмодової інтерференції в багатомодових волокнах присвячена велика кількість наукових праць [33, 42, 45-50]. Як показують результати дослідження, статистичні характеристики спекл-структур випромінювання на виході багатомодових оптичних волокон є подібними до характеристик спекл-структур випромінювання, розсіяного оптично неоднорідними поверхнями.

Багатомодові оптичні волокна здатні пропускати велику кількість мод, які поширюються з різними фазовими швидкостями. З точки зору геометричної оптики, промені, що поширюються у волокні під різними кутами відносно його осі, будуть проходити різні відстані. Таким чином, вони зазнаватимуть різних фазових затримок при проходженні відстані від вхідного до вихідного торців волокна. Більш точний електромагнітний аналіз багатомодового волокна показує, що в ньому існує велика кількість різних мод, кожна з яких має свою власну фазову швидкість. Розподіл інтенсивності випромінювання в будь-якій точці на вихідному торці волокна буде складатись з суми розподілів інтенсивностей кожної окремої моди. Якщо фазові затримки мод змінюються більше ніж на 2π радіан, і якщо джерело випромінювання є достатньо когерентним, то в розподілі інтенсивності на вихідному торці волокна будуть помітні інтерференційні ефекти, за рахунок інтерференційного складання мод. Така інтерференційна картина, яка спостерігається на виході багатомодового оптичного волокна при його освітленні когерентним випромінюванням, має назву спекл-картина і представляє собою практично випадкове чергування світлих та темних областей [51].

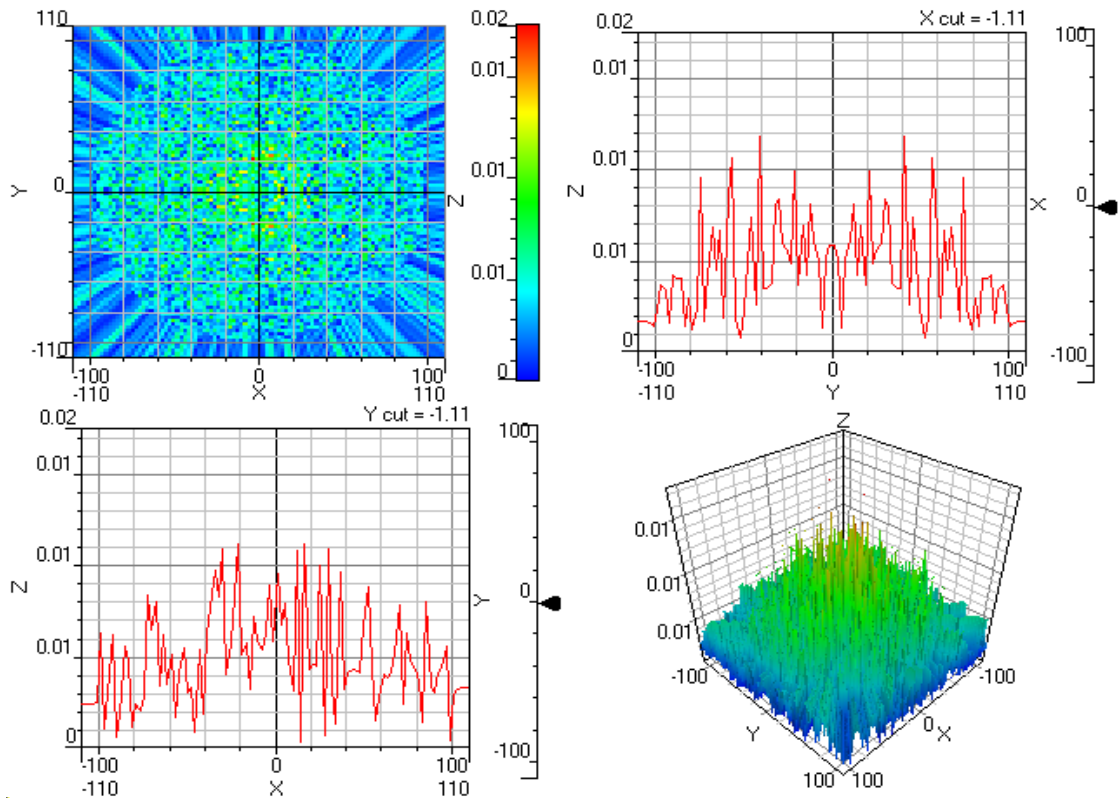


Рис. 2.1. Результат моделювання спекл-картини на виході багатомодового оптичного волокна з використанням програмного пакету Optiwave OptiFiber

Точне математичне моделювання зміни спекл-картини на виході багатомодового оптичного волокна при його зовнішньому збуренні є достатньо складним завданням, оскільки слід враховувати велику кількість параметрів, які будуть визначати таку зміну [52]. Тим не менше, на основі спрощених математичних моделей, можна отримати наближені співвідношення між величиною збурення волокна та зміною спекл-картини на його виході. З точки зору використання багатомодового волокна для детектування параметрів фізичних величин, кінцева мета моделювання зміни спекл-структури полягає в оцінці чутливості волокна до окремих фізичних параметрів, яка буде визначатись характером зміни вихідної спекл-картини при збуренні.

При використанні багатомодових оптичних волокон для метрологічних вимірювань, важливу роль відіграє середній розмір утворених спеклів а також їх кількість. Оскільки, спекл-картина утворюється внаслідок інтерференції між направленими модами в волокні, то можна вважати, що кількість окремих спеклів в площині реєстрації спекл-картини є пропорційною до кількості мод,

що поширюються у волокні. Таким чином, загальна кількість спеклів на виході багатомодового оптичного волокна може бути наближено розрахована як [53]:

$$N_s = \left(\frac{d \pi NA}{\lambda} \right)^2 \quad (2.1)$$

де d – діаметр серцевини волокна, NA – числова апертура, λ – довжина хвилі джерела випромінювання. Для прикладу, якщо розглянути стандартне багатомодове ПОВ з діаметром серцевини 980 мкм, числовою апертурою $NA = 0.5$ при використанні лазерного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0.6328$ мкм, та припустивши що у волокні збуджуються всі моди, число утворених спеклів буде становити приблизно $N_s = 6.2 \cdot 10^6$. Відповідно, кількість окремих спеклів сформованих на виході багатомодового волокна буде в основному визначатись діаметром серцевини волокна та довжиною хвилі джерела випромінювання.

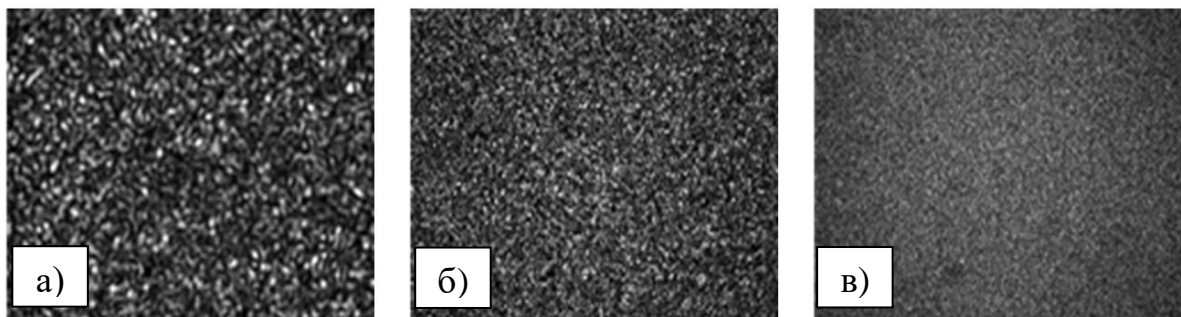


Рис.2.2. Фотографії спекл-картин утворених на виході багатомодових оптичних волокон різного діаметру: а) PCS волокно з діаметром серцевини 240 мкм; б) ПОВ з діаметром серцевини 500 мкм; в) ПОВ з діаметром серцевини 980 мкм.

Середній діаметр окремого спекла сформованого багатомодовим оптичним волокном в площині реєстрації спекл-структури, розташованій на відстані R від торця волокна, можна розрахувати за формулою [54]:

$$S_a = 1.22R \left(\frac{\lambda}{d} \right) \quad (2.2)$$

Цей вираз демонструє зв'язок між розміром спекла, відстанню від вихідного торця волокна до площини спостереження та розміром поперечного перерізу серцевини волокна.

Діаметр світлового поля спекл-картини, утвореної багатомодовим оптичним волокном можна розрахувати як:

$$D_f = 2 NA R \quad (2.3)$$

Описані вище характеристики спекл-структур дозволяють підібрати необхідні параметри оптичних компонентів та конфігурації вимірювальних систем на основі багатомодових волокон залежно від поставленого завдання.

Іншою важливою характеристикою спекл-структур є їх контраст. Так як спекл-структура на виході багатомодового волокна формуються внаслідок інтерференційного накладання полів великої кількості світлових хвиль, то для такого випадку не можна використовувати класичне визначення поняття контрасту, яке є справедливим при інтерференції лише двох світлових хвиль. Таким чином, контраст спекл-картини, утвореної на виході багатомодового волокна, можна оцінити використовуючи її статистичні характеристики. Контраст спекл-картини, утвореної на виході багатомодового оптичного волокна можна визначити за формулою [52]:

$$C_s = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle} = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \quad (2.4)$$

де σ_I – середньоквадратичне відхилення флуктуацій інтенсивності спекл-картини, $\langle I \rangle$ – усереднене значення інтенсивності спекл-картини. Контраст спеклів характеризує глибину просторової модуляції випромінювання у волокні і є аналогом видимості інтерференційних смуг, які спостерігаються при інтерференції двох монохроматичних світлових хвиль.

Велика числова апертура комерційних ПОВ створює значні зсуви фаз між модами, які поширюються у волокні. Для забезпечення умов інтерференції між

модами та відповідно формування спекл-структури на виході волокна, довжина когерентності джерела випромінювання має бути більшою за зсув фаз між інтерферуючими модами. Іншими словами, для того щоб всі моди які поширюються у волокні могли інтерферувати між собою, фазова затримка між будь-якою парою мод повинна бути меншою за довжину когерентності джерела випромінювання, яку можна наближено розрахувати як добуток швидкості поширення світла у вакуумі c та затримки фаз між модами t_d , тобто:

$$L_c \geq ct_d \quad (2.5)$$

Використавши відоме співвідношення для фазової затримки мод [3] , вираз (2.5) можна переписати наступним чином:

$$L_c \geq Ln_1\Delta \text{ або } L_c \geq \frac{L}{2n_1}(NA)^2 \quad (2.6)$$

де L – довжина оптичного волокна, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$ – відносна різниця показників заломлення волокна, NA – числова апертура волокна, n_1 і n_2 – показники заломлення серцевини та оболонки волокна відповідно.

На чутливість багатомодового оптичного волокна до зовнішнього збурення напряму впливає контраст утвореної спекл-картини, яку реєструватиме фотоприймач. Таким чином, вищу чутливість волокна до збурення можна отримати при використанні лазерного випромінювання з більшою довжиною когерентності. Зокрема, таке явище було використане для аналізу деяких властивостей лазерних джерел випромінювання методом вимірювання контрасту спекл-структур, утворених на виході багатомодових оптичних волокон [55, 56]. З іншого боку, на чутливість спекл-картини до зовнішнього збурення також впливає довжини хвилі джерела випромінювання. Зокрема, дві спекл-картини сформовані на виході одного і того ж багатомодового оптичного волокна лазерним випромінюванням з різними довжинами хвиль матимуть різний просторовий розподіл інтенсивності. Така особливість спекл-структур в багатомодових оптичних волокна була успішно

використана для побудови компактного волоконно-оптичного спектрометра, який дає можливість отримати роздільну здатність близько 10 пм [57].

Оскільки вимірювальні системи на основі багатомодових оптичних волокон як правило аналізують зміну інтенсивності кожного окремого спекла, чутливість вимірювання зростатиме по мірі зростання кількості спеклів з яких складається спекл-картина. На підставі попереднього наближення для багатомодового оптичного волокна (2.1), кількість утворених спеклів є обернено пропорційна до довжини хвилі, отже, величина чутливості вимірювальної системи на основі багатомодового волокна буде також обернено пропорційною до довжини хвилі випромінювання [58].

Очевидно, що параметри спекл-структур, утворених на виході багатомодових волокон будуть визначати параметри волоконно-оптичних давачів та вимірювальних перетворювачів побудованих на їх основі, характеристики шумів пристроїв прийому сигналів та експлуатаційні характеристики пристроїв оптичної маніпуляції.

2.2. Алгоритм опрацювання спекл-зображень сформованих інтерферометром на полімерному волокні при вимірюванні параметрів деформації

Для аналізу вихідних сигналів інтерферометрів на багатомодових волокнах може бути використана просторова фільтрація частини вихідного випромінювання для виділення інтерференційних коливань інтенсивності та кореляційні методи обробки спекл-сигналів з використанням цифрових матричних сенсорів. Як правило методи кореляційного аналізу є більш складними у застосуванні, однак вони забезпечують високу точність вимірювання. Методи які використовують діафрагмування вихідного випромінювання добре підходять для задач, де важливою є швидкодія інтерферометра, оскільки на них не накладаються обмеження пов'язані із швидкодією цифрової камери яка реєструє спекл-зображення.

Внаслідок випадкової природи спекл-структур розподіли інтенсивностей $I_1(x,y)$ та $I_2(x,y)$ слід розглядати як випадкові функції, інформація стосовно яких у загальному випадку подається у вигляді середніх значень, зокрема усереднених за ансамблем [59].

Припустимо, що можна зареєструвати просторовий розподіл інтенсивності спекл-картини на виході багатомодового волокна при деякому початковому стані волокна $I_1(x,y)$ (вихідний розподіл) та після його зміни $I_2(x,y)$ (поточний розподіл). Відмінності між вихідним та поточним розподілами інтенсивності спекл-картин будуть свідчити про наявність зовнішнього впливу на волокно. Оцінюючи ступінь подібності функцій $I_1(x,y)$ та $I_2(x,y)$, можна також встановити характер та величини зовнішнього впливу. Як відомо, кореляцію інтенсивностей двох зареєстрованих спекл-зображень можна подати наступним виразом [60, 61]:

$$\mu_{12} = \langle I_1(x,y)I_2(x,y) \rangle \quad (2.7)$$

а зв'язана з нею нормована кореляційну функцію (коефіцієнт кореляції):

$$C_{12} = \frac{\langle I_1(x,y)I_2(x,y) \rangle - \langle I_1(x,y) \rangle \langle I_2(x,y) \rangle}{\sqrt{(\langle I_1(x,y)^2 \rangle - \langle I_1(x,y) \rangle^2)(\langle I_2(x,y)^2 \rangle - \langle I_2(x,y) \rangle^2)}} \quad (2.8)$$

де кутові дужки означають операцію усереднення інтенсивності по просторових координатах x та y . При кількісній оцінці величини кореляції інтенсивностей двох спекл-зображень $I_1(x,y)$ та $I_2(x,y)$ зручно використовувати коефіцієнт кореляції, який є прямою мірою їх подібності. З формули (2.8) можна побачити, що при відсутності будь-яких відмінностей для двох спекл-зображеннях, величина коефіцієнта кореляції C_{12} буде дорівнювати одиниці. Коефіцієнт кореляції буде зменшуватись і наближатись до нуля по мірі збільшення різниці між розподілами інтенсивності поточного та опорного спекл-зображеннями.

В загальному випадку, світлове поле випромінювання багатомодового волокна в площині реєстрації спекл-картини являє собою результат інтерференції всіх мод, що поширюються у волокні. Для багатомодового волокна в якому поширюється M хвилеводних мод, розподіл амплітуди поля міжмодової інтерференції в площині реєстрації можна описати за допомогою виразу [38]:

$$A(x, y) = \sum_{m=0}^M a_m(x, y) \exp[i(\varphi_m(x, y))] \quad (2.9)$$

де a_m та φ_m представляють розподіл амплітуди та фази m -ї моди. При деякому зовнішньому збуренні волокна відбувається зміна фази кожної окремої моди, таким чином, вираз (2.3) можна переписати у вигляді:

$$A(x, y) = \sum_{m=0}^M a_m(x, y) \exp[i(\varphi_m(x, y) + \Delta\varphi_m(x, y))] \quad (2.10)$$

де $\Delta\varphi_m$ це зміна фази для m -ї хвилеводної моди внаслідок збурення волокна. Вираз (2.10) вказує на те, що розподіл інтенсивності спекл-картини змінюється при зміні фази мод, викликаній зовнішнім збуренням волокна.

Світлове поле розподілу інтенсивності спекл-картини при його реєстрації з використанням ПЗЗ сенсора може бути записане як:

$$I(x, y) = |A(x, y)|^2 = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a_m(x, y) a_n(x, y) \exp[i(\varphi_m - \varphi_n)] \quad (2.11)$$

де

$$a_m(x, y) = \left| \int a_m(\varepsilon, \eta) \exp[ik(x\varepsilon + y\eta)/L] d\varepsilon d\eta \right|^2 \quad (2.12)$$

розподіл амплітуди m -ї направленої моди в площині реєстрації спекл-картини; x, y – декартові координати в площині реєстрації спекл-зображення; ε, η – декартові координати в площині вихідного торця волокна; $a_m(\varepsilon, \eta)$ – розподіл амплітуди поля моди в площині вихідного торця волокна; φ_m, φ_n – фази мод в площині реєстрації. Слід зазначити, що в даному випадку припускається, що всі моди мають однакову поляризацію, і когерентність випромінювання при його

поширенні вздовж волокна не порушуються. Останнє твердження є справедливим для багатомодових оптичних волокон при виконанні умови $L < L_c/\Delta n$, де L_c – довжина когерентності джерела випромінювання; $\Delta n = n_1 - n_2$ – різниця показників заломлення серцевини та оболонки волокна [62].

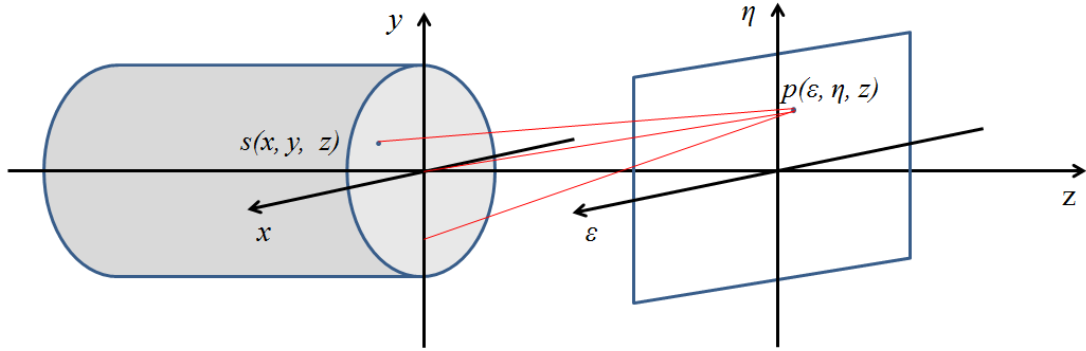


Рис. 2.3. Схематичне представлення інтерференції між модами на виході волокна в ближній зоні випромінювання

Припустимо, що внаслідок деякого зовнішнього збурення фази мод отримали певний приріст $\delta\varphi$, а амплітуди цих мод при цьому не змінились. Тоді в розподілі інтенсивності спекл-картини після зовнішньої дії на волокно в рівнянні (2.5) потрібно замінити параметр φ на $\varphi + \delta\varphi$. Таким чином, можна записати вирази для розподілів інтенсивності спекл-картин в площині реєстрації до $I_1(x, y)$ і після $I_2(x, y)$ зовнішньої дії на волокно:

$$I_1(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a_m(x, y) a_n(x, y) \exp[i(\varphi_m - \varphi_n)] \quad (2.13a)$$

$$I_2(x, y) = \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^M a_k(x, y) a_l(x, y) \exp[i(\varphi_k - \delta\varphi_k - \varphi_l - \delta\varphi_l)] \quad (2.13б)$$

Вирази (2.13a) і (2.13б) дозволяють записати добуток інтенсивності двох спекл-картин до і після зовнішньої дії на волокно:

$$I_1(x, y) I_2(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^M a_m(x, y) a_n(x, y) a_k(x, y) a_l(x, y) \times \exp[i(\varphi_m - \varphi_n + \varphi_k + \delta\varphi_k - \varphi_l - \delta\varphi_l)] \quad (2.14)$$

Як показано в [60], усереднення по просторових координатах поля випромінювання можна замінити на усереднення по ансамблю випадкових реалізацій поля. Тоді внесок в суму (2.8) будуть давати лише ті члени виразу, для яких аргумент уявної частини експоненти буде дорівнювати нулю. Таке можливо у випадку, коли $m=n$ і $k=l$ або $m=l$ і $n=k$. Враховуючи обидва такі варіанти, можна записати, що при збудженні у волокні великої кількості направлених мод, виконується наступна рівність:

$$\langle I_1(x, y) I_2(x, y) \rangle = \left(\sum_{m=0}^M I_m(x, y) \right)^2 \left| \sum_{m=0}^M I_m(x, y) \exp[i(\delta\phi_m)] \right|^2 \quad (2.15)$$

Припустивши, що незначні зміни двох зареєстрованих спекл-зображень не спричиняють зміну середньої інтенсивності [52]:

$$\langle I_1(x, y) \rangle = \langle I_2(x, y) \rangle = \sum_{m=0}^M I_m(x, y) \quad (2.16)$$

можна також показати, що середні значення квадратів інтенсивностей спекл-картин до і після зовнішньої дії на волокно будуть дорівнювати:

$$\langle I_1(x, y)^2 \rangle = \langle I_2(x, y)^2 \rangle = 2 \left(\sum_{m=0}^M I_m(x, y) \right)^2 \quad (2.17)$$

Таким чином, враховуючи співвідношення (2.1) і (2.2) можна одержати:

$$\mu_{12} = \langle I(x, y) \rangle^2 (1 + C_{12}) \quad (2.18)$$

$$C_{12} = \frac{\left| \sum_{m=0}^M I_m(x, y) \exp[i(\delta\phi_m)] \right|^2}{\left(\sum_{m=0}^M I_m(x, y) \right)^2} \quad (2.19)$$

де $\langle I(x, y) \rangle = \langle I_1(x, y) \rangle = \langle I_2(x, y) \rangle$ – середнє значення інтенсивності спекл-картини в точці з координатами x та y [52].

Далі будемо вважати, що всі направлені моди мають приблизно однакову інтенсивність, а їх додаткові зсуви фаз рівномірно розподілені в інтервалі від

деякого мінімального значення $\delta\varphi_{min}$ до деякого максимального значення $\delta\varphi_{max}$. В такому випадку, здійснивши в рівнянні (2.13) стандартний перехід від сумування до інтегрування [60], отримаємо:

$$C_{12} = \left| \frac{1}{\Delta\varphi_{max}} \int_{\delta\varphi_{min}}^{\delta\varphi_{max}} \exp(iz) dz \right|^2 = \sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi_{max}}{2} \right) \quad (2.20)$$

де $\Delta\varphi_{max} = \delta\varphi_{max} - \delta\varphi_{min}$ – максимальне значення додаткової різниці фаз між направленими модами у волокні. Отриманий вираз показує зв'язок між коефіцієнтом кореляції двох спекл-зображень та максимальним значенням додаткової різниці фаз між модами, спричиненої зовнішньою дією на волокно.

Якщо вважати, що всі направлені моди будуть мати однакову інтенсивність та рівномірний розподіл зсуву фаз в деякому діапазоні, тоді, максимальне значення додаткової різниці фаз між модами внаслідок зміни довжини оптичного волокна Δl можна оцінити як [63]:

$$\Delta\varphi_{max} = k\varepsilon n \Delta l \left(\frac{1}{\cos(\theta_m)} - \frac{1}{\cos(\theta_0)} \right) \quad (2.21)$$

де

n – показник заломлення серцевини волокна;

$\varepsilon = 1 - \frac{n^2}{2} (p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12}))$ – коефіцієнт пружно-оптичного ефекту, який

визначається на основі значень коефіцієнтів Покельса p_{11} і p_{12} та відношення Пуассона μ для матеріалу серцевини волокна.

θ_m та θ_0 – кути поширення мод m -го та нульового порядків відповідно. Для багатомодових оптичних волокон кут поширення m -ї хвилеводної моди може бути наближено розрахований через граничний кут θ_c поширення випромінювання у волокні. Таким чином можна записати:

$$\theta_0 \approx 0; \quad \theta_m \approx \arcsin \left(\frac{\sin \theta_c}{n} \right) \quad (2.22)$$

Теоретична залежність зміни максимальної додаткової різниці фаз між модами $\Delta\varphi_{\max}$ від величини поздовжньої деформації волокна розрахована на основі виразу (2.21) для полімерного волокна із ступінчастим профілем показника заломлення довжиною 1м, для якого числова апертура $NA = 0.5$, діаметр серцевини рівний 980 мкм при довжині хвилі $\lambda = 0.6328$ мкм та з урахуванням типових механічних параметрів для матеріалу волокна представлена на рис. 2.4.

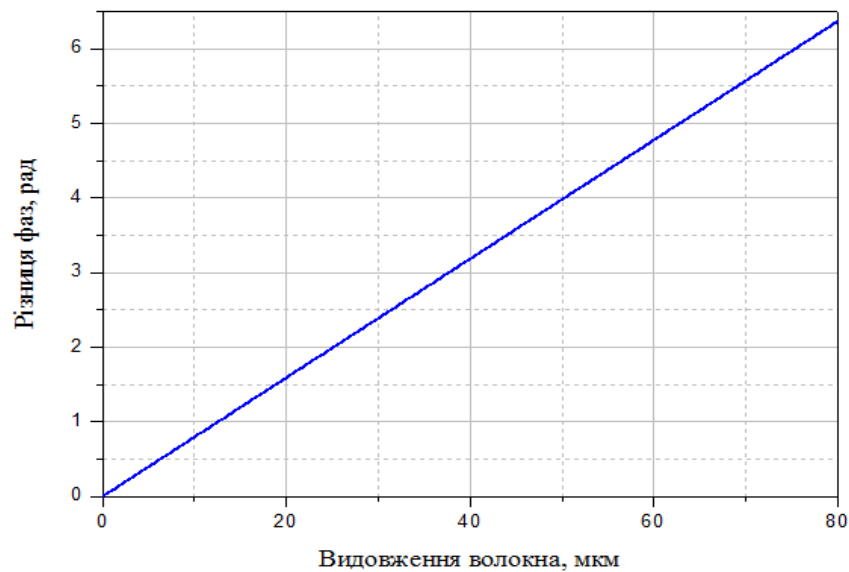


Рис. 2.4. Зміна максимальної додаткової різниці фаз між модами розрахована для багатомодового полімерного волокна при його поздовжній деформації

Таким чином, на основі відомих параметрів волокна, яке використовується в якості чутливого елемента для інтерферометра, можна оцінити фазову чутливість інтерферометра до вимірюваної величини. Для коефіцієнтів Поккельса $p_{11} = 0.3$, $p_{12} = 0.297$, та відношення Пуасона $\mu = 0.34$ та характеристик волокна, описаних вище, фазова чутливість інтерферометра до поздовжньої деформації буде становити:

$$S_{\varphi} = \frac{\Delta\varphi_{\max}}{\Delta l} = 0.08 \text{ (рад/мкм)}$$

Підставивши у рівняння (2.20) значення для максимальної додаткової різниці фаз між модами внаслідок видовження волокна з рівняння (2.21), вираз

для коефіцієнта кореляції між двома спекл-зображеннями можна переписати у такому вигляді:

$$C = \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi \varepsilon n \Delta l}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos(\theta_m)} - 1 \right) \right)}{\left(\frac{\pi \varepsilon n \Delta l}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos(\theta_m)} - 1 \right) \right)^2} \quad (2.23)$$

Вираз (2.23) демонструє прямий взаємозв'язок між видовженням оптичного волокна Δl при його деформації та значенням коефіцієнта кореляції спекл-картин. В межах розглянутої моделі припускається, що коефіцієнт кореляції спекл-картин визначається зміною довжини оптичного волокна і не залежить від інших факторів. Теоретична залежність $C(\Delta l)$ розрахована на основі виразу (2.23) для полімерного волокна із ступінчастим профілем показника заломлення, довжиною 1м, для якого $\Delta n = 0.08$, діаметр серцевини дорівнює 980 мкм при довжині хвилі $\lambda = 0.6328$ мкм, представлена на рис. 2.5. Аналіз результатів моделювання показав, що існує деяке характерне видовження оптичного волокна Δl_0 (в даному випадку $\Delta l_0 \approx 80$ мкм), при досягненні якого коефіцієнт кореляції між опорним та поточним спекл-зображеннями буде рівний нулю, тобто два зображення будуть повністю декорелювати [63]. В такому випадку подальша кореляційна обробка сигналів стає неможливою.

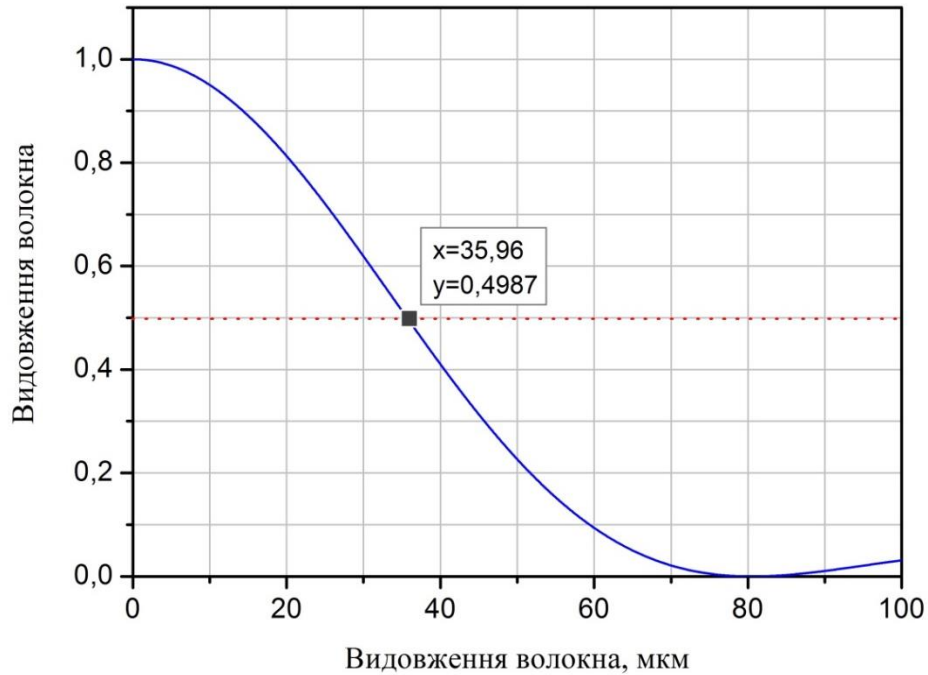


Рис. 2.5. Залежність коефіцієнта кореляції спекл-картин від величини видовження полімерного оптичного волокна розрахована для довжини хвилі $\lambda=0.6328$ мкм

Якщо $\Delta l < \Delta l_0$ значення коефіцієнта кореляції може бути достатньо високим для того, щоб за його вимірним значенням можна було б розрахувати величину зміни довжини оптичного волокна при деформації. Діапазон вимірювань величини видовження оптичного волокна при використанні такого підходу буде в основному визначатись параметрами волокна, яке використовується в якості чутливого елемента волоконного інтерферометра, та довжиною хвилі джерела випромінювання.

Теоретична залежність $C(\Delta l)$ розрахована на основі виразу (2.20) для полімерного волокна із ступінчастим профілем показника заломлення довжиною 1 м, для якого $\Delta n = 0.021$, діаметр серцевини рівний 980 мкм для різних довжин хвиль представлена на рис. 2.6.

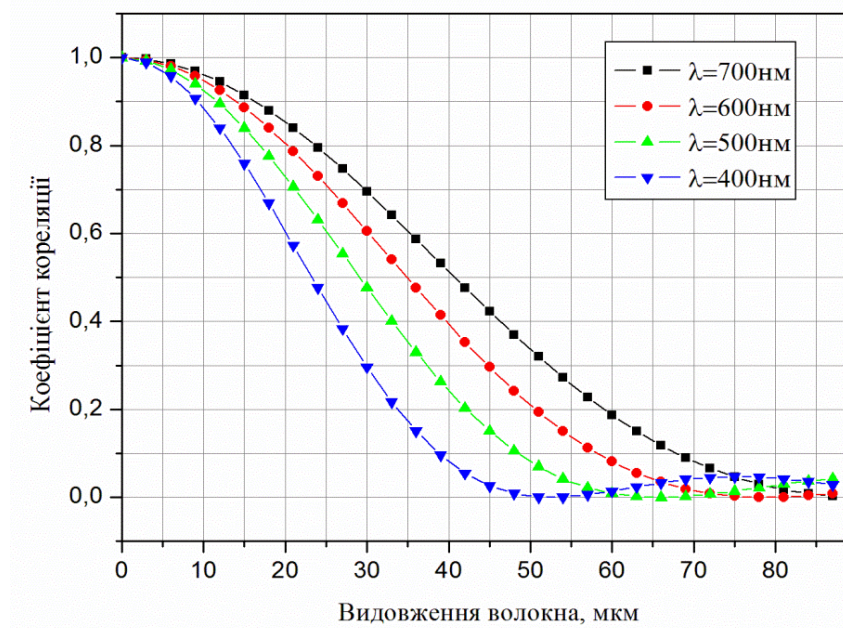


Рис. 2.6. Залежність коефіцієнта кореляції інтенсивності спекл-картин від величини видовження полімерного волокна для різних довжин хвиль

Отримані залежності показують, що при збільшенні довжини хвилі випромінювання, чутливість до видовження волокна стає меншою, що узгоджується із положеннями, описаними в [58] для чутливості сенсорів на багатомодових волокнах. В свою чергу, збільшення довжини хвилі випромінювання призводить до збільшення діапазону вимірювання величини видовження волокна. Зазначені вище фактори слід брати до уваги при проектуванні вимірювальних систем та перетворювачів фізичних величин на основі кореляційного порівняння спекл-зображень в багатомодових полімерних оптичних волокнах.

2.3. Особливості кореляційної обробки спекл-структур на виході багатомодових волокон з використанням ПЗЗ камер

Останні досягнення в розробці цифрових засобів реєстрації і комп'ютерної обробки зображень поступово переміщують електронну спекл-метрологію на передній план в багатьох наукових і інженерних застосуваннях. Переважна більшість методів спекл-метрології ґрунтується на використанні матричних відеосенсорів, зокрема ПЗЗ-матриць та сенсорів на основі

комплементарних структур метал-оксид-напівпровідник (КМОН) [64-67]. При реєстрації спекл-структур такими сенсорами неперервні зображення перетворюються у дискретні сигнали, які вводяться в комп'ютер та записуються у вигляді цифрових зображень. Безпосереднє введення даних і їх опрацювання обчислювальними засобами при наявності відповідного програмного забезпечення дозволяють створити ефективні методи аналізу спекл-інтерферограм.

Як вже зазначалось, реєстрація спекл-інтерферограм оптичними засобами потребує врахування геометричних розмірів утвореної спекл-структури. Якщо вважати, що середній розмір спеклів, утворених на виході багатомодового волокна при пропусканні через нього монохроматичного випромінювання буде приблизно дорівнювати діаметру дифракційної картини в дальній зоні випромінювання [68], то його можна наближено оцінити використовуючи вираз (2.2). Такий підхід можна застосувати при визначенні необхідних умов цифрової реєстрації спекл-структур утворених на виході багатомодового оптичного волокна.

При виборі оптимальних умов освітлення матриці ПЗЗ камери випромінюванням з оптичного волокна необхідно щоб одночасно виконувались наступні умови:

- середній діаметр спеклів S_a в площині реєстрації спекл-структури був набагато більший ніж поперечні розміри піксела (δ_x, δ_y) , тобто

$$S_a > \max|\delta_x, \delta_y|$$

- середній діаметр спеклів в площині реєстрації спекл-структури повинен бути набагато меншим за розміри світлочувливої площадки матричного ПЗЗ сенсора відеокамери (Δ_x, Δ_y) , тобто

$$S_a < \max|\Delta_x, \Delta_y|$$

Перша вимога вводиться для того, щоб в зареєстрованому зображенні можна було чітко розділити окремі спекли. Друга служить для того, щоб число зареєстрованих спеклів було достатньо великим, для виконання статистичної

обробки даних при кореляційному порівнянні спекл-зображень. Таким чином, у відповідності до виразу для середнього розміру спеклів, відстань R між об'єктом, який формує спекл-картину, та ПЗЗ матрицею відеокамери повинна бути вибрана виходячи з умови:

$$\frac{D}{1.22} \delta_{x,y} < R < \frac{D}{1.22} \Delta_{x,y}$$

Можна наближено оцінити, що при використанні лазера з довжиною хвилі $\lambda=655$ мкм та волокна з діаметром серцевини $D = 980$ мкм, при використанні ПЗЗ камери Sony ExViewHAD CCD з розміром пікселя 7.4 мкм та розміром чутливої площадки матричного сенсора 4.8×3.6 мм для ефективної реєстрації спекл-картини, відстань між вихідним торцем оптичного волокна та площиною реєстрації спекл-структури повинна знаходитись в межах від 10 до 45 мм. Середній розмір спекла в зареєстрованому зображенні для такого випадку може змінюватись в діапазоні від 8 до 35 мкм відповідно.

Для випадку, коли оптична система реєстрації зображення обмежена круглою вихідною зіницею об'єктива, який формує спекл-зображення на відстані z від задньої головної площини, то середній розмір спекла визначають як діаметр центральної пелюстки Фур'є образу від цієї зіниці [69], тобто:

$$S_a = 1.22 \frac{\lambda z}{D_0}$$

Отже, середній розмір спекла буде лінійно залежати від коефіцієнта z / D_0 для певної довжини хвилі, тобто від діафрагмового числа об'єктива $f_{\#} = f / D_0$, якщо $z = f$, де f – фокусна відстань об'єктива, D_0 – діаметр діафрагми об'єктива відеокамери.

Аналогічно, для випадку використання об'єктива діапазон допустимих значень фокусної відстані об'єктива для наведених вище параметрів матричного відеосенсора буде становити 337 мм $\ll f_{об.} \ll 786$ мм.

Очевидно, що збільшення фокусної відстані об'єктива приводить до збільшення середнього розміру спеклів. Таким чином, збільшуючи діафрагмове числа об'єктива який фокусує зображення на ПЗЗ матрицю відеокамери, можна

корегувати середній розмір утворених спеклів. Параметри оптичної системи фокусування зображення та характеристики цифрового матричного сенсора будуть визначати геометричні розміри схеми волоконного інтерферометра. Варто також зазначити, що обмеженість динамічного діапазону сенсора цифрової камери може потребувати використання світлових фільтрів для забезпечення допустимих для матричного приймача рівнів інтенсивності світлового потоку.

2.4. Методика вимірювання частоти механічних коливань та вібрації з використанням інтерферометра на полімерному волокні

Точна модель зміни спекл-структури на виході багатомодового волокна внаслідок його збурення є доволі складною для впровадження, оскільки слід враховувати велику кількість параметрів, що визначатимуть цю зміну. Однак, для отримання інформації щодо параметрів зовнішнього збурення, наближене відношення між сигналом збурення і відповідною зміною інтенсивності спекл-картини може бути встановлено шляхом спрощення кінцевої моделі. Дослідження та аналіз зміни спекл-структур на виході багатомодових волокон можуть бути корисними при створенні на їх основі систем детектування зовнішніх збурень. Зокрема, моделювання вихідного сигналу давача на основі багатомодового волокна є важливим для оцінки відгуку волокна до сигналу збурення.

При зовнішньому збуренні багатомодового оптичного волокна внаслідок вібрації, окремі спекли стають яскравішими, інші більш темними, а деякі не змінюються взагалі. Однак, при цьому сумарна інтенсивність спекл-картини, що реєструється фотоприймачем, в цілому практично не змінюється:

$$I_T = \sum_{i=1}^N I_i = \text{const} \quad (2.24)$$

де I_i інтенсивність окремого спекла, яка реєструється з допомогою фотоприймача, N загальна кількість спеклів сформованих волокном.

Просторовий розподіл інтенсивності спекл-структури сформованої багатомодовим оптичним волокном вздовж осі z в будь-якій точці з координатами (r, θ) можна виразити через співвідношення [70]:

$$I(r, \theta) = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \exp[-i(\Delta\beta_{ml})z - (\Delta\varphi_{ml})] \quad (2.25)$$

де M це кількість мод, що поширюється у волокні, m та l індекси для кожної хвилеводної моди, A_m та A_l це відповідні значення амплітуди для кожної моди, параметр $Y = n_1 \sqrt{\varepsilon_0 / \mu_0}$ представляє характеристичну провідність серцевини волокна, $\Delta\beta_{ml}$ представляє різницю постійних поширення для мод m та l , $\Delta\varphi_{ml}$ різниця фаз між модами m та l , J_{nm} є функцією Бесселя, порядок якої визначається фазовим параметром моди у серцевині волокна $U_m = a \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta_m^2}$, де a – радіус серцевини волокна, k – хвильове число [71].

Експоненціальна функція в рівнянні (2.25) для будь якої пари індексів m , l буде комплексно спряженою до пари l , m . В такому випадку вона може бути записана через функцію косинуса у наступному вигляді:

$$I(r, \theta) = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M \left[\begin{aligned} & A_m^2 J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) \\ & + 2 \sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \end{aligned} \right] \quad (2.26)$$

При зовнішніх збуреннях багатомодового волокна відбувається модуляція розподілу інтенсивності випромінювання в спекл-картині за рахунок ефекту взаємодії між хвилеводними модами та їх фазової модуляції. Для аналітичного опису даного процесу можна припустити, що зміна просторового розподілу інтенсивності спекл-картини здійснюється виключно за рахунок збурення ділянки волокна довжиною L . Крім того, можна вважати, що зміна фази випромінювання у волокні має більший вплив на зміну інтенсивності спекл-картини у порівнянні з зміною амплітуди випромінювання [72]. Таким чином, можна розглядати лише зміну фази випромінювання спричинену збуренням волокна, величина якої для мод з індексами m та l буде визначатися різницею

сталих поширення мод $\Delta\beta_{ml}$ при деякому зовнішньому збуренні $F(t)$. Відповідна зміна просторового розподілу інтенсивності спекл-картини може бути записана як:

$$I(r, \theta) = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M \left[A_m^2 J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) + 2 \sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml} + \gamma_{ml} F(t)) \right] \quad (2.27)$$

де γ_{ml} – константа пропорційності.

Використовуючи тригонометричні тотожності рівняння (2.27) може бути переписане у наступному вигляді:

$$I(r, \theta) = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M A_m^2 J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) + Y \sum_{m=0}^M \left(\sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \times \left[\cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \cos(\gamma_{ml} F(t)) - \sin(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \sin(\gamma_{ml} F(t)) \right] \right) \quad (2.28)$$

Припустивши, що величина збурення $\gamma_{ml} F(t)$ є достатньо малою, рівняння (2.28) можна наближено представити у такому вигляді:

$$I(r, \theta, z) = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M A_m^2 J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) + Y \sum_{m=0}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \times \left[\cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) - \gamma_{ml} F(t) \sin(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \right] \quad (2.29)$$

Вираз для знаходження інтенсивності будь-якого окремого спеклу може бути отриманий шляхом інтегрування функції просторової інтенсивності по розміру i -го спеклу:

$$I_i = \int_{a_i} I \cdot da_i$$

$$\begin{aligned}
I_i &= \frac{1}{2} \int_{a_i} da_i Y \sum_{m=1}^M A_m^2 J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) \\
&+ \int_{a_i} da_i Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \\
&\times \left[\cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) - \sin(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \gamma_{ml} F(t) \right]
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Параметр $F(t)$ може бути винесений з під знаку інтегрування для отримання виразу для інтенсивності окремого i -го спекла:

$$\begin{aligned}
I_i &= \frac{1}{2} \int_{a_i} da_i Y \sum_{m=1}^M A_m^2 J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) \\
&+ \int_{a_i} da_i Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \left[\cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \right] \\
&- F(t) \int_{a_i} da_i Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \gamma_{ml} \left[\sin(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \right]
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Інтегрування по i -му спеклу може бути внесене під знак суми:

$$\begin{aligned}
I_i &= \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M A_m^2 \int_{a_i} da_i J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) \\
&+ Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l \left[\cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \right] \times \int_{a_i} da_i J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \\
&- F(t) Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l \gamma_{ml} \left[\sin(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\varphi_{ml}) \right] \times \int_{a_i} da_i J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta)
\end{aligned} \tag{2.32}$$

$$I_i = A_i \left[1 + B_i \left[\cos(\delta_i) - F(t) \gamma_i \sin(\delta_i) \right] \right] \tag{2.33}$$

В рівнянні (2.33) A_i представляє перший доданок в рівнянні (2.32), який є результатом модової взаємодії. Наступні два члени рівняння представляють взаємодію між модами. Можна побачити, що аргумент тригонометричних функцій в рівнянні (2.32) є однаковим для всіх індексів m та l , тому другий член буде в протифазі по відношенню до третього члена, що відповідає значенням $\cos(\delta_i)$ та $\sin(\delta_i)$ у рівнянні (2.33). Параметр B_i представляє стаціонарну

міжмодову взаємодію виражену у рівнянні (2.32). При збуренні системи, частина рівняння, що відповідає за взаємодію між модами, буде змінюватись при зміні значення φ_i . Параметри A_i , B_i , φ_i та δ_i є постійними для будь-якого значення i . Як можна побачити, такий результат є ідентичний до того, який можна було б очікувати на виході окремого інтерферометра, якщо розглядати відносно малі амплітуди збурення. В такому випадку, спекл-структуру на виході багатомодового волокна можна розглядати як масив окремих інтерферометрів, які одночасно піддаються одному і тому ж збуренню. Незважаючи на те, що ці інтерферометри явно пов'язані, подальший аналіз та моделювання допускають, що для достатньо малих областей зразка та достатньо великої кількості вибірки окремі спекли будуть випадково залежати від фази, амплітуди та глибини модуляції у відповідності до сигналу збурення. Тобто, можна вважати, що параметри A_i , B_i , φ_i та δ_i є набором випадкових чисел з деякими встановленими границями. Рівень придатності таких припущень може бути оцінений через порівняння результатів теоретичного моделювання з отриманими експериментальними даними.

Таким чином, на основі рівняння (2.33) сумарна інтенсивність випромінювання може бути отримана як сума всіх значень I_i :

$$I_T = \sum_{i=1}^N A_i + \sum_{i=1}^N A_i B_i \cos(\delta_i) - \sum_{i=1}^N A_i B_i \varphi_i F(t) \sin(\delta_i) \quad (2.34)$$

При просторовій фільтрації вихідного випромінювання на фотоприймач потраплятиме лише частина спекл-картини якій відповідатиме деяка кількість спеклів рівна n . При умові що $n \ll N$, та беручи до уваги лише ті компоненти рівняння (2.34) які є залежними від часу, зміну інтенсивності спекл-структури на виході багатомодового волокна відповідно до сигналу збурення $F(t)$ можна записати як:

$$I_T = \sum_{i=1}^n -A_i B_i \varphi_i F(t) \sin(\delta_i) \quad (2.35)$$

або у більш простому вигляді

$$I_T = \sum_{i=1}^n C_i F(t) \sin(\delta_i) \quad (2.36)$$

де C_i представляє сумарну амплітуду всіх спеклів, які реєструються фотоприймачем. Оскільки компонент $F(t)$ є не залежний від суми, то він може бути винесений за її межі:

$$I_T = \left[\sum_{i=1}^n C_i \sin(\delta_i) \right] F(t) \quad (2.37)$$

а у випадку синусоїдального сигналу збурення $F(t) = \sin(\omega t)$ можна записати:

$$I_T = \left[\sum_{i=1}^n C_i \sin(\delta_i) \right] \sin(\omega t) \quad (2.38)$$

Вираз (2.38) описує зміну інтенсивності спекл-структури на виході багатомодового волокна внаслідок гармонічного зовнішнього збурення при діафрагмуванні частини вихідного випромінювання. В цьому випадку, сигнал, який знімається фотоприймачем, повинен містити ту саму частоту, що і сигнал збурення, а також бути в фазі відносно сигналу збурення чи у протифазі на π .

Для того, щоб визначити характеристики деякої кількості N окремих інтерферометрів з пов'язаними випадковим чином коефіцієнтами A_i , B_i , φ_i , та δ_i , було розроблено комп'ютерну програму на мові програмування Matlab, яка дозволяє моделювати вихідний сигнал багатомодового оптичного волокна при просторовій фільтрації частини вихідного випромінювання, що реєструється фотоприймачем. Генератор випадкових чисел, що використовує функцію `rand` для встановлення початку послідовності випадкових чисел, в поєднанні з функцією `rand`, яка повертає псевдовипадкове число, був використаний для отримання N -ї кількості наборів параметрів A_i , B_i , φ_i , та δ_i , що відповідають N -й кількості інтерферометрів, які пов'язані між собою випадковим чином. Генератор випадкових чисел забезпечує однаковий результат кожного разу, коли програма запускається на виконання, так що будь-який набір $N > n$

параметрів інтерферометрів завжди включає в себе набір n параметрів інтерферометрів, що генеруються для меншої кількості спеклів.

Результати комп'ютерного моделювання, які дають можливість спрогнозувати вихідний сигнал чутливого елемента на основі багатомодового волокна зображені на рис. 2.7. Отриманий вихідний сигнал представлений на тій же частоті, що і опорний сигнал, який представляє збурення волокна гармонічним сигналом. У випадку реєстрації фотоприймачем всієї спекл-картини, модульований вихідний сигнал залишається практично незмінним. Такі результати добре узгоджуються з теоретичним аналізом, який був проведений вище.

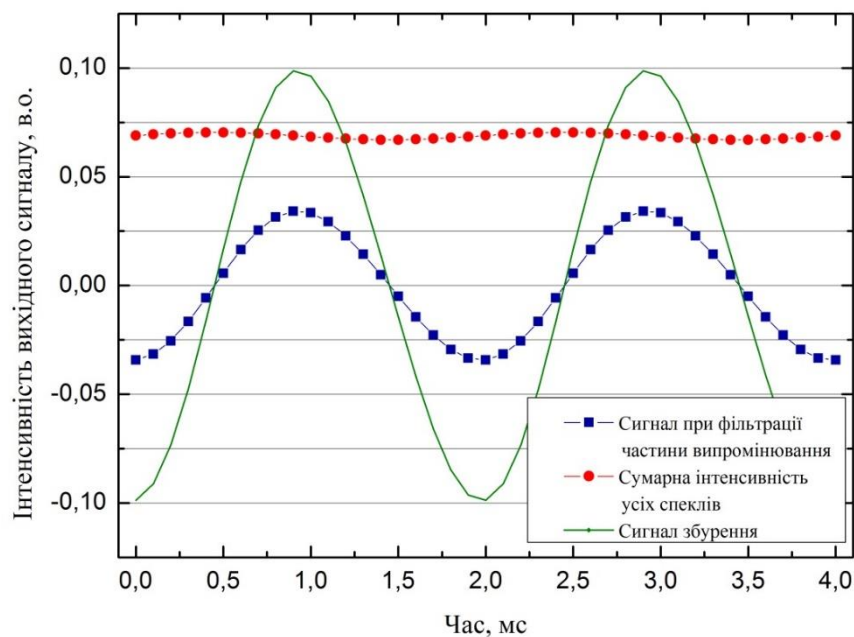


Рис. 2.7. Результати моделювання сигналу на виході багатомодового волокна при просторовій фільтрації частини випромінювання яке потрапляє на фотоприймач

Для того, щоб проілюструвати відгук відгук перетворювача на полімерному волокні до сигналу збурення при різній кількості спеклів, отриманих фотоприймачем, вихідний сигнал був отриманий для $N = 5, 50, 500$ і 5000 числа спеклів відповідно. На рис. 2.8, представлена нормована

інтенсивність для суми різної кількості спеклів на виході багатомодового волокна, при його збуренні гармонічним сигналом. Іntenсивність нормувалась відносно середнього значення суми інтенсивності всіх спеклів.

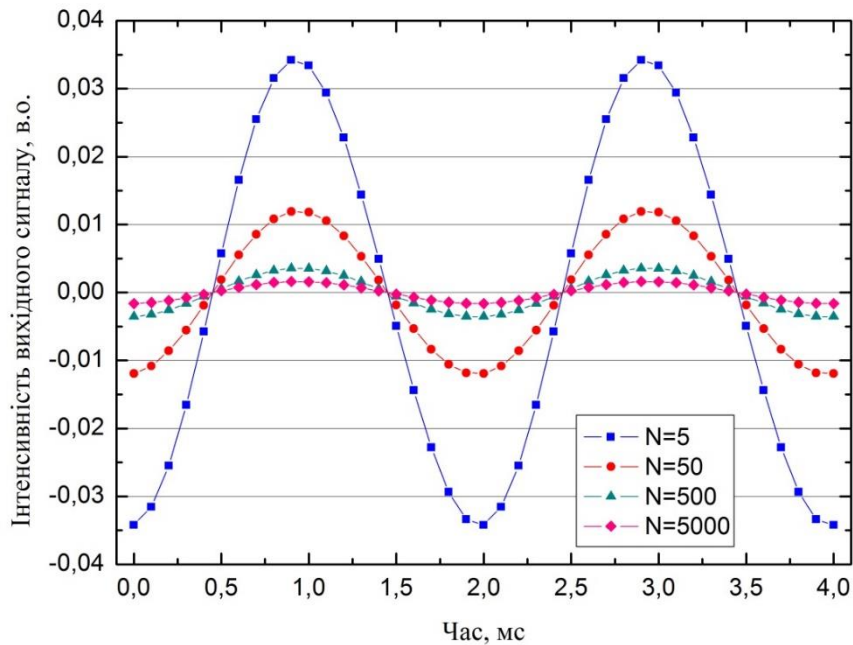


Рис. 2.8. Результат моделювання вихідного сигналу багатомодового волокна у випадку різної кількості виділених спеклів, що потрапляють на фотоприймач при просторовій фільтрації випромінювання волокна.

Як видно з рис. 2.8, збільшення кількості спеклів, які реєструються фотоприймачем призводить до значного зменшення інтенсивності вихідного сигналу. Таким чином, модуляція сумарної інтенсивності спеклів зменшується зі збільшенням числа спеклів, так що при достатньо великій кількості спеклів модуляція стає незначною. Таким чином, ефективне детектування сигналу збурення може бути реалізоване за рахунок виділення відносно невеликої кількості спеклів від усього світлового поля, яке потрапляє на фотоприймач. В цьому випадку сигнал на виході фотоприймача буде змінюватись пропорційно до сигналу збурення, що дозволяє проводити вимірювання параметрів сигналу збурення, зокрема його амплітудних та частотних характеристик. Очевидно, що просторове обмеження вихідного випромінювання

інтерферометра на багатомодовому оптичному волокні є необхідним для ефективного перетворення фазової модуляції світлових хвиль в модуляцію інтенсивності випромінювання яку реєструє фотоприймач.

Висновки до розділу 2

1. Детально описано та узагальнено основні фізичні властивості спекл-структур, які формуються на виході багатомодових оптичних волокон внаслідок міжмодової інтерференції, з точки зору їх метрологічного застосування, та встановлено основні принципи та оптимальні умови реєстрації утворених спекл-структур при використанні сучасних цифрових відео сенсорів та фотоприймачів.

2. Встановлено прямий аналітичний зв'язок між значенням зміни коефіцієнта кореляції інтенсивностей послідовно отриманих спекл-зображень та величиною повздовжньої деформації багатомодового полімерного волокна. Отримані результати дають змогу оцінити характеристики (динамічний діапазон, чутливість) волоконно-оптичного перетворювача деформації в залежності від параметрів ПОВ.

3. Запропоновано методику для вимірювання зміни деформаційного стану оптичного волокна, яка ґрунтується на обчисленні коефіцієнта кореляції між матрицями інтенсивностей поточного та опорного спекл-зображень, отриманих на виході багатомодового волокна. Представлена методика може бути використана для оперативного аналізу деформацій та переміщень різних об'єктів, у тому числі для тривалого контролю динаміки цих процесів у часі.

4. Теоретично показано можливість підвищення ефективності перетворення фазової модуляції світлових хвиль в модуляцію інтенсивності випромінювання при використанні фотодіодного приймача для однозначної реєстрації інформативного сигналу інтерферометра на багатомодовому волокні.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ІНФОРМАТИВНОГО СИГНАЛУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

3.1. Вимірювання параметрів деформації полімерного волокна з використанням методу кореляційного аналізу спекл-зображень

Як було згадано в Розділі 1, за останні десять років волоконно-оптичні інтерферометричні давачі та перетворювачі деформації стрімко переходить зі стану лабораторних прототипів до практичних вимірювальних пристроїв. Цей розвиток в першу чергу обумовлений такими перевагами волоконно-оптичних перетворювачів як висока чутливість, стійкість до електромагнітних завад та можливість створення протяжних розподілених вимірювальних системи. Досить привабливою з точки зору практичного використання та можливості мультиплексування каналів є схеми вимірювальних перетворювачів побудовані на одному оптичному волокні, яке працює в багатомодовому режимі, при використанні когерентного джерела оптичного випромінювання.

В даному розділі представлена реалізація схеми інтерферометричного перетворювача на базі багатомодового полімерного оптичного волокна для вимірювання параметрів механічних величин, яка працює на явищі інтерференції між модами, що поширюються в волокні з різними фазовими швидкостями. Для вимірювання параметрів зовнішньої механічної дії в пристроях такого типу використовують інтерференцію між модами одного і того ж волоконного хвилеводу. Випромінювання на виході інтерферометра представляє собою складний оптичний сигнал, сформований в результаті інтерференції великої кількості направлених мод хвилеводу, кожна з яких має свій просторовий розподіл інтенсивності і свою фазову затримку. Таким чином, при поширенні когерентного випромінювання по багатомодовому оптичному волокні, як в поперечному січенні волокна так і в дальньому полі формується

характерна спекл-картина (рис. 3.1). Для спостереження контрастної інтерференційної спекл-картини на виході багатомодового волокна необхідно щоб оптична різниця ходу між модами волоконного хвилеводу не перевищувала довжину когерентності джерела випромінювання, яке використовується для збудження мод.

Зовнішня механічна дія на волокно спричиняє появу додаткових фазових зсувів між модами, що призводить до зміни просторового розподілу інтенсивності спекл-структури. Таким чином, після виділення результату зміни розподілу інтенсивності випромінювання можна охарактеризувати величину зовнішньої дії на волокно.

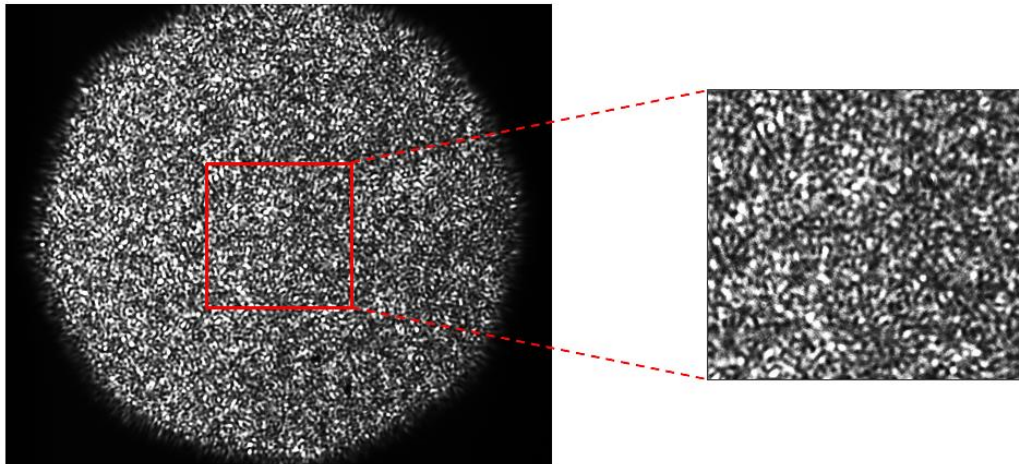


Рис. 3.1. Спекл-картина утворена на виході багатомодового полімерного оптичного волокна завдовжки 1 м з діаметром серцевини 980 мкм випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda = 655$ нм

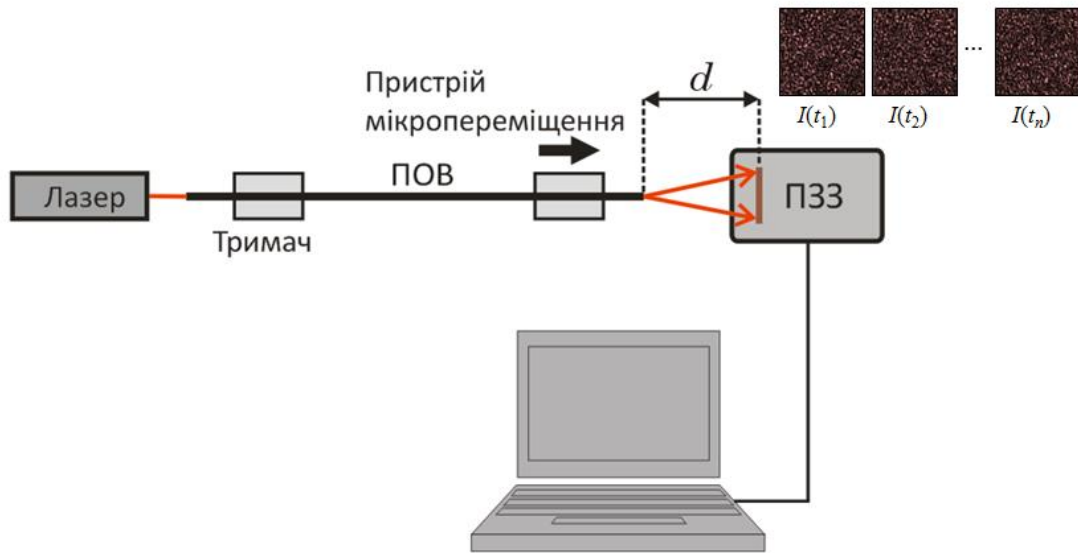
Перевагою застосування такої схеми інтерферометричного перетворювача є можливість досягнення чутливості порівняної з чутливістю традиційних схем волоконно-оптичних інтерферометрів, однак без використання опорного каналу (рис. 3.2). Це забезпечує спрощення схеми вимірювального перетворювача та вищу у порівнянні з традиційними схемами інтерферометричних вимірювальних перетворювачів стійкість до неконтрольованих зовнішніх впливів. Окрім того, за рахунок великої числової

апертури багатомодових оптичних волокон такі інтерферометри здатні направляти випромінювання великої потужності. Тим не менше, складна просторова структура оптичних сигналів інтерферометра на багатомодовому волокні потребує розробки ефективних методів для їх опрацювання та інтерпретації результатів вимірювань.



Рис. 3.2. Структурна схема інтерферометра на основі багатомодового оптичного волокна

При проектуванні схеми інтерферометра на основі методу прямого кореляційного порівняння спекл-структур було зосереджено увагу на використанні полімерних оптичних волокон, оскільки вони володіють рядом переваг у порівнянні з кварцовими волокнами при їх застосуванні в якості чутливих елементів для волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів, найвагомішими з яких є менша вартість, механічна міцність та висока еластичність при деформації та згинах волокна. В якості параметру, що характеризує зміну спекл-структури випромінювання на виході волокна, було обрано коефіцієнт кореляції двох послідовних сигналів, представлених у вигляді цифрових зображень однакового розміру. Для експериментального вимірювання зміни коефіцієнта кореляції між спекл-структурами на виході багатомодового волокна при його поздовжній деформації було розроблено схему волоконно-оптичного інтерферометра на основі ПОВ, схематичне зображення та зовнішній вигляд якого показано на рис. 3.3 (а).



а)



б)

Рис. 3.3. Схематичне представлення (а) та фотографія (б) експериментальної схеми інтерферометра на багатомодовому волокні для вимірювання та контролю параметрів деформації

Випромінювання від лазера напряму вводиться у вхідний торець стандартного ПОВ довжиною 1 м з діаметром серцевини 980 мкм та числовою апертурою ріною $NA=0.5$. Один кінець волокна закріплювався на столику з мікрометричним гвинтом, і деформація чутливої ділянки інтерферометра здійснювалась за рахунок переміщення гвинта вздовж осі волокна.

Спекл-картина випромінювання на виході ПОВ реєструвалася за допомогою цифрової ПЗЗ камери, зображення з якої передавалось на ПК. Після цього інтенсивність кожного пікселя перетворюється в значення від 0 до 255, що відповідають максимальній та мінімальній інтенсивності на зображенні. Таким чином можна отримати набір послідовних кадрів, які представляють собою матрицю зміни інтенсивності спекл-структури в часі. Доступна матриця інтенсивності спекл-зображень показана на рис. 3.4.

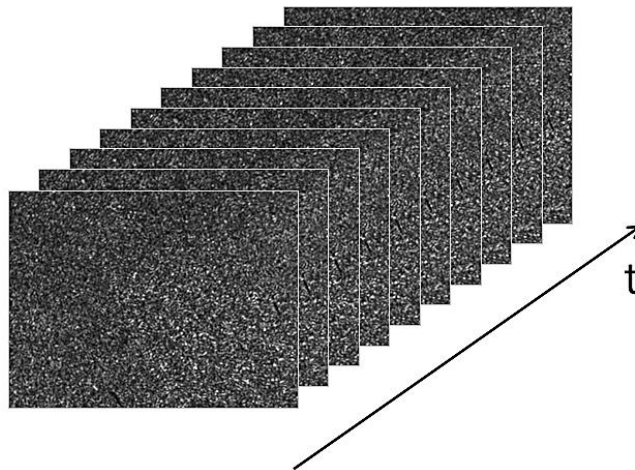


Рис. 3.4. Послідовність отриманих кадрів, що відповідають зміні інтенсивності спекл-структури внаслідок деформації волокна

Спочатку ПЗЗ камера реєструє опорне зображення спекл-картини випромінювання, яке відповідає початковому стану волоконного хвилеводу. Деформація волокна внаслідок зовнішньої механічної дії призводить до зміни просторового положення спеклів на зображенні яке реєструється камерою. За допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення здійснюється подальша обробка зображень і розрахунок значення коефіцієнта кореляції інтенсивності між спекл-картинами зареєстрованими до і після деформації волокна відповідно.

Слід зазначити, що при виборі умов освітлення ПЗЗ сенсора камери випромінюванням від волокна необхідно щоб одночасно виконувались умови описані в розділі 2, зокрема:

- середній діаметр спеклів в площині реєстрації спекл-картини повинен бути більшим ніж поперечні розміри пікселя матриці ПЗЗ;
- середній діаметр спеклів в площині реєстрації повинен бути меншим за розміри світлочутливої площадки матричного сенсора.

На рис. 3.5. показано залежність зміни коефіцієнта кореляції спекл-зображень від величини деформації волокна, отриману при реєстрації ПЗЗ камерою всієї області утвореної спекл-картини, та як це зображено на рис. 3.2. Отримана в такому випадку залежність не зовсім співпадає з розрахованою теоретичною кривою зміни коефіцієнта кореляції між спекл-структурами при деформації волокна, яка представлена в розділі 2. Це можна пояснити тим, що в даному випадку на матрицю цифрової камери реєструються зовнішні по відношенню до спекл-картини ділянки, зміна інтенсивності яких може не залежати від зміни довжини волокна при його деформації. Як наслідок, коефіцієнт кореляції зменшується до деякого значення, після якого він практично перестає змінюватись при зміні деформації волокна. Таким чином, для ефективного вимірювання деформації доцільніше реєструвати частину спекл-зображення без його зовнішніх границь, що можуть утворюватись при використанні фокусуєчої оптики. Також, для оптимальної реєстрації інформативного сигналу спекл-структури випромінювання необхідно максимально використовувати динамічний діапазон сенсора цифрової камери за інтенсивністю сигналу в усіх точках спекл-структури що реєструється.

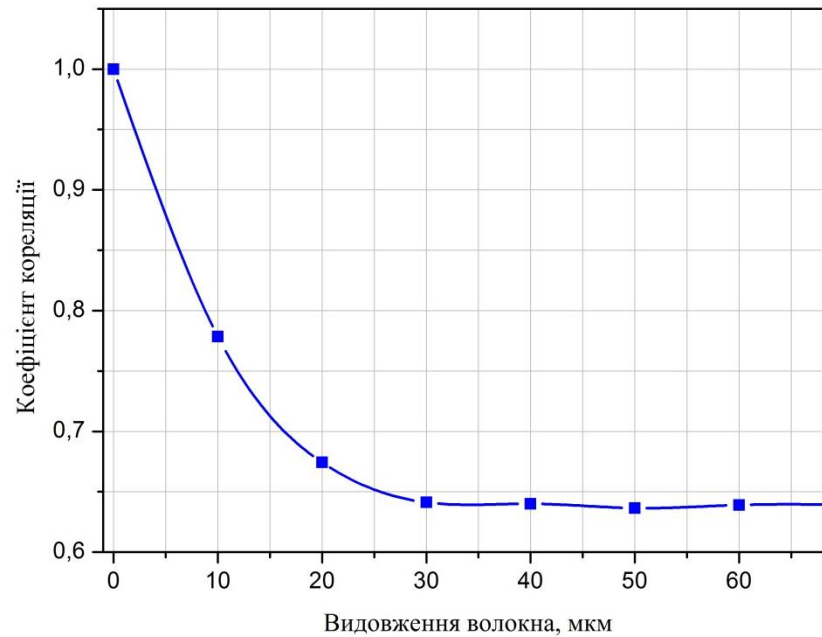


Рис. 3.5. Залежність коефіцієнта кореляції від видовження волокна при реєстрації цифровою камерою всієї області спекл-зображення.

З врахуванням оптимальних умов реєстрації спекл структур цифровими камерами та забезпечення необхідних параметрів схеми вимірювального перетворювача, було досліджено зміну коефіцієнта кореляції спекл структур при поздовжній деформації чутливого елемента волоконно-оптичного інтерферометра. Залежності зміни коефіцієнта кореляції від видовження волокна отримані для різних відстаней між вихідним торцем волокна та ПЗЗ матрицею відеокамери представлені на рис. 3.6. Отримані залежності відповідають кореляції між зображеннями спекл-структур, зареєстрованих послідовно під час повздовжньої деформації волокна на величину 100 мкм з кроком 10 мкм. Для дослідження впливу розміру спеклів на зміну коефіцієнта кореляції, відстань D між вихідним торцем волокна та ПЗЗ матрицею відеокамери спочатку була встановлена рівною 4 см і далі збільшувалась до 6 та 8 см з метою збільшення середнього розміру спеклів приблизно в два рази.

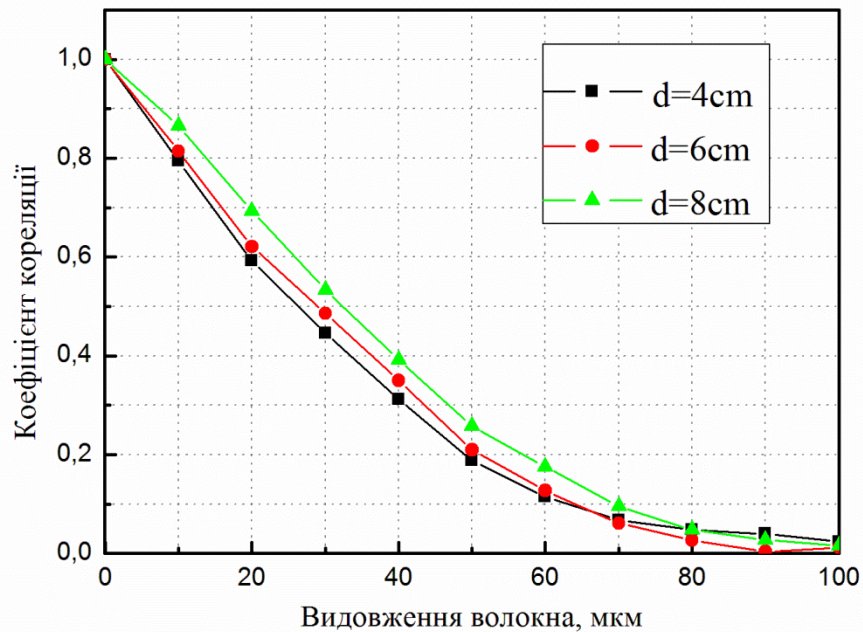


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнта кореляції від видовження ПОВ для трьох різних відстаней між торцем волокна та матрицею ПЗЗ: $D = 4, 6$ та 8 см.

Як можна побачити з рис. 3.6, всі три криві залежності коефіцієнта кореляції від видовження ПОВ мають подібний вигляд. Характер зміни коефіцієнта кореляції між спекл-картинами при деформації волокна є лінійним в діапазоні значень деформації від 0 до 50 мкм, і починає мінятися плавно при досягненні значення $C(\Delta l) < 0.2$. Це відповідає випадку, коли значення додаткової різниці фаз між модами стає рівним 2π . При значеннях коефіцієнта кореляції нижче 0.2 починає спостерігатись декореляція спекл-зображень, що може призводити до отримання помилкових значень при кількісному визначенні зміни деформації. Для вимірювання більших значень деформацій, таку проблема пропонується вирішити за рахунок перезапису в пам'яті комп'ютера опорного спекл-зображення при зменшенні коефіцієнта кореляції до деякого заданого порогового значення, як це показано на рис. 3.7. При цьому значення видовження волокна знайдене після останньої процедури перезапису буде додаватись до значення отриманого до перезапису опорного зображення.

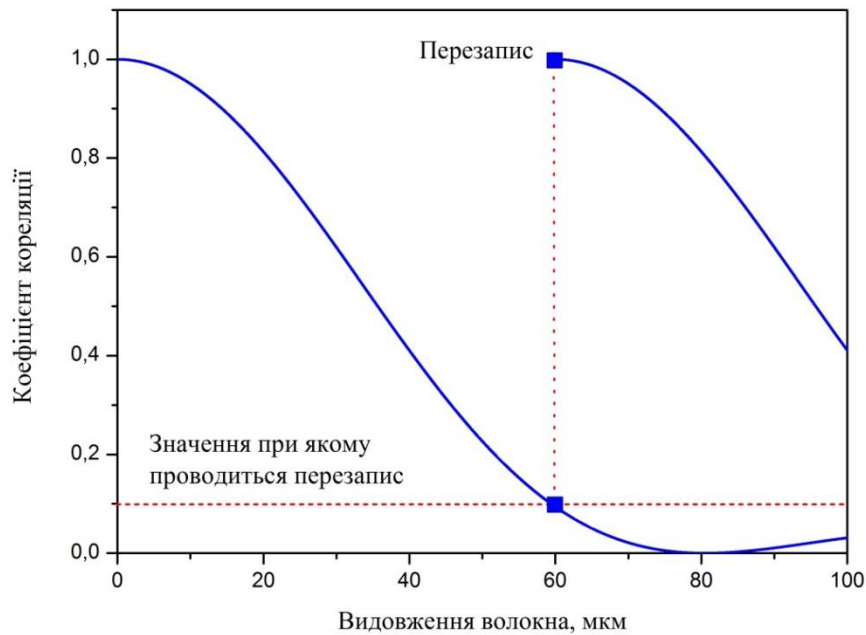


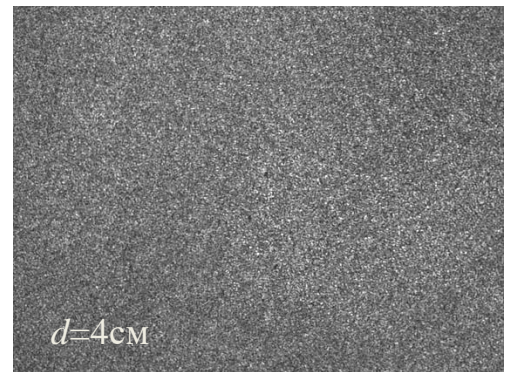
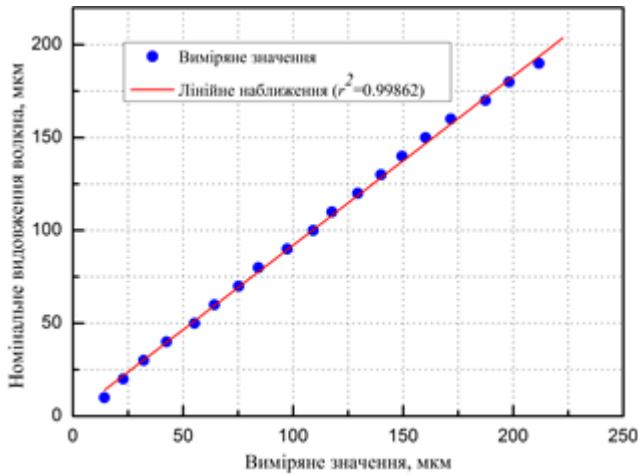
Рис. 3.7. Залежності коефіцієнта кореляції спекл-картин від видовження оптичного волокна отримані до і після перезапису опорного спекл-зображення.

Використовуючи такий підхід можна проводити кількісні вимірювання деформації волокна, які значно перевищують значення при якому починає спостерігатись повна декореляція двох спекл-зображень.

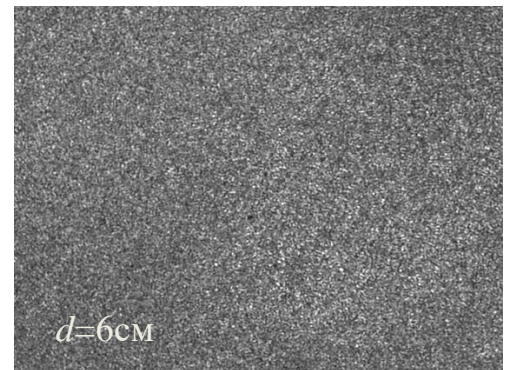
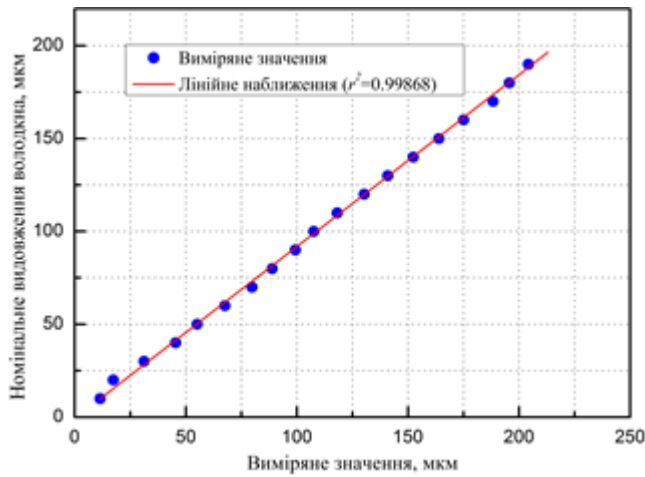
На основі результатів представлених на рис. 3.6. можна зробити висновок, що вища чутливість (тобто більший нахил лінійної ділянки кривої) отримується при менших відстанях між торцем волокна та матрицею ПЗЗ камери, що в свою чергу відповідає меншому середньому розміру спекла в зареєстрованій картині. Таким чином, як і більшість оптичних схем перетворювачів, які використовуються для метрологічних вимірювань, дана схема повинна бути прокалібрована перед початком проведення вимірювань враховуючи вплив параметрів навколишнього середовища, геометрію схеми та роздільну здатність матриці ПЗЗ камери.

Для того, щоб краще проілюструвати вплив розміру спекла в зареєстрованому зображенні на результати вимірювання деформації, на рисунку 3.8 (а – в) наведено порівняння значень деформації волокна отриманих

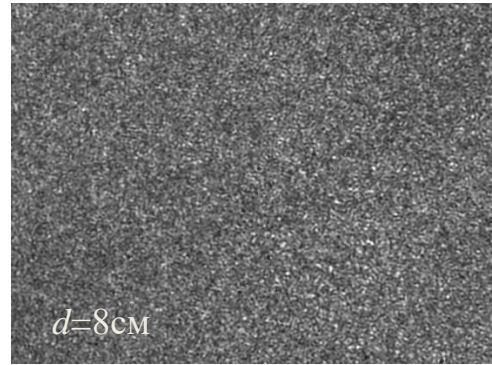
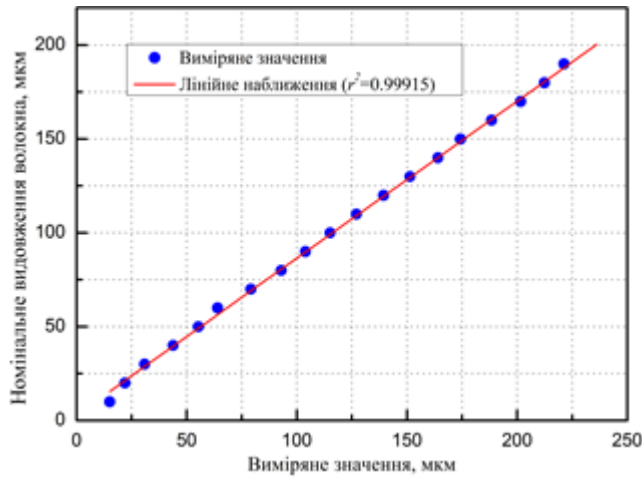
з використанням запропонованого методу з опорним (номінальним) значенням деформації. Досліджуване волокно піддавалось загальній деформації яка становила 200 мкм з кроком 10 мкм. Значення деформації отримувались з калібрувальних кривих, представлених на рис. 3.6. при їх наближенні з використання поліноміальної функції другого порядку.



a)



б)



в)

Рис. 3.8. Виміряні значення видовження волокна для різних відстаней D між торцем волокна та ПЗЗ матрицею: a – 4см; b – 6см; v – 8см

Отримані результати вимірювання демонструють хороше співпадіння між значеннями виміряними з використанням інтерферометра на багатомодовому ПОВ та номінальною величиною деформації (значенням переміщення мікрометричного гвинта). Звідси слідує, що даний метод дозволяє отримати лінійний відгук вимірюваного вихідного параметра до прикладеного навантаження в зазначеному діапазоні деформації волокна. Коефіцієнт лінійної регресії (r^2) при лінійному наближенні результатів вимірювання перевищує значення 0.99 для всіх трьох випадків. Тим не менше, сумарне вимірне значення деформації дещо відрізняється від номінальної деформації за абсолютною величиною. Найбільше значення абсолютної похибки вимірювання деформації було отримане для найбільшого середнього розміру спекла і не перевищувало 3 мкм, що свідчить про придатність даного методу для вимірювання поздовжньої деформації ділянки волокна. На результати вимірювання може впливати статистична природа вимірюваного параметра а також неконтрольовані зовнішні впливи навколишнього середовища. Вплив навколишнього середовища можна суттєво зменшити за рахунок використання у схемі перетворювача одномодового оптичного волокна для вводу випромінювання у багатомодове волокно.

Слід, однак, відмітити, що експериментальні значення отримані для коефіцієнта кореляції спекл-зображень визначаються в результаті обробки вибірки скінченної довжини, внаслідок чого вони можуть бути визначені з граничною точністю. Це демонструють результати вимірювання залежності коефіцієнта кореляції від видовження оптичного волокна з використанням різних опорних спекл-зображень при постійній відстані між вихідним торцем волокна та матрицею ПЗЗ камери, показані на рис. 3.9. Як можна побачити, флуктуації значень коефіцієнта кореляції можуть виступати джерелом похибки при вимірюванні величини поздовжньої деформації волокна з використанням методу прямого кореляційного порівняння спекл-структур на виході інтерферометра.

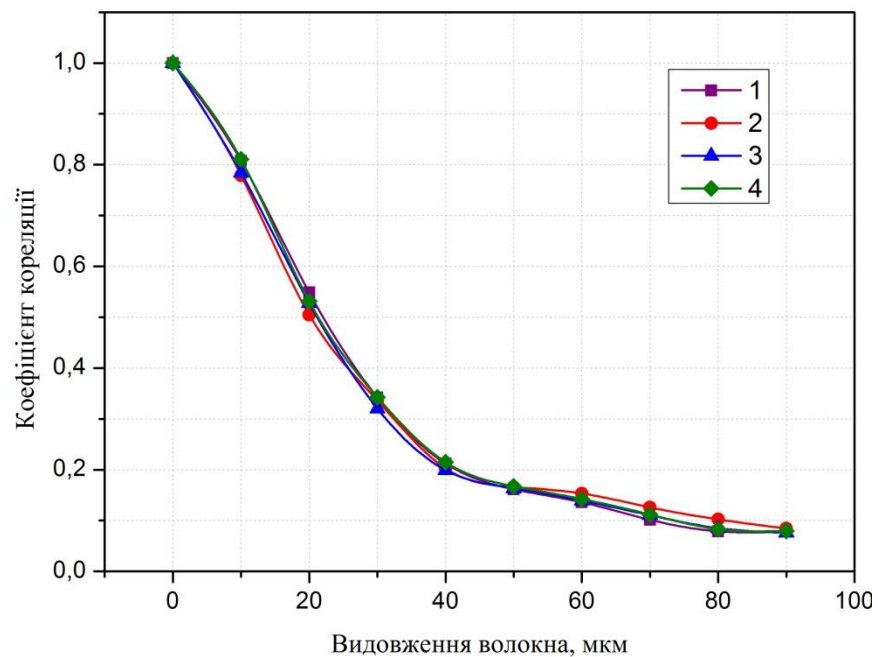


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнта кореляції спекл-зображень від видовження оптичного волокна при повторенні вимірювань.

Величина вказаної похибки, що визначається як середньоквадратичне відхилення виміряного значення Δl , на лінійній ділянці залежності коефіцієнта кореляції спекл-структур від деформації волокна складає близько 5% від її величини, і для даного випадку становить приблизно 2.5 мкм. Тим не менше,

представлені результати свідчать про повторюваність отриманих експериментальних даних при багаторазових вимірюваннях.

З метою дослідження впливу довжини хвилі джерела випромінювання на залежність отриманих значень коефіцієнта кореляції спекл-зображень від деформації, також було проведено вимірювання зміни коефіцієнта кореляції інтенсивностей спекл-структур при деформації волокна з використанням одномодового лазерного діода (PL405B) з довжиною хвилі випромінювання 455 нм. Порівняння отриманих результатів вимірювання для двох різних довжин хвиль джерела випромінювання представлено на рис. 3.10.

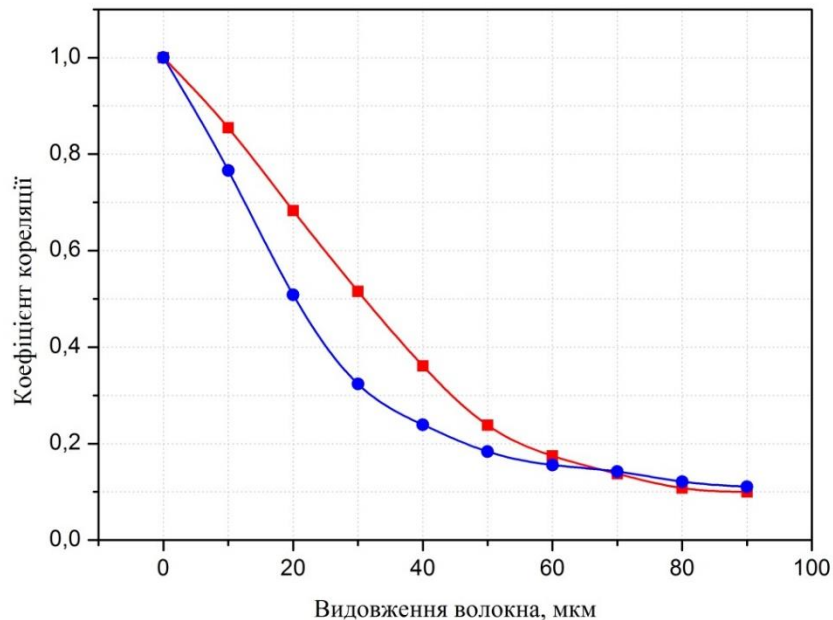


Рис. 3.10. Зміна коефіцієнта кореляції спекл-зображень при поздовжній деформації волокна отримана для різних довжин хвиль джерела випромінювання: 1 – He-Ne лазер з довжиною хвилі 632 нм; 2 – діодний лазер з довжиною хвилі 455 нм.

З представлених залежностей видно, що при використанні джерела випромінювання з більшою довжиною хвилі величина деформації волокна, для якої починає спостерігатися декореляція між опорним та поточним спекл-зображеннями, буде мати більше значення. Це відповідає результатам

теоретичних розрахунків для залежності зміни коефіцієнта кореляції спекл-картин від видовження волокна для різних довжин хвиль, представлених в пункті 2.2. Крім того, оскільки більшим значенням довжини хвилі випромінювання відповідатиме більший середній розмір спеклів, що формуються ним на виході волокна, отриманий результат узгоджується із експериментальними даними, які були отримані при різних значення середнього розміру спеклів.

3.2. Дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод

Протягом останніх років спостерігається зростання інтересу до використання ПОВ в якості чутливих елементів для перетворювачів фізичних величин, зокрема в схемах для вимірювання та контролю параметрів вібрації [82-85]. Використання багатомодових ПОВ в таких давачах потребує розробки та дослідження ефективних механізмів модуляції випромінювання у волокні. При згинах багатомодового оптичного волокна відбувається зміна розподілу потужності мод, які поширюються у волокні, що є наслідком взаємодії між хвилеводними модами. В загальному, на практиці складно виміряти потужність окремої моди в багатомодовому оптичному волокні, оскільки в ньому може одночасно поширюватись більше тисячі хвилеводних мод. Однак, за допомогою фотоприймача може бути виміряна потужність певної групи мод. Якщо в якості приймача випромінювання використовувати фотодіод, то він реєструватиме середню оптичну потужність випромінювання всіх мод і сигнал міжмодової інтерференції в такому випадку буде відсутній. Тому, для виявлення зміни інтенсивності сигналу міжмодової інтерференції на виході перетворювачів на базі багатомодових оптичних волокон при вимірюванні параметрів вібрації необхідно виділити частину випромінювання спекл-структури на виході волокна яка реєструється фотоприймачем.

В даному розділі описано базову структуру та особливості функціонування запропонованої схеми волоконно-оптичного перетворювача

частоти вібрації, принцип дії якого заснований на реєстрації та аналізі спекл-структури випромінювання, яка утворюється на виході багатомодового ПОВ при збудженні в ньому мод вищих порядків. Розподіл інтенсивності випромінювання в цьому випадку матиме форму кільця з темними центром, радіус якого повністю визначається кутом вводу лазерного випромінювання в оптоволокно. Використання такого підходу дає змогу підвищити чутливість волокного перетворювача вібрації до зовнішнього збурення, оскільки моди вищих порядків є більш чутливими до зовнішніх механічних впливів, в порівнянні з модами нижчих порядків [79].

Оскільки, властивості функції розподілу мод у спекл-картині є такими, що зміна фази мод (зміна спекл-структури випромінювання) не змінює інтегральну потужність випромінювання, яку реєструє фотоприймач [70], то для виділення інтерференційних коливань інтенсивності необхідно проводити діафрагування частину вихідного випромінювання. Для експериментального дослідження модуляції випромінювання у багатомодовому ПОВ перед фотоприймачем була встановлена просторова діафрагма, яка розміщується відносно приймача таким чином, щоб амплітуда сигналу на виході з приймача була максимальною. Зміна амплітуди вихідного сигналу контролювалась на моніторі ПК з використанням програмного забезпечення Multi VirAnalyzer.

Для отримання максимальної величини сигналу на виході багатомодового волокна, діафрагму відносно фотоприймача потрібно встановити в положення, яке буде відповідати найбільшій зміні інтенсивності спекл-структури випромінювання при періодичному механічному збуренні волокна. Експериментальним шляхом виявлено, що найбільша зміна вихідного сигналу спостерігається при реєстрації спекл-структури у вигляді кільця, яке утворюється внаслідок інтерференції мод вищих порядків у волоконному хвилеводі. Для збудження мод вищих порядків випромінювання лазера вводилось під різними кутами відносно осі волокна. Таким чином на екрані спостерігалась інтерференційна спекл-картина у вигляді кільця (рис. 3.11).

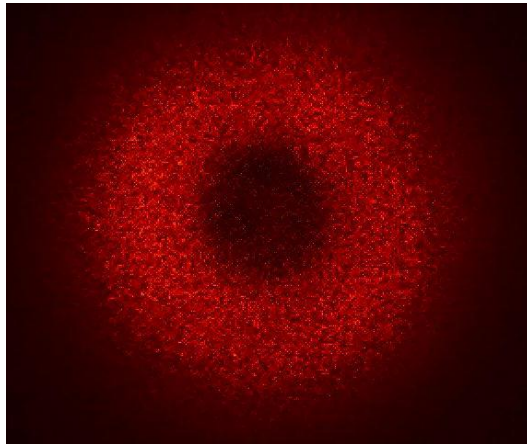


Рис. 3.11. Зображення спекл-картини випромінювання на виході багатомодового ПОВ при збудженні мод вищих порядків

Радіус утвореного кільця повністю визначається кутом під яким випромінювання вводиться у волокно, а його ширина буде визначатись кутовою шириною сфокусованого на вході пучка. По мірі збільшення кута вводу випромінювання у волокно радіус кільця також збільшується. На рис. 3.12. схематично представлено характеристику просторового розподілу вихідного випромінювання багатомодового волокна в залежності від умов вводу випромінювання на вході оптичного волокна.

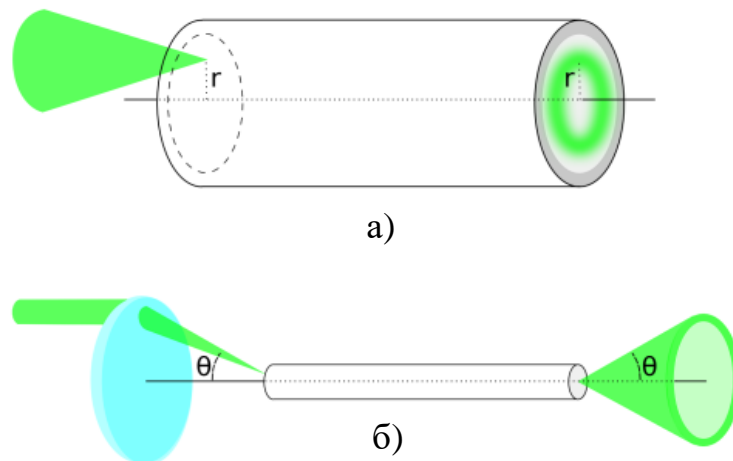


Рис. 3.12. Структура випромінювання на виході багатомодового оптичного волокна: а) випромінювання фокусується на вхідний торець волокна в точці, розташованій на відстані r від осі волокна; б) пучок променів падає на вхідний торець волокна під кутом θ .

На рис. 3.12. (а) найбільша інтенсивність випромінювання на вихідному торці волокна буде зосереджена в межах кільця з радіусом r . У випадку, зображеному на рис. 3.12. (б) пучок променів падає на вхідний торець волокна під кутом θ , а випромінювання на виході волокна представляє собою пучок променів з таким самим кутом нахилу θ відносно осі волокна в усіх азимутальних напрямках.

Для оцінки необхідної величини згину багатомодового оптичного волокна, при якій можна ефективно реєструвати зміну інтенсивності спекл-картини за допомогою фотоприймача, спекл-зображення попередньо реєструвались цифровою камерою з обраним режимом роздільної здатності 640×480 пікселів при різних радіусах згину. В ході досліджень було виявлено, що при збільшенні радіуса згину волокна розмір утвореного кільця зменшується в напрямку до центру і кільце поступово переходить в суцільний розподіл випромінювання.

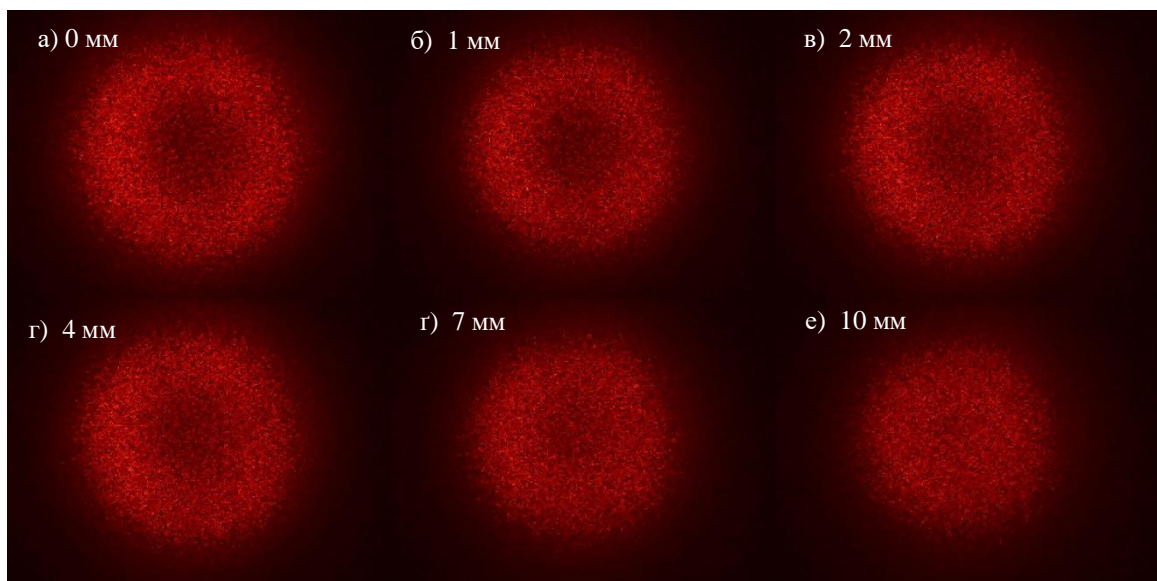


Рис. 3.13. Зображення спекл-картин на виході багатомодового ПОВ отримані при різних радіусах згину волокна.

Отримані зображення з цифрової камери записувались в пам'яті ПК і оброблялися в програмному середовищі Matlab. Із зареєстрованих зображень отримувалась матриця, елементи якої відповідали значенням інтенсивності від 0 до 255. Для отримання розподілу інтенсивності по пікселях зображення,

отримана матриця транспонувалася, після чого з неї виділявся один вектор-стовбець. Шляхом послідовної перевірки було виявлено що найбільше зміна інтенсивності пікселів зображення спостерігається в векторах стовпцях розташованих посередині зображення. Графіки розподілу інтенсивності по пікселях для різних зображень представлено на рис. 3.14 і 3.15. Встановлено, що суттєва різниця між розподілами інтенсивності виникала починаючи із 4 зображення на рис. 3.13, якому відповідає радіусі згину $R = 4$ мм. З графіку на рис 3.15 виділено помітну різницю в розподілах інтенсивностей між зображеннями спекл-картини до та після згину волокна.

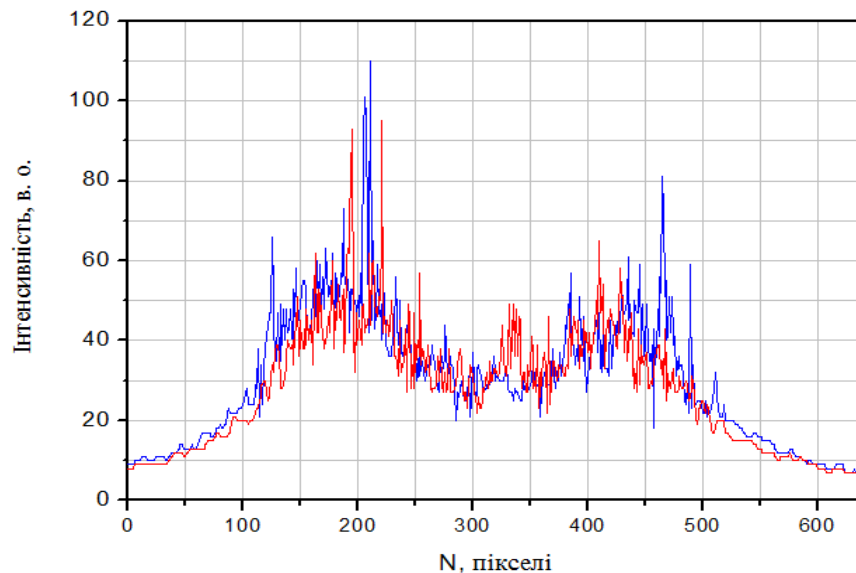


Рис. 3.14. Розподіли інтенсивності спекл-картини по пікселях зображення без згину волокна (синя крива) та при $R = 1$ мм (червона крива)

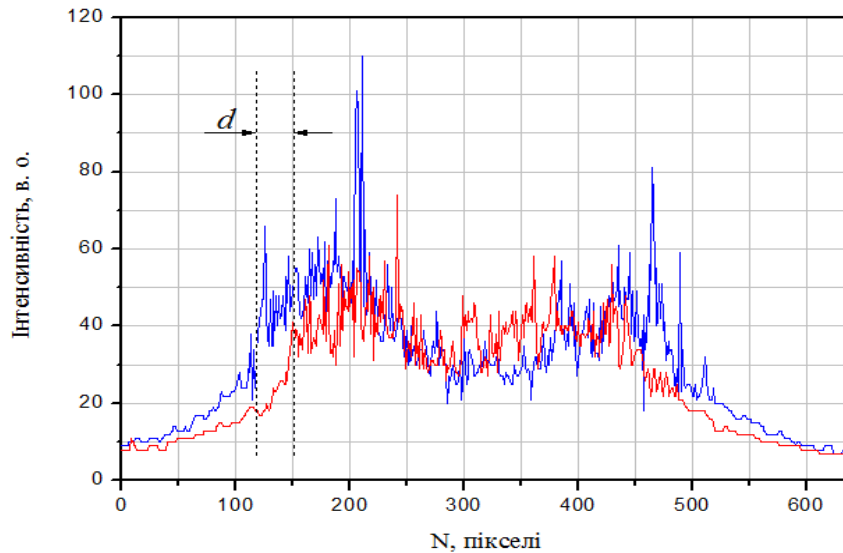
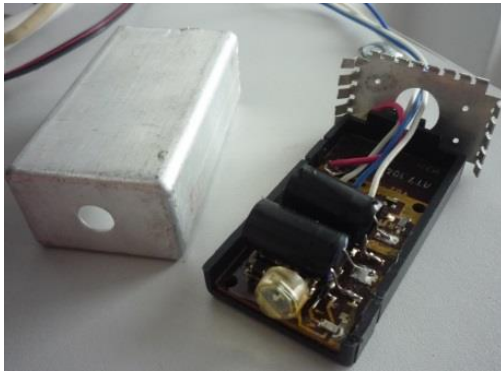
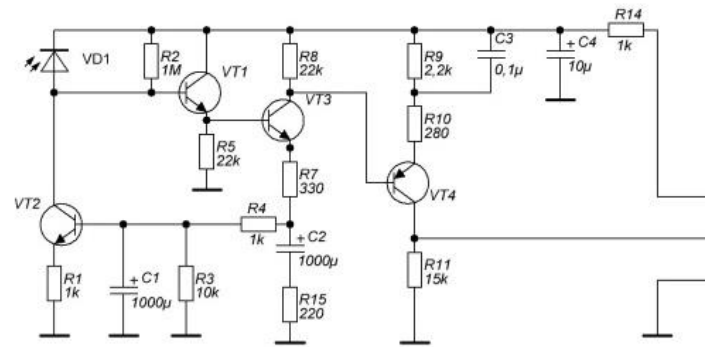


Рис. 3.15. Розподіли інтенсивності спекл-картини по пікселях зображення без згину волокна (синя крива) та при $R = 4$ мм (червона крива). Штриховими лініями виділено область з найбільшою різницею інтенсивності

Дослідження механізму модуляції інтенсивності випромінювання багатомодового полімерного оптичного волокна при збудженні в ньому мод вищих порядків проводилося на установці, зображеній на рис. 3.17. Випромінювання з лазера 1 направлялось на торець полімерного волокна завдовжки 1 м з діаметром серцевини 980 мкм. Вхідний торець волокна закріплювався на поворотному столику 2, який дозволяв плавно змінювати кут вводу лазерного випромінювання у волокно. Досліджуване волокно монтувалось на спеціальних тримачах 3, які забезпечували його необхідну фіксацію і натяг, поглинаючи при цьому велику частину шумових вібрацій. В якості модулятора було використано акустичний динамік 4, з прикріпленням до дифузора оптичним волокном, який створював вібрацію ділянки волокна. Під'єднаний до динаміка генератор низькочастотних сигналів ГЗ-118 дозволяв подавати на нього сигнали з різною частотою та амплітудою. Випромінювання на виході з волокна направлялось на чутливий елемент фотоприймача 5, перед яким було встановлено діафрагму.



а)



б)

Рис. 3.16. Зовнішній вигляд і принципова схема фотоприймача для реєстрації зміни інтенсивності випромінювання

У схемі було використано фотоприймач що складається з фотодіода і підсилювального каналу, який в свою чергу, побудований на транзисторах VT1, VT3, VT4. Корисний сигнал знімається з колектора транзистора VT4. Фотоприймач поміщений в металевий корпус для захисту від зовнішнього електромагнітного випромінювання. Ємність конденсаторів C1 і C2 підібрана таким чином, щоб забезпечувати високе підсилення вихідного сигналу на низьких частотах.

Використання фотоприймача в якості альтернативи ПЗЗ-камери для реєстрації сигналу волоконно-оптичного перетворювача параметрів вібрації дозволяє усунути обмеження, яке задається фіксованою частотою камери, та водночас спростити схему вимірювальної установки. Сигнали з фотоприймача подавались на ПК зі спеціалізованим програмним забезпеченням Multi VirAnalyzer V3.11.1.0 яке використовувалось для візуалізації та подальшої обробки отриманих даних за алгоритмом швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), та одержання спектральне відображення вхідного сигналу.

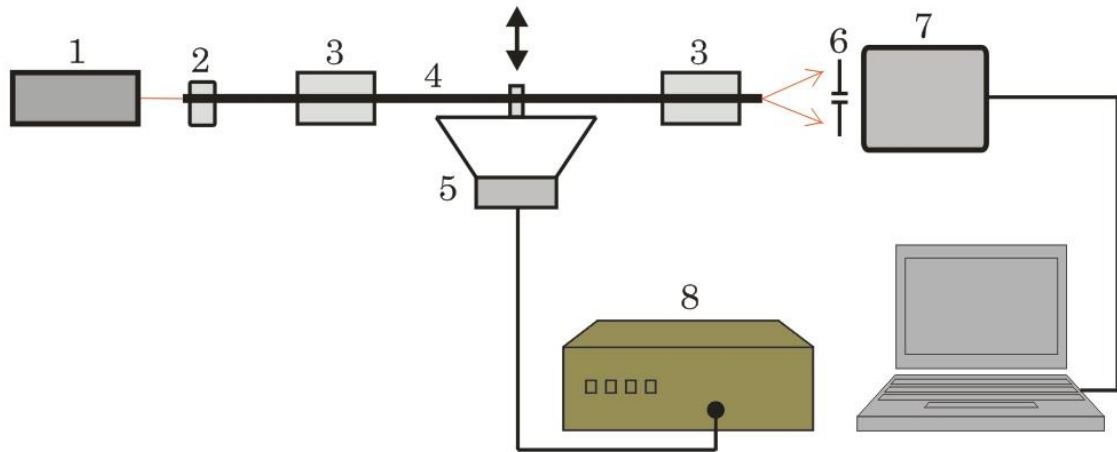


Рис. 3.17. Схема експериментальної установки: 1 – лазер; 2 – поворотний столик; 3 – тримачі для фіксації та натягу волокна; 4 – полімерне оптичне волокно; 5 – пристрій модуляції; 6 – діафрагма; 7 – фотоприймач; 8 – генератор сигналів

Модуляція інтенсивності випромінювання при збудженні мод вищих порядків в ПОВ здійснювалась гармонічним сигналом з амплітудою модуляції близько 1 мм при частоті 30 Гц. Для дослідження впливу ступеня когерентності джерела випромінювання на частотний спектр отриманого сигналу, спочатку, в якості джерела випромінювання було використано діодний лазер HLDPМ12-655-25 з довжиною хвилі 655 нм та потужністю 25 мВт. Довжина когерентності такого лазера перевищує 0.5 м, що дозволяє використовувати його для інтерференційних вимірювань. Частотний спектр вихідного сигналу отриманий з використанням діодного лазера в якості джерела випромінювання представлено на рис. 3.18.

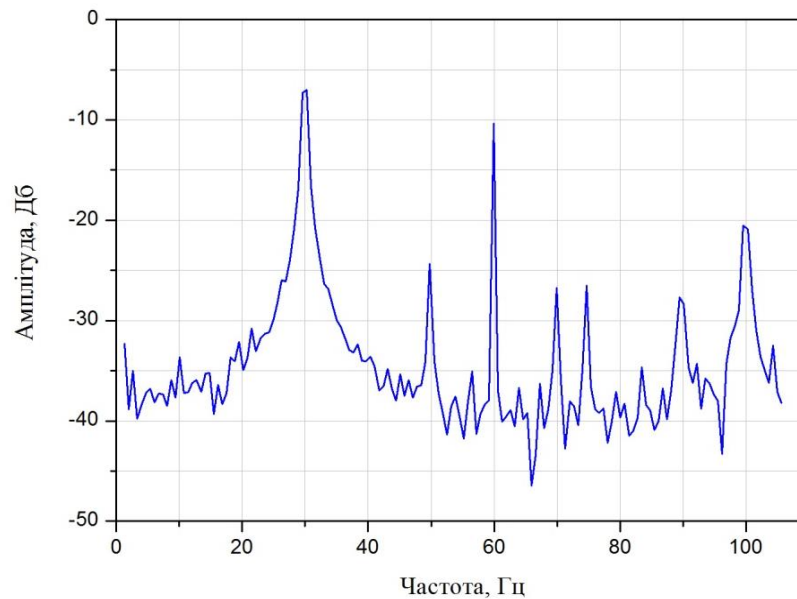


Рис. 3.18. Частотний спектр сигналу на виході багатомодового ПОВ при збудженні в ньому мод вищих порядків з частотою 30 Гц з використанням діодного лазера

У відповідності до теорії зв'язаних мод [3], спектр вихідного сигналу містить як основну частоту сигналу вібрації, так і декілька гармонік основної частоти. Амплітуда сигналу на основній частоті вібрації рівна 33 Дб і практично відповідає амплітуді сигналу першої гармоніки, яка складає 30 Дб. Пік амплітуди сигналу на частоті коливань 100 Гц відповідає паразитній модуляції вихідного сигналу з подвійною частотою струму в мережі електроживлення.

Після цього було проведено аналогічне дослідження з використанням He-Ne лазера, довжина когерентності якого є більшою у порівнянні з діодним лазером. Спектр сигналу на виході волокна, отриманий при частоті модуляції 30 Гц представлено на рис. 3.19.

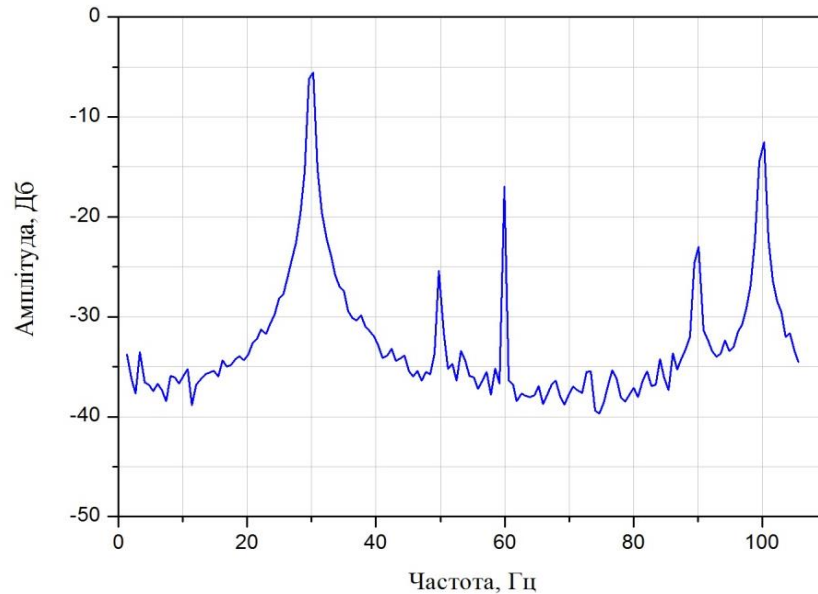


Рис. 3.19. Частотний спектр сигналу на виході багатомодового ПОВ при збудженні мод вищих порядків з частотою 30 Гц. В якості джерела випромінювання використано He-Ne лазер

Амплітуда сигналу на основній частоті вібрації волокна складає 35 Дб і є більшою за амплітуди сигналів першої та другої гармонік на 13 Дб та 18 Дб відповідно, що дозволяє чітко ідентифікувати частоту сигналу, яка відповідає зовнішній механічній вібрації волокна. При використанні He-Ne лазера, амплітуда вихідного сигналу на основній частоті сигналу вібрації є значно більшою від амплітуди сигналу на частоті другої гармоніки, на відміну від використання діодного лазера [80]. Це можна пояснити тим, що при використанні джерела випромінювання з більшою довжиною когерентності зміна сигналу на виході волокна в більшій мірі відбувається за рахунок модуляції фази оптичного випромінювання.

Результати теоретичного аналізу, наведені в розділі 2 для випадку просторової фільтрації частини вихідного випромінювання, отримали експериментальне підтвердження того, що використання просторової фільтрації сигналу дозволяє збільшити амплітуду корисного сигналу, який реєструється фотоприймачем, майже в 3 рази в порівнянні з сигналом, отриманим без використання просторового фільтру (рис. 3.20).

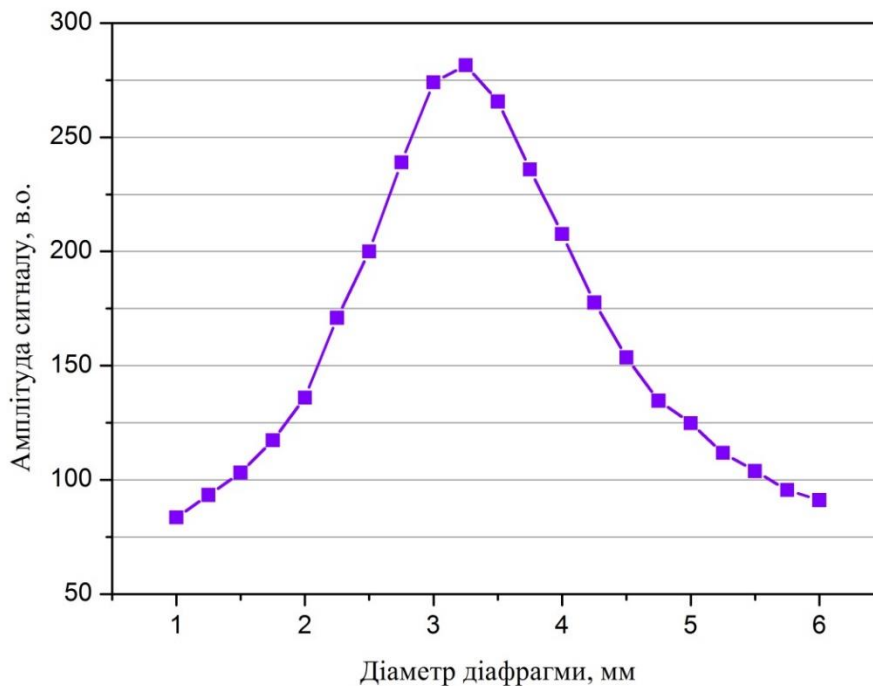


Рис. 3.20. Залежність амплітуди вихідного сигналу фотоприймача від діаметру вхідного отвору просторового фільтра для відстані між вихідним торцем волокна та фотоприймачем $L = 2$ см

Експериментальним шляхом було знято залежність амплітуди вихідного сигналу від діаметру вхідного отвору фотоприймача, яка вимірювалась при використанні набору змінних діафрагм для відстані $L = 2$ см між вихідним торцем волокна і вхідною площиною фотоприймача. Результати вимірювань представлені на рис. 3.20, з якого видно, що найбільш ефективна робота приймального пристрою вимірювальної системи спостерігається при значеннях діаметру діафрагми фотоприймача приблизно 3 – 3.5 мм.

Виявлено також залежність амплітуди вихідного сигналу від відстані між вихідним торцем волокна та фотоприймачем. На рис. 3.21. наведено розподіл інтенсивності вихідного сигналу в залежності від відстані між вихідним торцем волоконного хвилеводу і вхідною площиною фотоприймача. Як можна побачити, найбільше значення амплітуди вихідного сигналу спостерігається

при відстані $L = 2$ см. Для відстаней між волокном та фотоприймачем більше 2 см спостерігається поступове зниження амплітуди вихідного сигналу.

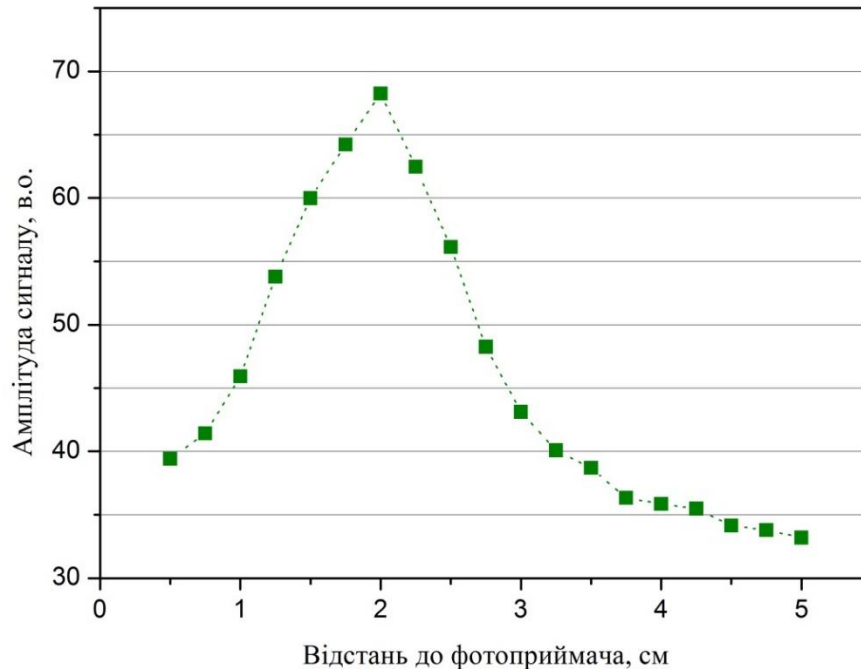


Рис. 3.21. Залежність амплітуди вихідного сигналу багатомодового ПОВ від відстані між вихідним торцем волокна та фотоприймачем.

Порівняльний аналіз експериментальних даних змін спекл-структур, що відбуваються внаслідок апертурних ефектів, параметрів оптичного волокна, джерела випромінювання та зовнішнього впливу на чутливий елемент дозволили виявити чітку залежність від характерних зовнішніх впливів на розподілений волоконно-оптичний перетворювач на базі багатомодового ПОВ. Встановлено слабку залежність середньоквадратичного значення інтенсивності і помітну залежність просторово-часових флуктуацій інтенсивності окремих областей спекл-структури на виході полімерного волокна від зовнішніх параметрів сигналу вібрації.

Аналіз процесів модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних волокнах показав, що зміна інтенсивності мод при їх взаємодії внаслідок згинів волокна, викликаних періодичними механічними

коливаннями, буде визначатись довжиною волокна та амплітудою коливань зовнішнього збурення. Амплітуда сигналу на виході волокна, яку реєструє фотоприймач, залежить від характеристик джерела випромінювання, і є більшою при використанні високо когерентних джерел випромінювання. Використання джерел з малою довжиною когерентності призводить до росту амплітуди сигналу на частотах гармонічних складових та появи додаткових шумів через збільшення зв'язку між модами. Отримані результати досліджень демонструють доцільність використання багатомодових ПОВ в якості чутливих елементів для побудови волоконно-оптичних перетворювачів та давачів інтерференційного типу. Розглянутий механізм модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових ПОВ та отримані результати досліджень можуть бути корисними при конструюванні волоконно-оптичних давачів частоти вібрації та пристроїв реєстрації механічних коливань на базі багатомодових полімерних оптичних волокон.

3.3. Опрацювання спекл-інтерферограм на виході багатомодового волокна в реальному часі

Розробка та практичне впровадження систем тривалого моніторингу технічного стану об'єктів вимагають ефективних інженерних рішень з використанням доступних компонентів. За умови впровадження ефективних алгоритмів аналізу та інтерпретації вимірювальних сигналів, одним із можливих рішень такої проблеми може бути використання вимірювальних систем на базі багатомодових полімерних волоконно-оптичних давачів і перетворювачів інтерференційного типу. У даному пункті буде зосереджено увагу на принципах алгоритму для кореляційної обробки динамічних спекл-інтерферограм на виході багатомодових полімерних волокон, який використовується для покращення процесу вимірювання, а саме для забезпечення функціонування автоматизованої системи вимірювального перетворювача в режимі близькому до реального часу. Основними завданнями розробленого програмного забезпечення автоматизованої вимірювальної

системи на основі аналізу спекл-структур є отримання та реєстрація спекл-зображень з цифрової камери, їх кореляційне порівняння та відображення зміни технічного стану досліджуваного об'єкта. Далі буде поетапно описано алгоритм та розроблене програмне забезпечення, яке використовується для аналізу та інтерпретації динамічних спекл-інтерферограм, що характеризують зміну напружено-деформованого стану чутливої ділянки волокна.

3.3.1. Опис запропонованого алгоритму опрацювання зображень

Алгоритм кореляційної обробки спекл-зображень містить послідовність операцій, які умовно можна розділити на підготовчу частину та основну частину. Підготовча частина складається з послідовного надходження спекл-зображень з цифрової камери через заданий часовий інтервал та етапів їх попереднього опрацювання. Основна частина включає кореляційне порівняння двох послідовно захоплених спекл-зображень однакового розміру та опрацювання отриманого результату. Сюди входить розрахунок нормованого коефіцієнта кореляції між двома матрицями інтенсивності спекл-зображень, отриманими через однакові проміжки часу. Основні кроки алгоритму опрацювання спекл-інтерферограм будуть детально описані нижче.

Отримані цифрові зображення повинні бути попередньо опрацьовані для покращення їх якості, до проведення процедури кореляційного порівняння. Для корекції динамічного діапазону та фільтрації сформованих камерою зображень використовується функція `imadjust` з `Image Processing Toolbox`. Використовуючи цифрову корекцію та фільтрацію, можна добитись зменшення шуму на отриманих зображеннях та підвищення їх контрасту. Крім того, на цьому етапі зареєстроване кольорове зображення перетворюється на чорно-біле зображення в градаціях сірого. Для того щоб мати змогу кількісно оцінки співвідношення між двома спекл-структурами, було використано вираз (2.8), який дозволяє обчислити коефіцієнт кореляції між матрицями поточного та опорного зображень однакового розміру. Загальна блок-схема, яка ілюструє

основні етапи запропонованого підходу до аналізу спекл-інтерферограм на виході багатомодового оптичного волокна представлена на рис. 3.22.

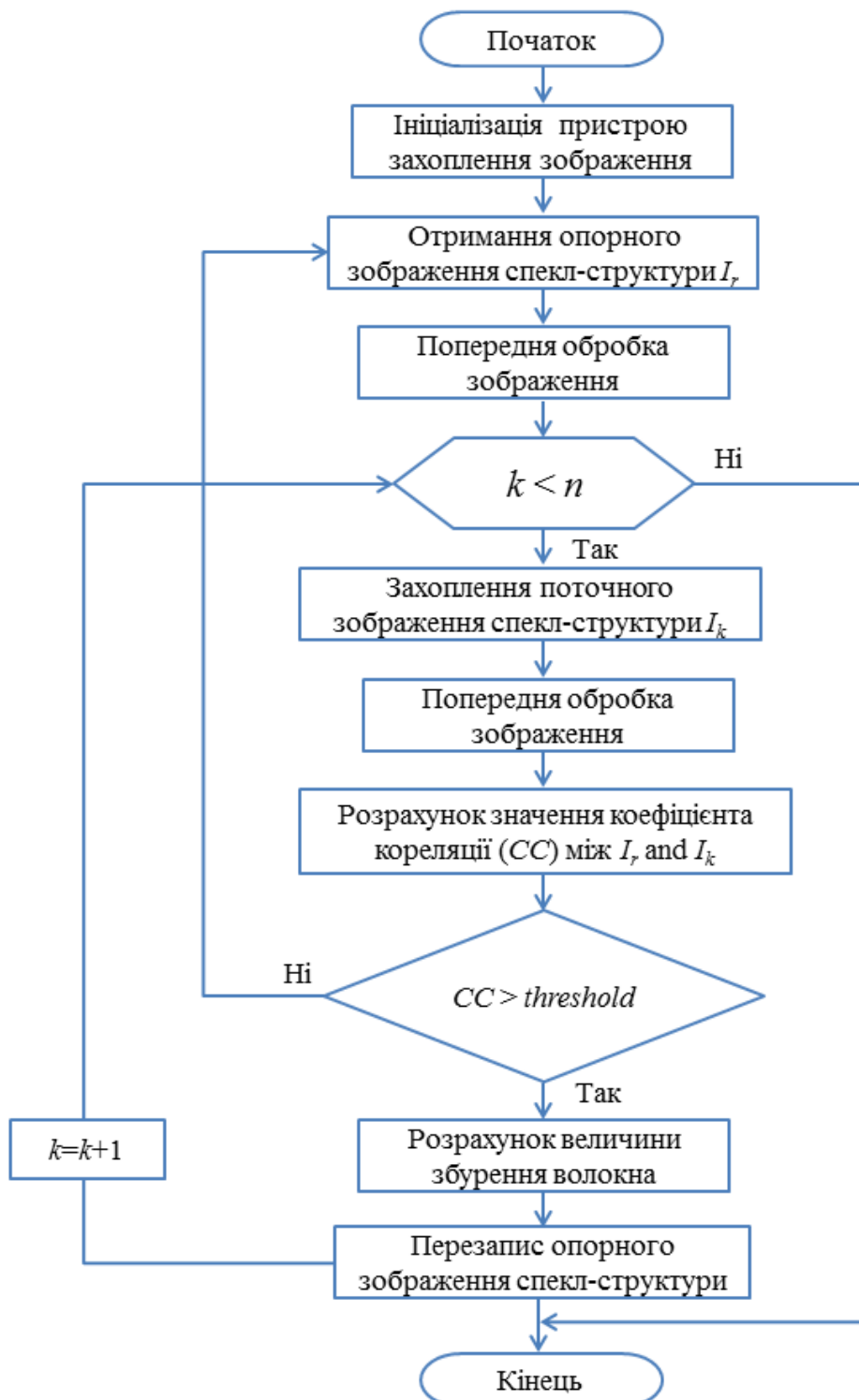


Рис. 3.22. Блок-схема запропонованого алгоритму для опрацювання та аналізу спекл-структур сформованих на виході багатомодового оптичного волокна

На основі описаного алгоритму було розроблено програмне забезпечення для обробки відео-потoku зміни спекл-структури в режимі реального часу та подальшої візуалізації отриманого результату. В якості середовища розробки використано програмний пакет Matlab R2010a. Результат роботи програми може відображатися на екрані в процесі вимірювання та зберігатись у пам'яті комп'ютера для подальшого аналізу. Як вже було відмічено, запропонований алгоритм призначений для автоматизованої обробки даних, їх аналізу, та прийняття рішення стосовно зміни напружено-деформованого стану досліджуваного об'єкта. Відповідно до цього, у робочому вікні програми відображається графічна залежність, яка описує зміну деформаційного стану чуливого елемента волоконного інтерферометра в часі, з можливістю візуалізації зміни динаміки спекл-структури на виході волокна, яку реєструє матриця ПЗЗ камери.

3.3.2. Експериментальна перевірка та оцінка похибок отриманих результатів

З метою оцінки роботи запропонованого методу для аналізу спекл-інтерферограм було досліджено зміну параметрів деформації об'єкта з вбудованим перетворювачем на основі багатомодового ПОВ. В якості зразка для досліджень було використано бетонну призму з розміром поперечного перерізу $7 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$ та довжиною 30 мм. Досліджуваний зразок з вбудованим всередину оптичним волокном піддавався навантаженню за рахунок прикладання до нього різної ваги. Як було описано вище, перед початком вимірювань необхідно провести процедуру калібрування вимірювальної системи волоконного перетворювача.

Узагальнена схема конфігурації використовуваної експериментальної установки для автоматизованого контролю за зміною деформації об'єкта показана на рисунку 3.23. Вона включає в себе апаратну та програмну частини вимірювальної системи. У експериментальній установці для захоплення масиву спекл-зображень лазерне випромінювання освітлює чутливе волокно,

вбудоване в середину досліджуваного об'єкта. ПЗЗ-камера встановлюється на виході волокна та налаштовується у відповідності до вимог щодо реєстрації спекл-інтерферограм на виході волокна описаних у розділі 2. В даному випадку відстань між вихідним торцем волокна і площиною реєстрації спекл-зображень становила близько 8 см, а діаметр серцевини волокна становив 980 мкм. Відповідно, середній розмір спекла приблизно дорівнював 80 мкм при використанні лазера з довжиною хвилі 0.6328 мкм. Розмір комірки матриці камери становить 7.4 мкм, таким чином розмір окремого спекла приблизно в 3 рази перевищував розмір комірки ПЗЗ матриці. Цифрова камера реєструє послідовність спекл-зображень, так що будь-яка зміна спекл-структури на вихідному торці волокна при навантаженні досліджуваного зразка призводить до зміни інтенсивності випромінювання, яка реєструється чутливою площадкою матриці відеокамери [81].

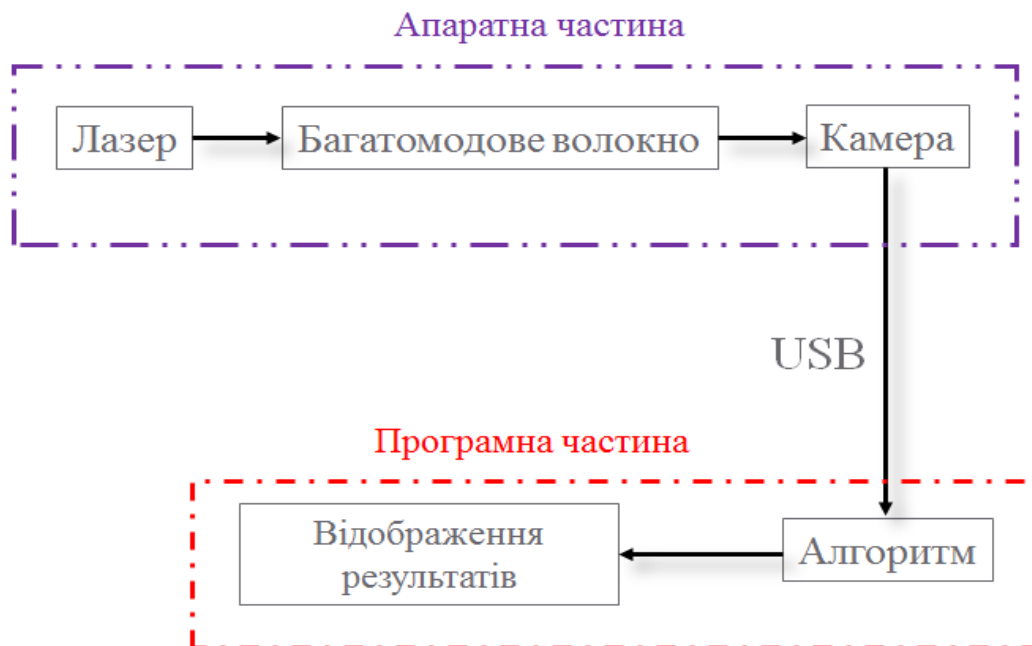


Рис. 3.23. Структурна схема системи моніторингу навантаження об'єкта з багатомодовим волокном.

На рис. 3.24 представлено відгук розробленої вимірювальної системи до одноразового навантаження зразка вагою 0.5 кг. Отримані результати показують співпадіння між вагою, прикладеною до зразка, і отриманим

відгуком волоконного перетворювача, в межах похибки вимірювання. Подібні результати також були отримані після прикладання до зразка більшого навантаження.

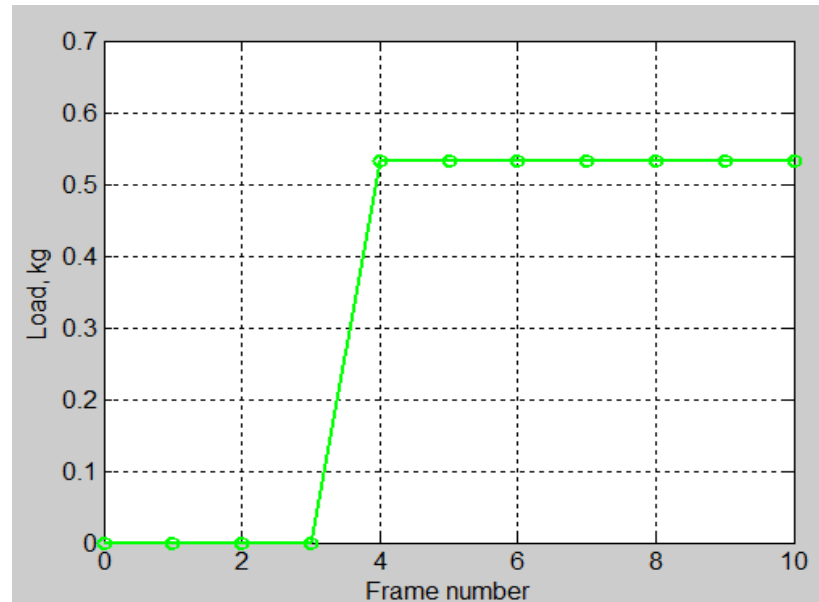


Рис. 3.24. Фрагмент робочого вікна розробленого спеціалізованого програмного забезпечення при реєстрації зміни навантаження зразка після прикладання до нього ваги 0.5 кг.

Крім того, розроблена схема вимірювального перетворювача була перевірена для тривалого контролю зміни деформаційного стану при динамічному навантаженні зразка. У цьому випадку зразок поступово навантажувався різною вагою загальною величиною якої становила 3 кг. Спочатку навантаження зразка відбувалось з кроком 0.2 кг, а потім крок було збільшено вдвічі до 0.4 кг, щоб показати відгук вимірювальної системи з волоконним перетворювачем при різних приростах навантаження. Отриманий результат вимірювань показаний на рис. 3.25, де червона пунктирна лінія вказує на точку збільшення кроку навантаження досліджуваного зразка.

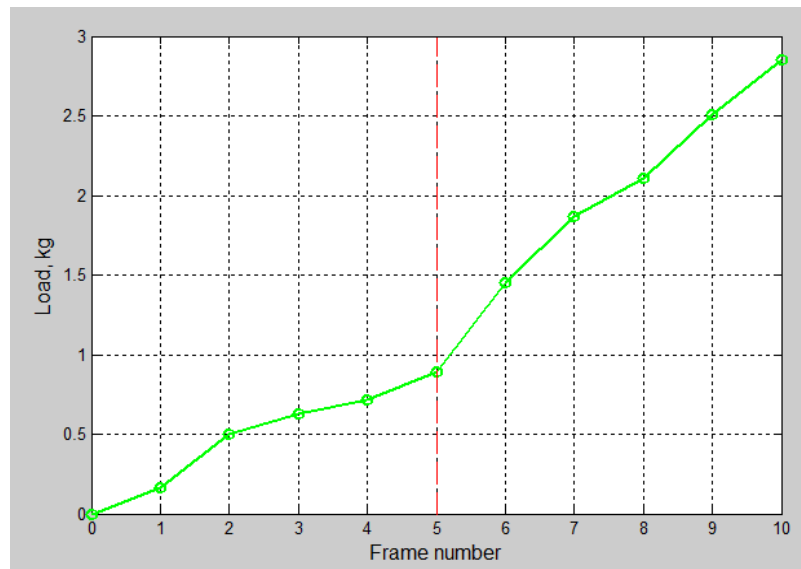


Рис. 3.25. Зміна навантаження зразка в часі, отримана з використанням запропонованого підходу, при його послідовному навантаженні.

Для оцінки впливу власних шумів відеокамери на точність обчислення значення коефіцієнта кореляції між матрицями інтенсивності двох послідовно зареєстрованих спекл-зображень було отримано зміну значення коефіцієнта кореляції в часі для випадку відсутності деформаційного впливу на чутливий елемент волокного інтерферометра (рис. 3.26). Можна побачити, що внутрішні шуми відеокамери, які наявні при реєстрації зображень, будуть вносити деяку похибку при обчисленні значення коефіцієнта кореляції між послідовно отриманими кадрами, розкид значень якого для даного випадку становить 0.00013.

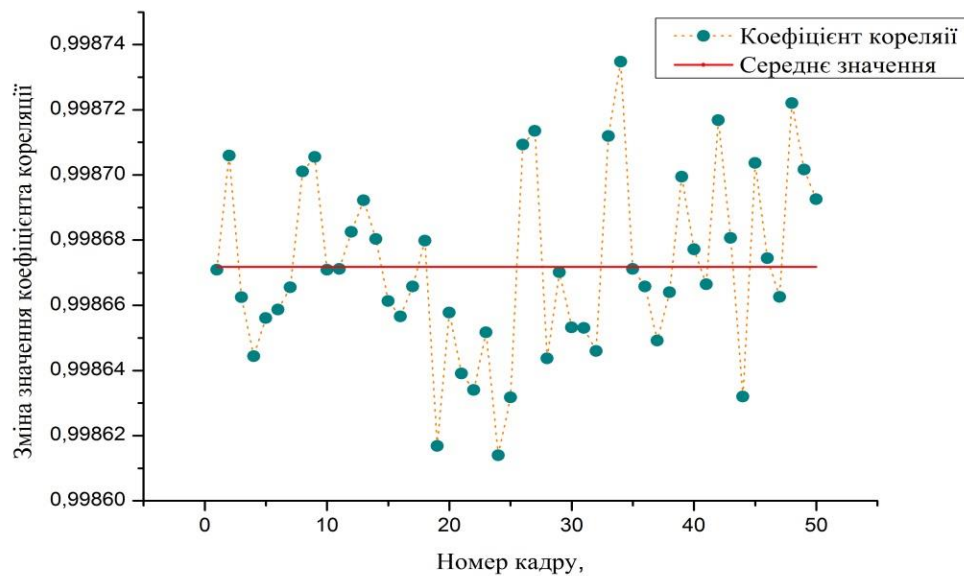


Рис. 3.26. Флуктуації значень коефіцієнта кореляції між матрицями інтенсивності для зареєстрованих спекл-інтерферограм при відсутності деформації волокна

Представлений спосіб опрацювання спекл-інтерферограм призначений для оперативного аналізу деформацій, вібрацій та переміщень різних об'єктів, у тому числі контролю динаміки цих процесів у часі. Він може бути застосований для оцінки параметрів деформації та вібрацій різноманітних елементів конструкцій технічних об'єктів, виробів машинобудування, від їх окремих елементів до кінцевих пристроїв. Основною областю застосування представленої вимірювальної системи можуть бути статичні і вібраційні випробування, а також тривалий контроль та діагностика технічного стану.

Метрологічні характеристики розробленої системи вимірювання параметрів деформації будуть залежати від технічних характеристик цифрової камери (роздільна здатність, чутливість матриці, максимальна частота зйомки). Також на точність отримуваних при вимірюванні результатів буде впливати точність калібрування системи.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено алгоритм для аналізу спекл-структур на виході багатомодових ПОВ для вимірювання та перманентного контролю параметрів деформації волокна, із можливістю автоматизації процесу вимірювання. Показано, що послідовний перезапис опорних зображень просторового розподілу інтенсивності спекл-структури випромінювання на виході волокна дозволяє збільшити діапазон вимірювання видовження волокна, а також визначати напрямок зміни деформації.

2. На основі досліджень залежності коефіцієнта кореляції спекл-зображень від видовження полімерного волокна при його деформації було встановлено оптимальні параметри конфігурації оптичної схеми перетворювача механічної деформації на базі полімерного оптичного волокна, які забезпечують ефективне кореляційне порівняння спекл-інтерферограм.

3. В результаті досліджень механізму модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних волокнах при збудженні мод вищих порядків запропоновано метод для вимірювання частоти механічних коливань та вібрації об'єктів. Розроблений метод дозволяє підвищити ефективність перетворення модуляції фази в модуляцію інтенсивності випромінювання на виході волокна, а також проводити одночасний контроль за зміною амплітуди сигналу збурення.

РОЗДІЛ 4

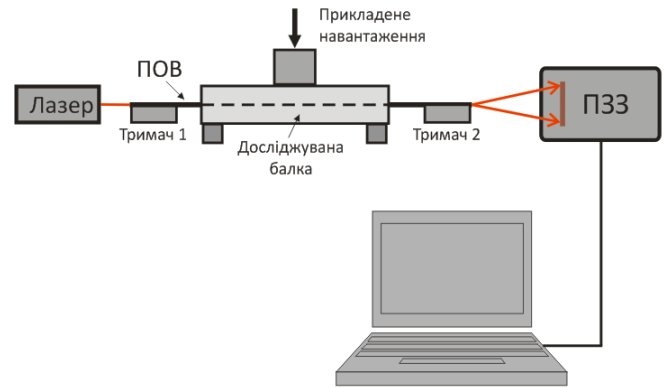
ВИБРАНІ ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРА НА ПОЛІМЕРНОМУ ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ

4.1. Контроль деформації бетонних балок з використанням інтерферометра на полімерному волокні

Для дослідження зміни спекл-структур на виході багатомодового оптичного волокна вбудованого в бетонні балки проводився аналіз зміни коефіцієнта кореляції між спекл-зображеннями від величини прикладеного навантаження. З цією метою було виготовлено три дослідних зразки бетонних балок з вбудованим в них полімерним волокном. Для виготовлення зразків фрагменти багатомодових ПОВ з діаметром серцевини 980 мкм та завдовжки 1 м встановлювалося всередину дерев'яних форм і піддавалось натягу, після чого у форму був залитий цементний розчин. Таким чином були отримані дослідні зразки бетонних балок з однаковими розмірами поперечного перерізу 7см × 5см та різною довжиною 30см, 50см та 70см відповідно (рис. 4.1 (а)). Виготовлені дослідні зразки балок із вбудованим ПОВ піддавались поперечній деформації за схемою трьох точкового згину при прикладеному до них навантаженні. Схематичне зображення експериментальної установки яка використовувалась для досліджень представлено на рис. 4.1 (б). Для навантаження зразків на них послідовно встановлювалась різна вага з кроком 0.1 кг в діапазоні від 0.1 кг до 2.5 кг і за допомогою цифрової камери спряженої з ПК реєструвались зображення, які відповідали зміні спекл-структури викликаної навантаженням зразків. З метою зменшення вібрації та будь-яких переміщень зразків під час вимірювань вони жорстко кріпились до металічної плити. Таким чином на моніторі ПК можна було спостерігати стійку в часі спекл-картину, просторове положення спеклів в якій змінювалось під дією прикладеного навантаження.



а)



б)



в)

Рис. 4.1. Досліджувані зразки фрагментів бетонних балок із вбудованим в них полімерним волокном (а); схема (б) і фото (в) експериментальної установки для дослідження деформації зразків.

Подальша обробка отриманих зображень і розрахунок величини коефіцієнта кореляції між спекл-картинами проводились за допомогою програмного середовища Matlab. Всі вимірювання були проведені тричі для забезпечення повторюваності отриманих результатів. Залежність зміни коефіцієнта кореляції інтенсивності спекл-зображень від величини прикладеного до зразків навантаження показана на рис. 4.2. Можна побачити, що при зростанні навантаження, прикладеного до зразків з вбудованим ПОВ

значення коефіцієнта кореляції між спекл-зображеннями зменшується. Для кожного із зразків можна виділити певні діапазони зміни навантаження, для яких отримані криві є близькими до лінійних залежностей і монотонно спадають по мірі збільшення прикладеного навантаження. За межами зазначеного діапазону навантажень коефіцієнт кореляції спекл-зображень повільно змінюється при прикладанні навантаження і поступово зменшується до нуля. Цей фактор слід враховувати при проведенні вимірювань параметрів деформації зразків, оскільки він визначає максимально допустимий рівень навантаження який може бути виміряний такою системою.

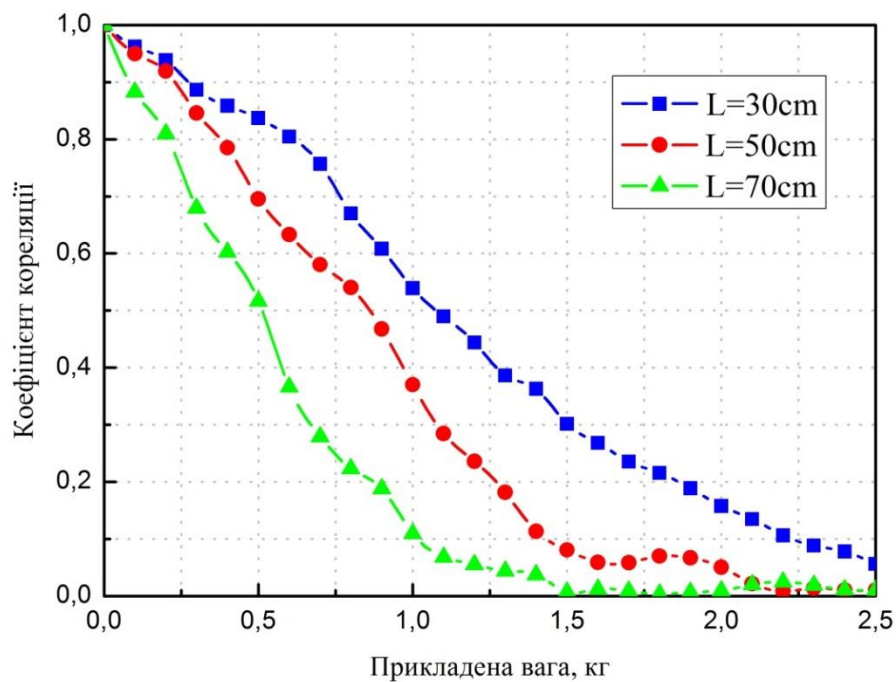


Рис. 4.2. Зміна коефіцієнта кореляції інтенсивності спекл-зображень утворених на виході багатомодового ПОВ вбудованого в дослідні зразки бетонних балок при їх навантаженні

Важливо зазначити, що після зняття навантаження із зразка спекл-структура повертається до своєї попередньої форми, що дає змогу контролювати як навантаження зразка так і процес зняття навантаження. Тим не менш, незначний гістерезис проявляється при послідовному навантаженні зразка та знятті навантаження. Це в першу чергу зумовлено неідеальною

еластичністю оптичного волокна, а також утворенням мікротріщин в об'ємі зразка після його навантаження, що може спричинити незначні зміни в просторовому розподілі інтенсивності спекл-структури.

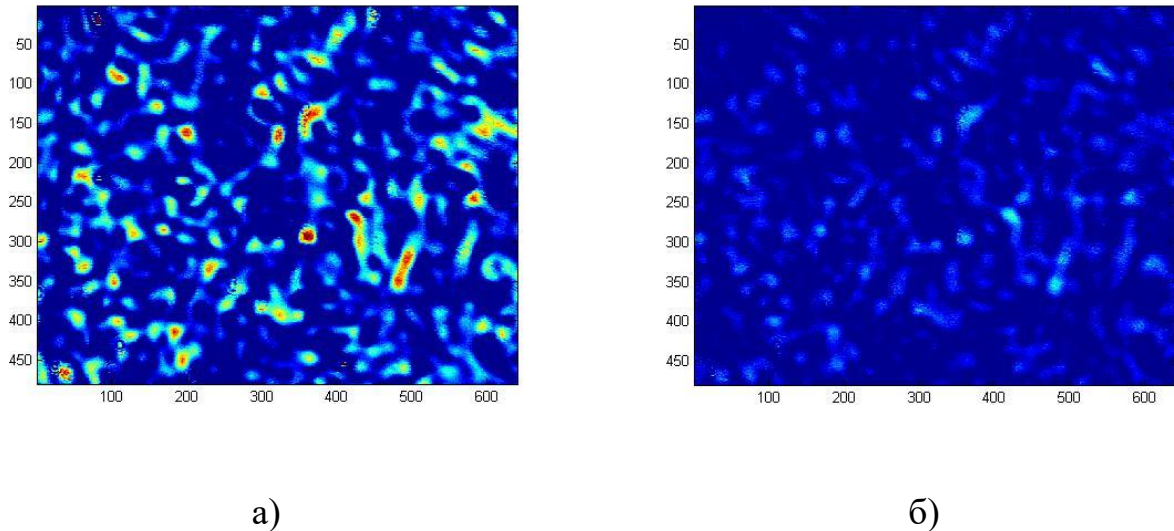


Рис. 4.3. Зображення отримані при відніманні спекл-зображень отриманих без навантаження зразка та при навантаженні вагою 1 кг (а) та після зняття навантаження (б).

Практичне використання запропонованої схеми інтерферометра на багатомодовому полімерному волокні продемонстровано для контролю малих деформацій бетонних балок. Оцінка величини деформації досліджуваних зразків під дією навантаження здійснювалась з використанням програмного пакету Matlab на основі методики та алгоритму описаних в розділах 2 та 3. Отримані результати експериментальних вимірювань деформації досліджуваних зразків при навантаженні представлені у вигляді залежності величини деформаційного зміщення зразків від прикладеного навантаження показано на рис. 4.4. Криві отримані для зразків різної довжини мають близький до лінійного характер зміни. Незначні відхилення від лінійної залежності на окремих ділянках кривих спричинені тим, що навантаження зразків відбувалося нерівномірно, а внаслідок зміни конфігурації ваги яка прикладалась до досліджуваних зразків.

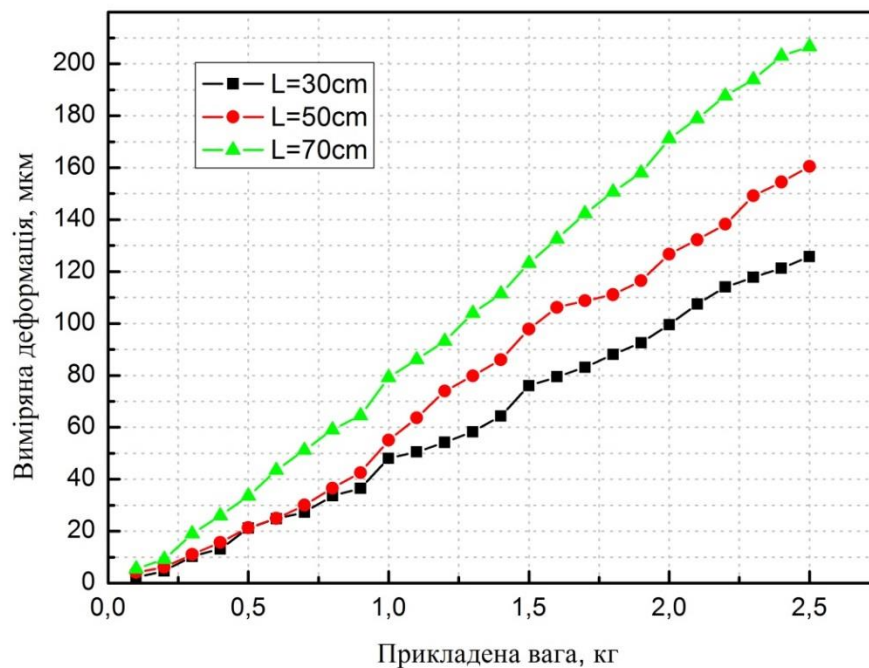


Рис. 4.4. Експериментальні залежності деформації досліджуваних бетонних балок від величини прикладеного до них навантаження отримані при використанні інтерферометра на основі багатомодового ПОВ

Як і варто було очікувати, більші значення деформаційного зміщення досліджуваних зразків були отримані для зразків більшої довжини. Найбільше сумарне значення величини деформаційного зміщення зразка при прикладеному навантаженні 2,5 кг було отримане для зразка довжиною 70 см і становило приблизно 205 мкм. Для зразків довжиною 30 см та 50 см загальна деформація при навантаженні вагою 2,5 кг наближено дорівнювала 125 мкм та 158 мкм відповідно.

Таким чином, запропонований метод обробки сигналів інтерферометра на багатомодовому волокні може бути використаний для волоконних перетворювачів та давачів контролю деформаційного стану конструктивних елементів будівельних споруд в лабораторних умовах. Контроль деформації конструкційних елементів при більш високих навантаженнях потребує використання методів які володіють більшим динамічним діапазоном.

Також, з метою верифікації та оцінки результатів зміни навантаження зразка в часі, отриманих при використанні запропонованого методу опрацювання спекл-інтерферограм, вони порівнювались із фактичним навантаженням, яке прикладалось до зразка. Графічне представлення отриманих експериментальних даних подано на рис. 4.5.

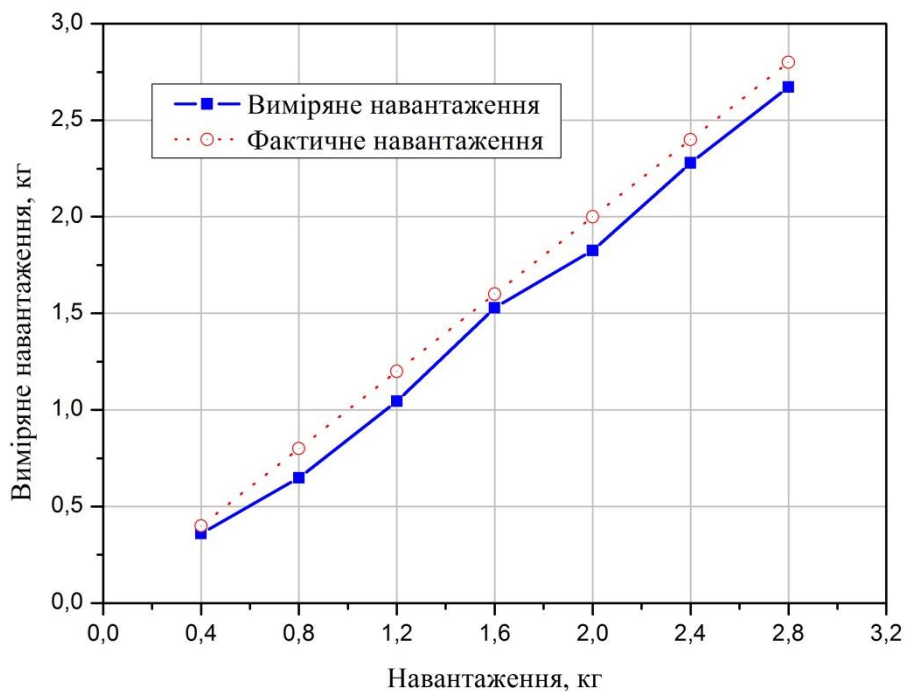


Рис. 4.5. Порівняння отриманих значень навантаження з фактичним навантаженням прикладеним до досліджуваного зразка

Можна побачити незначну розбіжність між вимірним значенням та фактичним навантаженням зразка. Сумарне навантаження прикладене до зразка становило 2,8 кг, в той час як вимірне значення навантаження, отримане з допомогою вимірювальної схеми склало 2,6716 кг. Відносна похибка вимірювання деформації при динамічному навантаженні зразка склала 4,8061%.

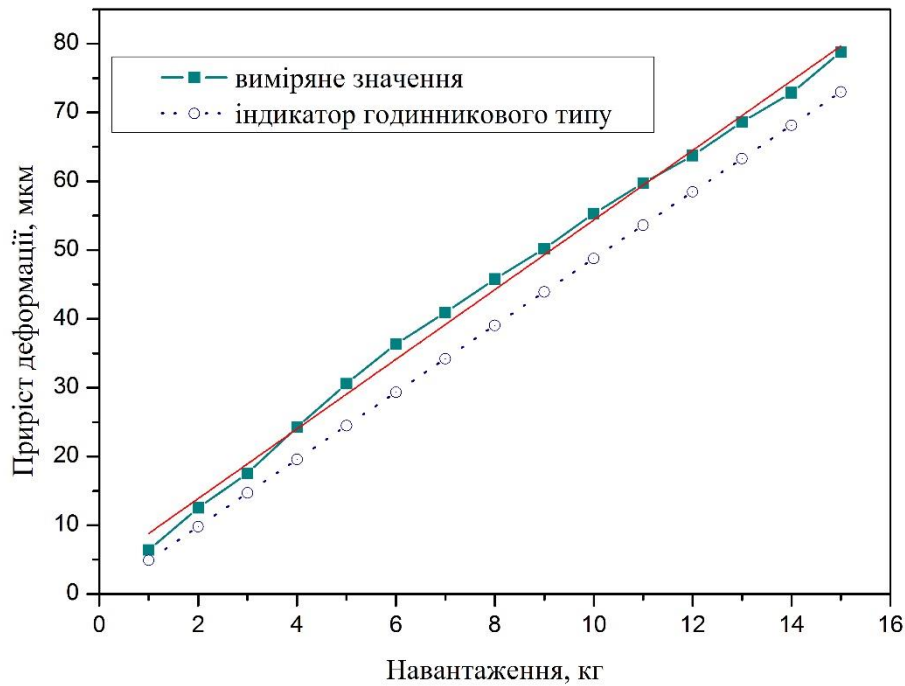
Для перевірки результатів контролю за зміною деформації зразка, отриманих з використанням розробленого методу опрацювання спекл-інтерферограм, вони співставлялись із значеннями деформації, які визначались за допомогою мікроіндикатора годинникового типу, та з результатами

теоретичної оцінки величини деформації зразка внаслідок навантаження [15]. Досліджуваний зразок було встановлено на нерухомі циліндричні опори так, щоб його повздовжня вісь була строго перпендикулярною до опор (рис. 4.6 (а)). Після цього на зразок встановлюється вантажна площина, після чого виставляються на нуль покази індикатора деформації годинникового типу з ціною поділки 0.001 мм на базі 200 мм. Зразок поступово навантажували мірними вантажами з кроком 1 кг до навантаження сумарною вагою 15 кг. Після встановлення кожного вантажу визначали величину прогину зразка.

На рис. 4.6 (б) подано залежності величини деформації досліджуваного зразка від навантаження, отримані різними методами під час проведення експерименту, та на основі теоретичних розрахунків.



а)



б)

Рис. 4.6. Схема навантаження досліджуваного зразка (а) та залежності його деформації від величини прикладеного навантаження отримані різними методами (б)

Як можна побачити з даних, наведених на рис.4.6, результати вимірювання деформації методом аналізу спекл-зображень на виході ПОВ добре збігаються з даними вимірювань, отриманих з використанням мікроіндикатора, та з даними теоретичних розрахунків, що підтверджує придатність запропонованого методу для контролю зміни деформаційного стану досліджуваного зразка.

Враховуючи особливості та переваги запропонованого методу над традиційними схемами волоконно-оптичних інтерферометричних сенсорних систем для діагностики напружено-деформованого стану об'єктів, можна вважати його придатним для безперервного автоматизованого контролю та оцінки технічного стану досліджуваних об'єктів при незначних навантаженнях.

В цілому можна вважати, що отримана під час експериментальних вимірювань похибка визначення деформації досліджуваного зразка з використання розробленого методу для аналізу спекл-структур на виході ПОВ

не перевищує за величиною застосованого механічного методу вимірювання та інших методів описаних в літературних джерелах [73-75], що засвідчує достовірність отриманих результатів. Основною перевагою запропонованої методики є можливість контролювати зміну напружено-деформованого стану зразка в реальному часі, з похибками, які сумірні за величиною з похибками механічних методів вимірювання.

4.2. Вимірювання частоти механічних коливань з використанням інтерферометра на полімерному волокні

Волоконно-оптичні сенсори широко застосовуються для вирішення багатьох промислових та інженерних завдань, оскільки вони мають малі розміри, високу чутливість та є стійкими до впливу електромагнітних полів [76, 77]. Зокрема, волоконно-оптичні сенсори для вимірювання та контролю частоти вібрації елементів будівельних конструкцій дозволяють обійти проблему електричної ізоляції, яка виникає при використанні традиційних п'єзоелектричних сенсорів вібрації [78]. На сьогоднішній день розроблено схеми волоконно-оптичних сенсорів вібрації на основі вимірювання інтенсивності випромінювання, що проходить через оптичне волокно, сенсори на Брегівських решітках та сенсори на основі схем волоконних інтерферометрів. Сенсори на основі волоконно-оптичних інтерферометрів володіють високою чутливістю та точністю вимірювання, що робить їх привабливими для багатьох застосувань.

Як вже зазначалось волоконно-оптичні інтерферометри можуть застосовуватись для вирішення різних інженерних завдань, в тому числі для вимірювання та контролю параметрів вібрації. Сенсори та перетворювачі на основі волоконно-оптичних інтерферометрів володіють високою чутливістю та точністю вимірювання, що робить їх привабливими при дослідженні вібраційних характеристик об'єктів. Переважна більшість таких сенсорів працює на одномодових оптичних волокнах, які мають високі технічні

характеристики. Використання багатомодових волокон обмежується через погіршення якості сигналу, що відбувається внаслідок інтерференції між модами у волокні. Однак, як вже було показано, це явище може бути використане для побудови сенсорів та перетворювачів, в яких інтерференційний сигнал буде визначатися різницею фаз між модами що поширюються у волокні. Така конструкція вимірювального перетворювача забезпечує високу чутливість і, на відміну від традиційних схем волоконних перетворювачів, не потребує опорного плеча і тому є більш стійкою до неконтрольованих зовнішніх впливів. Крім того, даний підхід дозволяє зменшити як елементну базу давача, за рахунок лише одного тракту передачі оптичного інформативного сигналу, так і його масо-габаритні розміри, що призводить до спрощення його конструкції в цілому. В даному розділі представлено схему волоконно-оптичного перетворювача для вимірювання частоти вібрації з використанням багатомодового полімерного оптичного волокна. Принцип дії такого вимірювального перетворювача базується на аналізі спекл-структури вимромінювання яке отримується на виході багатомодового ПОВ при збудженні в ньому мод вищих порядків. В якості чутливого елемента для перетворювача частоти механічних коливань та вібрації використано полімерне оптичне волокон, оскільки воно володіє рядом переваг у порівнянні з кварцовими волокнами при їх застосуванні в якості чутливих елементів для перетворювачів механічних величин, найвагомішими з яких є менша вартість, механічна міцність та висока еластичність при деформації та згинах волокна.

При вимірюванні частоти механічних коливань з використанням багатомодового ПОВ було використано схему експериментальної установки, яка є аналогічною до схеми, представленої на рис. 3.17. Сигнал отриманий на фотоприймачі передавався на цифровий USB осцилограф і подальше вимірювання частоти вібрації волокна проводилось з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є.

Зміна амплітуди вихідного сигналу ПОВ при частоті 60 Гц і амплітуді модуляції 10 В представлено на рис. 4.7, а частотний спектр цього сигналу представлено на рис. 4.8.

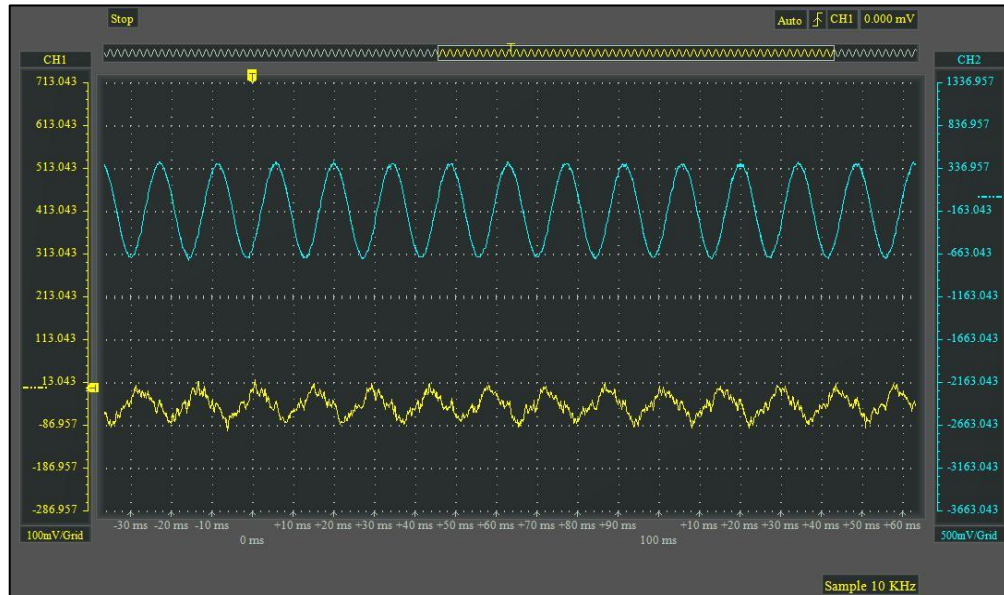


Рис. 4.7. Часова діаграма вихідного сигналу фотоприймача при модуляції з частотою 60 Гц і амплітудою 10 В

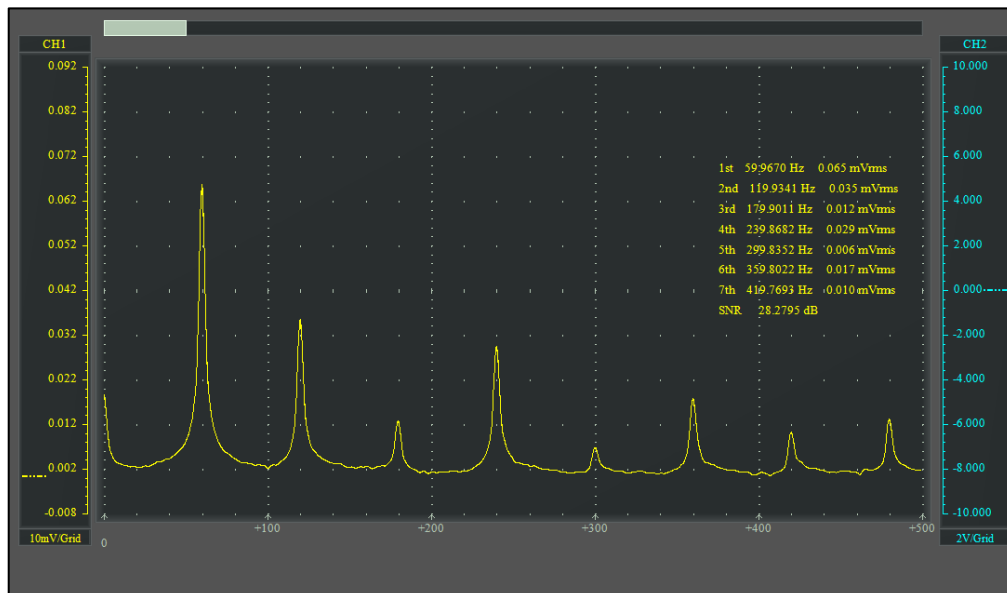


Рис. 4.8. Частотний спектр вихідного сигналу багатомодового полімерного волокна при модуляції мод вищих порядків

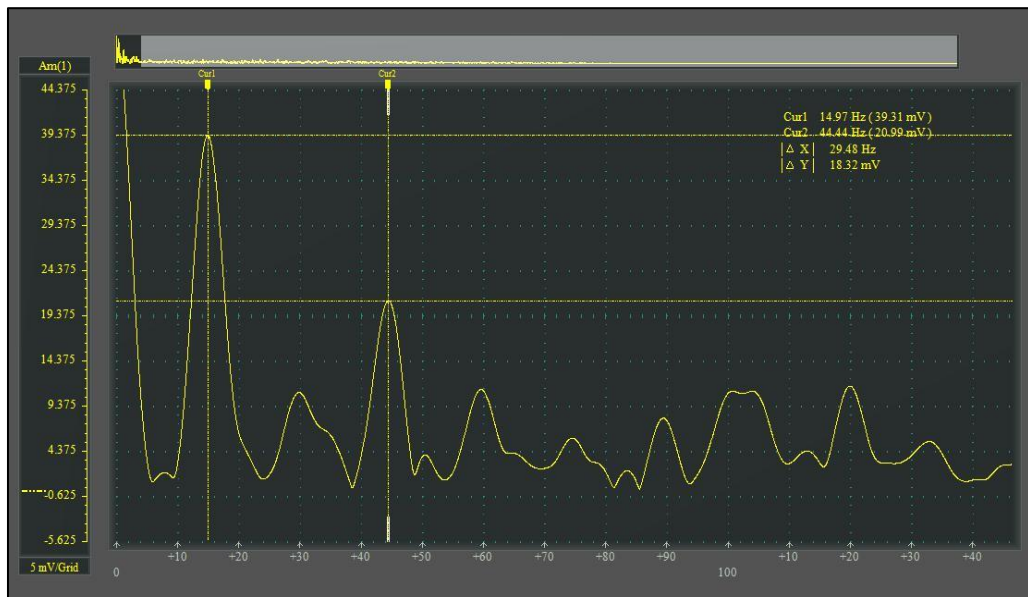
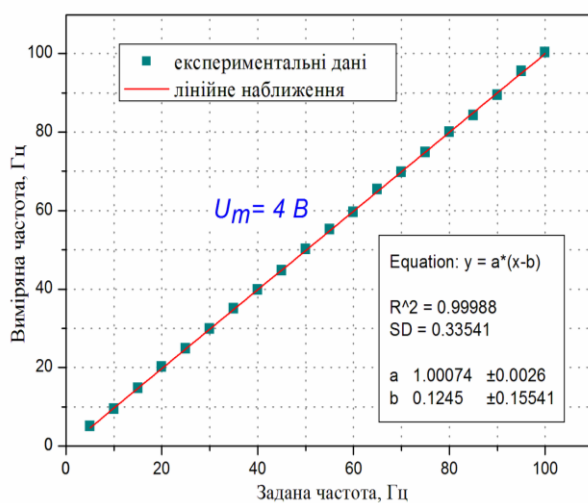
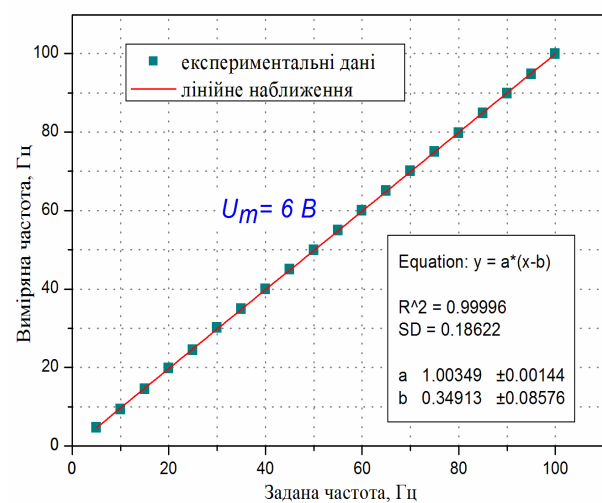


Рис. 4.9. Частотний спектр вихідного сигналу багатомодового полімерного волокна при модуляції з частотою 15 Гц

Для того, щоб охарактеризувати відгук вимірювальної системи перетворювача до зовнішнього збурення внаслідок вібрації було експериментально досліджено зміну вихідного сигналу фотоприймача при різних частотах та амплітудах сигналу збурення. Спочатку, при фіксованому значенні амплітуди сигналу модуляції змінювалась частота в діапазоні від 0 до 100 Гц з кроком 5 Гц. Результати вимірювань отримані для чотирьох різних значень амплітуди сигналу модуляції 4 В, 6 В, 8 В та 10 В відповідно представлено на рис. 4.10 (а – г).



(а)



(б)

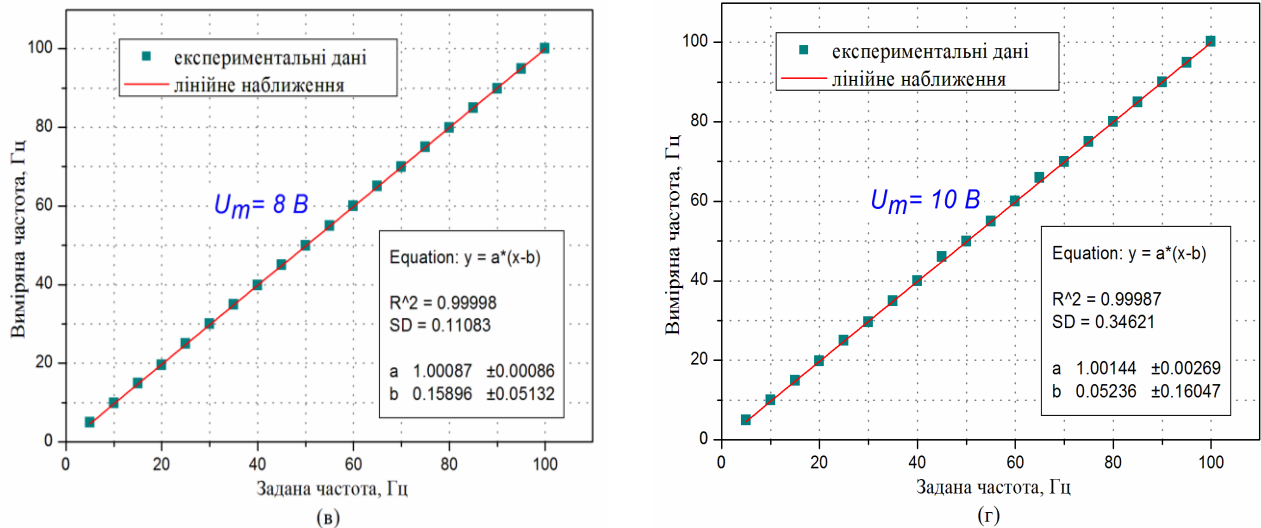
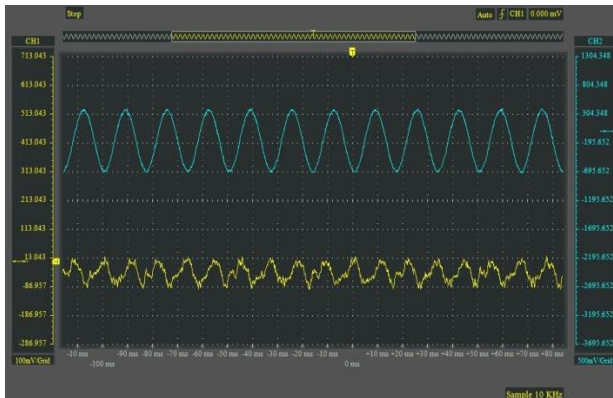


Рис. 4.10. Порівняння виміряного значення частоти вібрації з частотою заданою умовами експерименту при різних значеннях амплітуди сигналу збурення: 4 В (а), 6 В (б), 8 В (в) та 10 В (г)

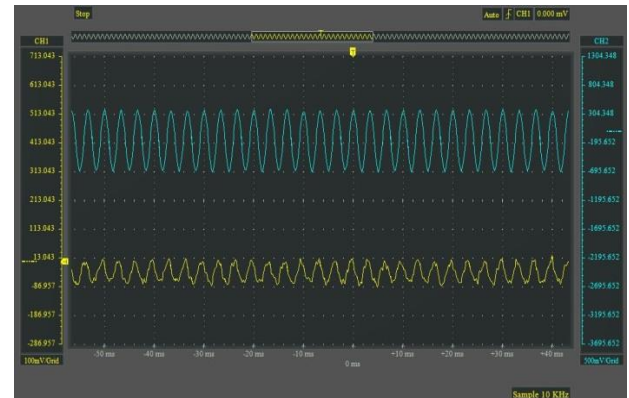
Отримані результати показують, що для всіх трьох значень амплітуди сигналу модуляції вимірне значення частоти вихідного сигналу перетворювача на основі ПОВ добре узгоджується з частотою заданою умовами експерименту. Коефіцієнт регресії при лінійному наближенні результатів вимірювання перевищує значення 0.999 для всіх чотирьох випадків. Максимальне значення середньоквадратичного відхилення результатів вимірювань становить 0.34621 Гц, що свідчить про придатність запропонованого методу для проведення прецизійних вимірювань частоти вібрації волокна викликаної його періодичним зовнішнім збуренням.

Розроблену схему інтерферометричного волоконного перетворювача на основі ПОВ було також протестовано для оцінки можливостей його використання при різних значеннях частоти сигналу збурення. Відгук чутливого елемента інтерферометра на сигнал вібраційного збурення було досліджено для діапазону частот від 10 Гц до 1 кГц. На рис. 4.11. наведено часові залежності вихідного сигналу вимірювального перетворювача при збуренні синусоїдальним сигналом з частотою 30 Гц, 300 Гц, 500 Гц та 1 кГц відповідно. З отриманих осцилограм видно, що синусоїдальний сигнал різної частоти з генератора і сигнал отриманий з фотоприймача добре корелюють між

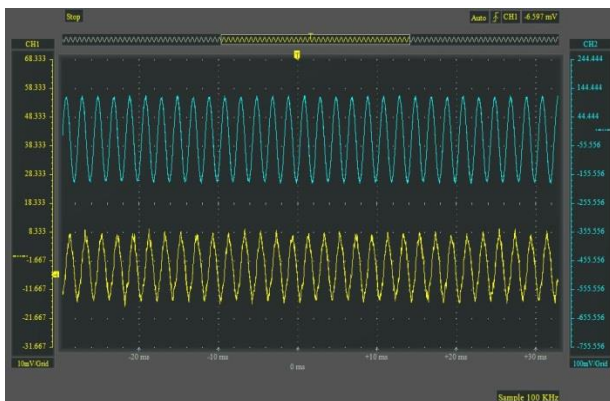
собою (див. рис. 4.11 (а-г)). Сигнал знятий з фотоприймача пропорційним за амплітудою відносно до сигналу збурення та має більше шумових компонент.



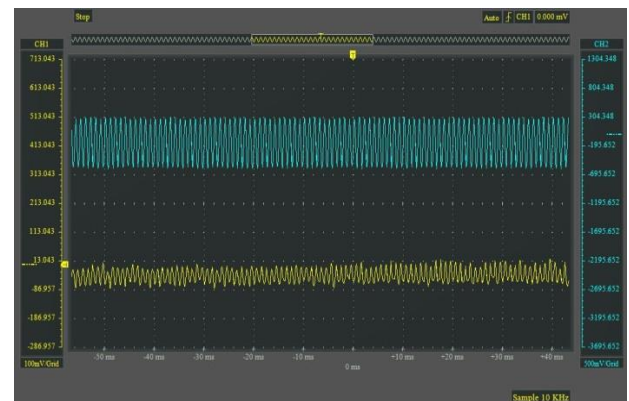
а)



б)



в)



г)

Рис.4.11. Відгук сигналу інтерферометра у відповідь на синусоїдальний сигнал збурення з частотою 30 Гц (а), 300 Гц (б), 500 Гц (в) та 1 кГц (г).

На рис. 4.12. та 4.13 представлені результати експериментальних вимірювань частоти вібрації волокна в діапазоні частот від 50 Гц до 1 кГц та від 1 до 10 кГц відповідно.

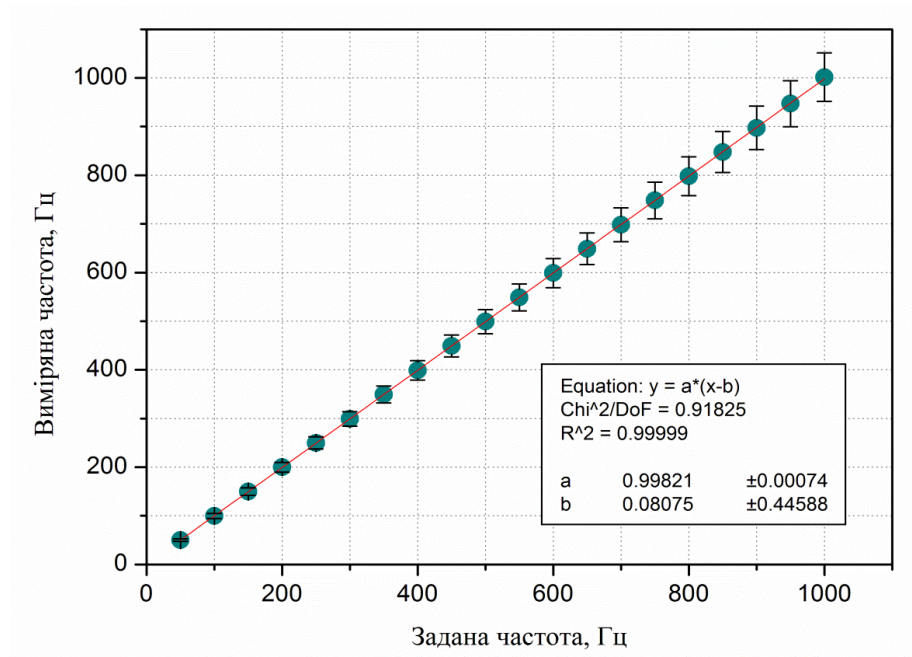


Рис. 4.12. Результати вимірювання частоти вібрації ПОВ в діапазоні 0 - 1 кГц при амплітуді сигналу модуляції 10 В

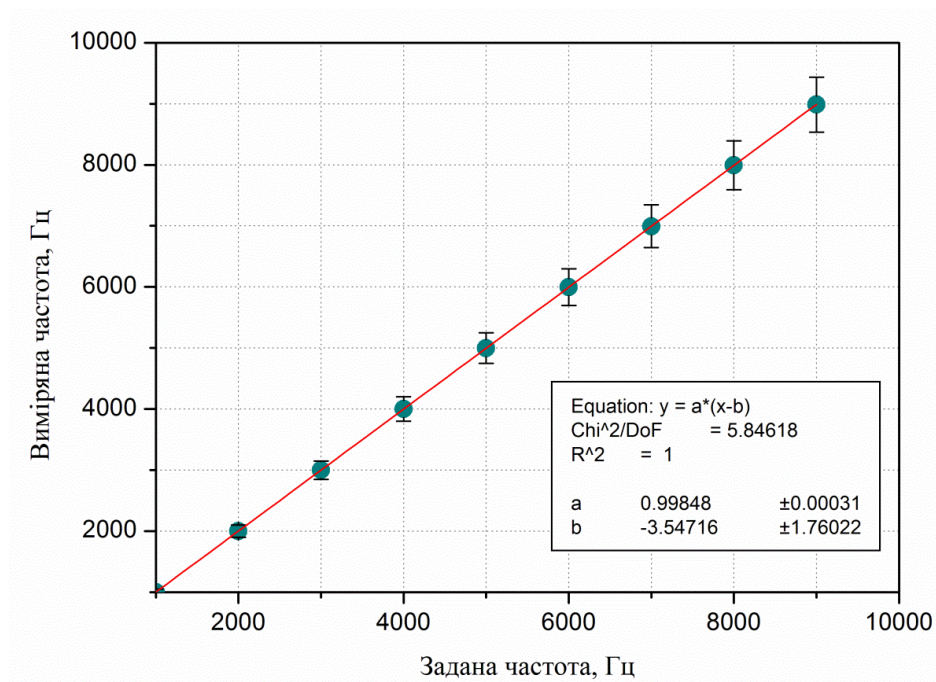


Рис. 4.13. Результати вимірювання частоти вібрації ПОВ в діапазоні 0 – 10 кГц при амплітуді сигналу модуляції 10 В

Відносна похибки результатів вимірювання частоти становить 0.24% для діапазону вимірювань 5 Гц – 1 кГц, що вказує на придатність запропонованого методу для проведення прецизійних вимірювань частоти вібрації волокна викликаній його зовнішнім механічним збуренням.. Для частот сигналу

модуляції більше 10 кГц амплітуда вихідного інформативного сигналу суттєво зменшується і її стає доволі складно розрізнити на фоні власних шумів фотоприймача. Тому, подальші вимірювання частоти вібрації при використанні даного підходу не можуть бути коректно реалізовані.

Для отримання амплітудного відгуку вимірювальної системи, для трьох фіксованих значень частоти сигналу модуляції 30 Гц, 60 Гц та 90 Гц відповідно, було досліджено зміну вихідного сигналу вимірювального перетворювача на основі ПОВ при зміні амплітуди сигналу модуляції в діапазоні від 1 до 10 В. Графічна залежність амплітуди вихідного сигналу в частотній області при зміні амплітуди модуляції в заданому діапазоні для різних значень частоти сигналу модуляції представлена на рис. 4.14 та рис. 4.15.

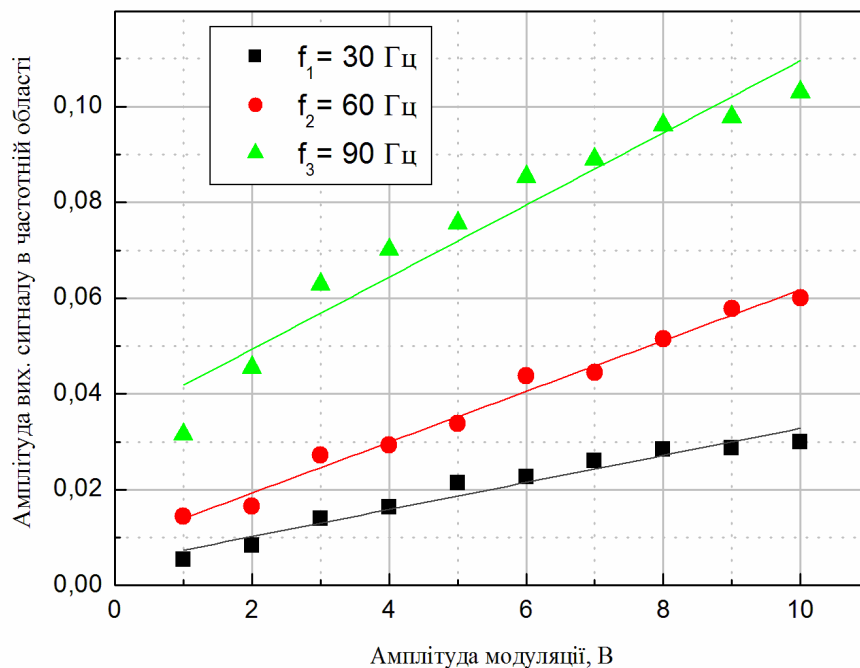


Рис. 4.14. Зміна амплітуди вихідного сигналу сенсора при зміні амплітуди модуляції в діапазоні 0 – 10 В. Частота сигналу модуляції становила 30 Гц, 60 Гц та 90 Гц

Залежності представлені на рис. 4.14. демонструють зміну амплітуди вихідного сигналу сенсора пропорційно до амплітуди сигналу вібрації. З отриманих результатів видно, що при зростанні частоти сигналу модуляції збільшується чутливість вимірювального перетворювача на основі ПОВ.

Вимірювальна система демонструє відгук близький до лінійного в діапазоні зміни амплітуди сигналу модуляції від 1 до 10 В. Для діапазону частот сигналу модуляції від 0 до 100 Гц більшим значенням частоти сигналу збурення відповідають більші значення амплітуди вихідного сигналу вимірювального перетворювача.

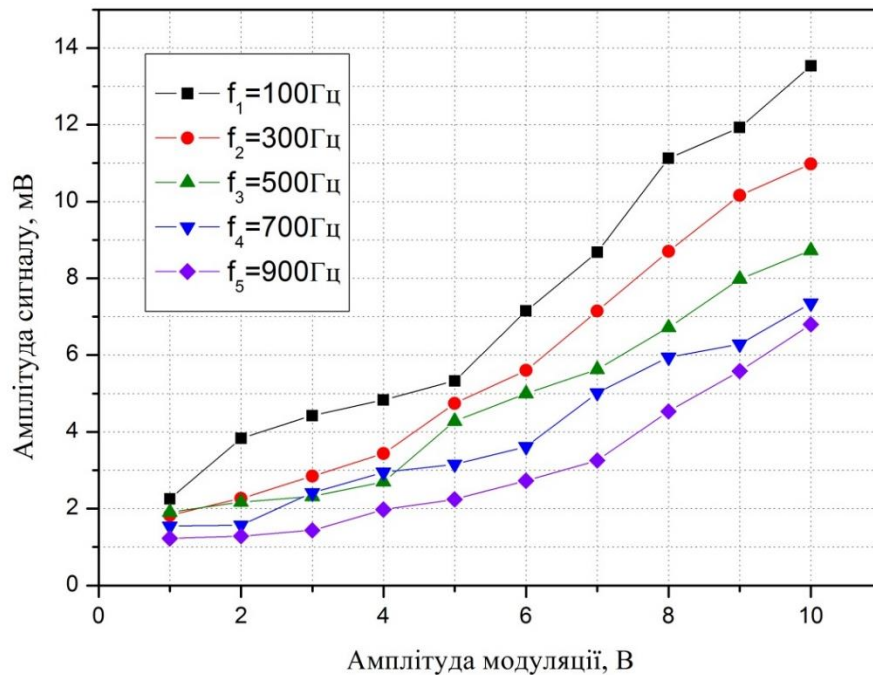


Рис. 4.15. Зміна амплітуди вихідного сигналу в частотній області при зміні амплітуди модуляції в діапазоні 0 – 10 В для різних значень частоти сигналу модуляції.

Для аналізу частотної характеристики чутливого елемента перетворювача вібрації на основі ПОВ, досліджено зміну амплітуди вихідного сигналу в частотній області, у відповідь на зміну частоти сигналу модуляції. На рис 4.16 показано частотний відгук чутливого елемента на основі багатомодового ПОВ при зміні частоти сигналу модуляції в діапазоні від 5 до 100 Гц та фіксованому значенні амплітуди 8 В. Отриманий відгук має лінійну область на проміжку від 5 до 50 Гц, після якої спостерігаються значні флуктуації амплітуди сигналу з максимальним значенням на частоті 90 Гц.



Рис. 4.16. Залежність амплітуди вихідного сигналу багатомодового ПОВ при зміні частоти сигналу зовнішнього збурення волокна до 100 Гц

Аналогічні вимірювання проведені для діапазону частот сигналу модуляції від 50 Гц до 1 кГц представлені на рис. 4.17. Отримана крива має нерегулярний характер зміни, із загальною тенденцією до зменшення амплітуди вихідного сигналу на більших частотах сигналу модуляції. В цьому випадку, можна виділити певні флуктуації амплітуди вихідного сигналу з піковими значеннями на окремих частотах сигналу модуляції.

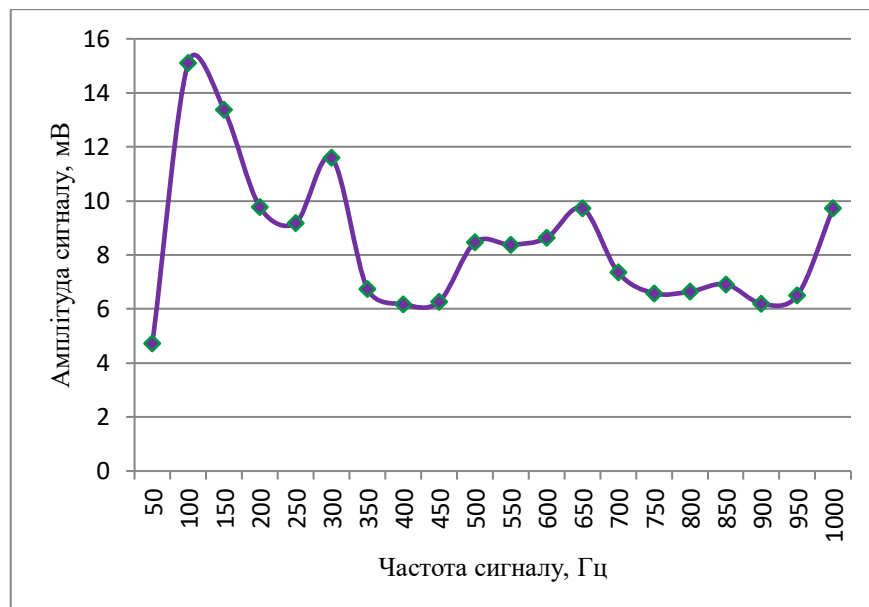


Рис. 4.17. Залежність амплітуди вихідного сигналу багатомодового ПОВ при зміні частоти сигналу зовнішнього збурення волокна до 1 кГц

Таким чином, було запропоновано та експериментально досліджено схему вимірювального перетворювача частоти вібрації та механічних коливань на основі багатомодового ПОВ при збудженні в ньому мод вищих порядків. Чутливий елемент перетворювача може складатись лише з ділянки багатомодового волокна, що дозволяє зменшити розміри пристрою вимірювання та забезпечити високу стійкість до неконтрольованих зовнішніх впливів. Запропонована схема вимірювального перетворювача демонструє хороше узгодження між заданими та виміряними значеннями частоти в діапазоні від 0 до 100 Гц для різних значеннях амплітуди сигналу збурення. Крім того, амплітуда сигналу на виході перетворювача зростає по мірі збільшення амплітуди сигналу збурення і є більшою при більших значеннях частоти сигналу збурення. Використання запропонованої схеми для вимірювань дозволяє створювати дешеві та прості у використанні датчики на основі полімерних волокон, які здатні вимірювати частоту механічних коливань та вібрації в режимі реального часу. Враховуючи механічні властивості ПОВ та простоту схеми вимірювального перетворювача, він може бути вбудований всередину або монтуватись назовні досліджуваних об'єктів забезпечуючи таким чином безперервний моніторинг їх технічного стану.

4.3. Визначення вібраційних характеристик лотка-транспортера за допомогою інтерферометра на полімерному волокні

В даний час актуальним завданням для вібродіагностики технічних об'єктів є забезпечення безперервного контролю їх амплітудних та частотних характеристики в режимі реального часу. У співпраці з кафедрою механіки та автоматики машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» було проведено експериментальне дослідження амплітудно-частотних характеристик вібраційного лотка-транспортера з електромагнітним приводом за допомогою розробленого інтерферометра на полімерному оптичному волокні. Амплітуда коливань вібраційного лотка-транспортера з електромагнітним приводом регулювалась шляхом зміни напруги, що

подається на котушку електромагніта за допомогою лабораторного автотрансформатора. Котушка електромагнітного привода під'єднувалась до мережі змінного струму через лабораторний автотрансформатор, що забезпечував регулювання напруги, яка подається на котушку і, як наслідок, збуджувальної сили та амплітуди коливання лотка. Внаслідок під'єднання котушки (без випрямлячів) до мережі живлення із стандартною частотою 50 Гц, частота робочих коливань лотка-транспортера становила 100 Гц. Вигляд експериментальної установки представлений на рис. 4.18.



Рис. 4.18. Експериментальна установка для дослідження амплітудних та частотних характеристик вібраційного лотка-транспортера з використанням інтерферометра на основі ПОВ

Для чутливого елемента інтерферометра було використано багатомодове полімерне волокно з діаметром серцевини 980 мкм та довжиною 1 м. Ділянка чутливого волокна кріпилась на поверхню лотка таким чином, щоб вібраційні коливання поверхні лотка призводили до просторової модуляції лазерного випромінювання у волокні. Світлове поле на виході волокна потрапляло на фотоприймач із встановленою діафрагмою сигнал з якого подавався на портативний USB осцилограф. Зміна сигналу в часі та його частотний спектр

відображались на екрані монітора ПК спряженого з осцилографом. На рис. 4.19 показано осцилограму вихідного сигналу знятого з інтерферометра, що описує коливання вібраційного лотка транспортера. На рис. 4.20 представлено частотний спектр сигналу інтерферометра, який відповідає частоті вібрації лотка-транспортера рівній 100 Гц. Інтерферометр на основі ПОВ вточності відтворює частоту коливань лотка-транспортера та її гармонічні складові. Значення амплітуди сигналу на основній частоті коливань суттєво перевищує значення амплітуд гармонічних складових отриманого сигналу, що дає змогу ідентифікувати частоту коливань лотка-транспортера. Очікується, що потенціальний частотний відгук інтерферометра може бути значно вищий, що може бути перевірено за допомогою віброустановок із змінною частотою, оскільки досліджуваний лоток створює коливання виключно на частоті 100 Гц. Динамічний діапазон при вимірюванні частоти коливань може бути також розширений за рахунок кращого механічного зв'язку між чутливим елементом інтерферометра та досліджуваною структурою.

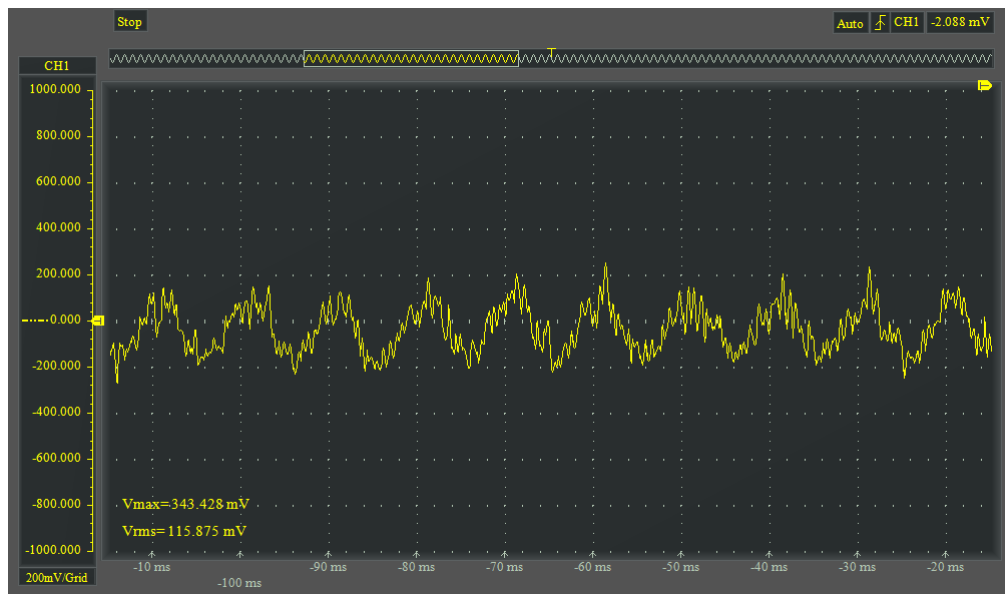


Рис. 4.19. Сигнал вібрації лотка-транспортера отриманий за допомогою інтерферометра на основі ПОВ



Рис. 4.20. Спектр вихідного сигналу інтерферометра встановленого на поверхні лотка-транспортера з частотою вібрації 100 Гц

Наступним кроком було дослідження реєстрації зміни амплітуди коливань лотка-транспортера при зміні сигналу збурення. Виміряні середні значення амплітуди вихідного сигналу інтерферометра, що відповідають чотирьом різним значенням амплітуди вібрації досліджуваного лотка представлені на рис. 4.20.

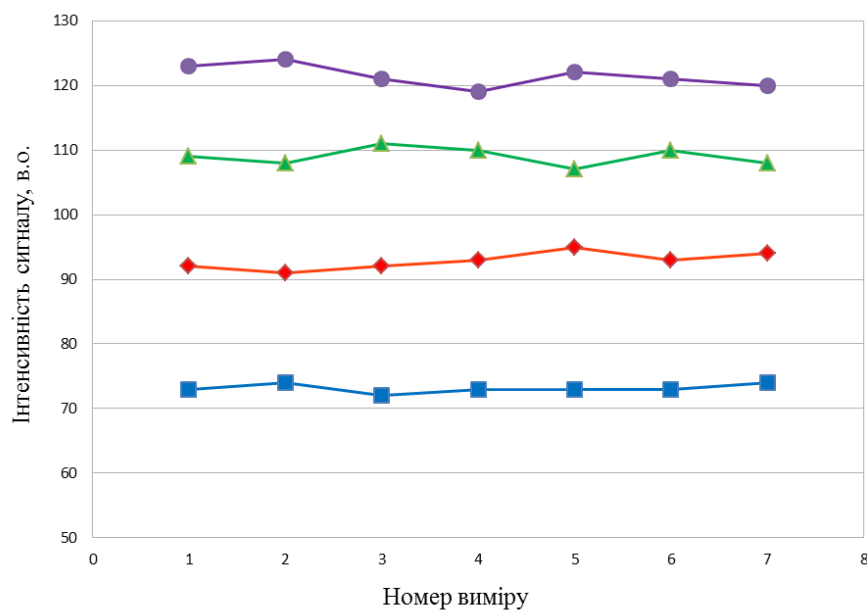


Рис.4.21. Рівні інтенсивності вихідного сигналу інтерферометра на основі ПОВ для різних значень амплітуди вібрації лотка-транспортера.

Фактичні значення амплітуди коливань лотка отримувались на основі даних попередньо побудованої тарувальної таблиці, яка пов'язує значення напруги на автотрансформаторі із відповідним значенням повздовжньої складової амплітуди коливань лотка при його вібрації. Можна побачити, що більші середні значення амплітуди сигналу інтерферометра відповідають більшим значенням амплітуди вібрації досліджуваного об'єкта.

На рис. 4.22. показані залежності зміни інтенсивності вихідного сигналу вимірювального перетворювача на основі ПОВ і повздовжньої складової амплітуди коливань лотка-транспортера, які отримані з використанням розробленої методики.

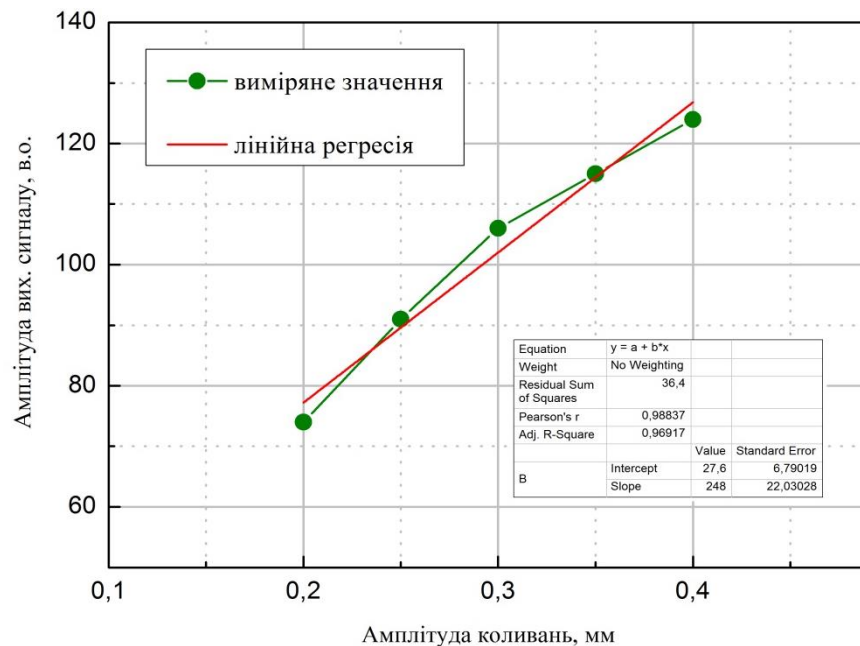


Рис. 4.22. Зміна інтенсивності сигналу вимірювального перетворювача на основі ПОВ при різних значеннях амплітуди коливань лотка-транспортера

Підсумувавши отримані результати, можна зазначити, що за допомогою розробленої методики для вимірювання та інтерпретації вихідного сигналу вимірювального перетворювача на базі ПОВ можна проводити контроль амплітуди вібрації лотка-транспортера з величиною до 0.1 мм, що дозволяє чітко відрізняти відмінності переданого сигналу вібрації різної амплітуди. Отримані результати, представлені на рис.4.21 свідчать також про можливість

використання волоконно-оптичного інтерферометра на багатомодовому волокні для тривалого контролю амплітуди вібрації технічних об'єктів. Волоконно-оптичний вимірювальний перетворювач на базі ПОВ здатний забезпечити контроль амплітуди та частоти механічних вібрацій об'єктів в режимі реального часу. Основною проблемою при вимірюванні амплітуди коливань було потрапляння зовнішнього випромінювання на чутливу ділянку фотоприймача, що могло призводити до підвищення величини складової шуму вихідного сигналу вимірювальної системи. Такий недолік може бути усунутий, якщо помістити фотоприймач у окремий закритий корпус, що дасть змогу усунути попадання зовнішнього випромінювання на фотоприймач.

Висновки до розділу 4

1. Запропонований у роботі метод опрацювання сигналів інтерферометра на багатомодовому волокні може бути використаний для побудови волоконних перетворювачів та давачів контролю деформаційного стану конструктивних елементів та матеріалів при деформаціях зразка визначеного діапазону. Такий волоконний перетворювач може бути легко інтегрований в досліджуваний об'єкт, що дає змогу створювати сенсорні підсистеми, в тому числі, інтернету речей, для моніторингу напружено-деформованого стану композитних матеріалів та елементів конструкцій складної форми під дією зовнішніх навантажень чи збурень.

2. Запропоновано та експериментально досліджено схему волоконно-оптичного вимірювального перетворювача частоти вібрації та механічних коливань з використанням багатомодового ПОВ при збудженні в ньому мод вищих порядків. Чутливий елемент перетворювача може складатись виключно з ділянки полімерного волокна, що дозволяє зменшити його розміри та забезпечує високу стійкість до неконтрольованих зовнішніх впливів. Запропонована схема вимірювального перетворювача демонструє хороше

узгодження між заданими та вимірними значеннями частоти при різних величинах амплітуди сигналу збурення. Використання такої схеми дозволяє створювати малогабаритні та прості у використанні датчики на основі полімерних волокон, які здатні здійснювати вимірювання та контроль частоти механічних коливань та вібрації в режимі реального часу. Враховуючи механічні властивості ПОВ та відносну простоту схеми вимірювального перетворювача, він може бути вбудований всередину або монтуватись назовні досліджуваних об'єктів забезпечуючи в такий спосіб безперервний моніторинг їх вібраційного стану.

ВИСНОВКИ

В останні роки, внаслідок широкого використання оптоволоконних елементів в оптичних системах передачі та обробки інформації, а також у перетворювачах і давачах фізичних полів, актуальною постає задача створення та всебічного дослідження нових схем сенсорів та вимірювальних перетворювачів на основі оптичних волокон.

У дисертаційній роботі проведено теоретичне узагальнення основних фізичних властивостей спекл-структур, які формуються на виході багатомодових оптичних волокон внаслідок міжмодової інтерференції, з точки зору їх можливого використання в якості інформативного параметру для вибраних метрологічних застосувань.

Запропоновано новий підхід до розв'язання науково-прикладної задачі розробки волоконно-оптичних сенсорів та вимірювальних перетворювачів механічних величин на базі багатомодових полімерних оптичних волокон, та їх застосування для побудови інтерферометричних вимірювальних систем контролю та діагностики напружено-деформованого стану елементів інженерно-технічних об'єктів, що може розширити сучасний метрологічний інструментарій у вимірюванні механічних величин з використанням волоконно-оптичних пристроїв передачі та перетворення інформативного сигналу. В дисертаційній роботі отримано та обґрунтовано такі основні наукові та практичні результати:

1. На основі проведеного аналізу існуючих вимірювальних методик та схем волоконно-оптичних інтерферометричних сенсорів та перетворювачів на базі багатомодових волокон, обґрунтовано доцільність використання явища міжмодової інтерференції в багатомодових полімерних волокнах для побудови волоконно-оптичних вимірювальних пристроїв та перетворювачів деформації і частоти механічних коливань.

2. Проведено теоретичне узагальнення особливостей опрацювання інформативного сигналу інтерферометра, отриманого внаслідок міжмодової інтерференції світлових хвиль у полімерному оптичному волокні при цифровій реєстрації спекл-картини випромінювання. Розроблено структурні схеми інтерферометричних перетворювачів деформації та частоти механічних коливань на базі багатомодових полімерних оптичних волокон, які працюють на явищі інтерференції між модами у волокні.

3. На основі досліджень залежності коефіцієнта кореляції спекл-сигналів від видовження полімерного волокна при його деформації розроблено та експериментально досліджено метод для вимірювання зміни деформаційного стану оптичного волокна, який ґрунтується на обчисленні коефіцієнта кореляції між матрицями інтенсивностей поточного та опорного спекл-сигналів, отриманих на виході багатомодового волокна. Даний метод дозволяє проводити вимірювання поздовжньої деформації волокна з відносною похибкою що не перевищує 5% для діапазону вимірювань 0 – 50 мкм та може бути застосований для оперативного аналізу деформацій та переміщень технічних об'єктів, у тому числі для перманентного контролю динаміки цих процесів у часі.

4. В результаті досліджень механізму модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних волокнах запропоновано та експериментально досліджено схему вимірювального перетворювача частоти вібрації та механічних коливань на основі багатомодового ПОВ при збудженні в ньому мод вищих порядків; підтверджено лінійність характеристики вимірювального перетворювача для діапазону частоти механічних коливань до 10 кГц з відносною похибкою що не перевищує 0.3%.

5. Наведено приклади практичного застосування розроблених у роботі методів для вимірювання параметрів деформації та вібрації, які доводять доцільність їх використання для вимірювання та контролю напружено-деформованого стану технічних об'єктів та матеріалів з можливістю

інтегрування чутливого елемента волоконно-оптичного перетворювача в досліджуваний зразок.

Таким чином, застосування представлених у роботі схем волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів створює нові можливості для побудови компактних інформаційно-вимірювальні приладів та сенсорних підсистем. Зокрема, проведені в роботі дослідження щодо опрацювання та інтерпретації сигналів вимірювальних перетворювачів на багатомодових полімерних волокнах можуть слугувати фундаментом для створення контрольних вимірювальних приладів, призначених для дослідження різних фізичних полів а також контролю та діагностики технічного стану природних і техногенних об'єктів. Враховуючи механічні властивості чутливих елементів на базі полімерних оптичних волокон, їх здатність до мультиплексування та створення протяжних каналів для передачі інформативного сигналу, відкриваються перспективи для створення розподілених вимірювальних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Окоси. Т. Волоконно-оптические датчики / [Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, К. Кюма, К. Хататэ;] // Под. ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомизд. Ленинград – 1990. – 256 с.
2. Weihs G. et al. All-fiber three-path Mach–Zehnder interferometer // Optics letters. – 1996. – Т. 21. – №. 4. – С. 302-304.
3. Shizhuo Y. Fiber optic sensors. Second edition / [Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S. Yu.] // – New York : Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
4. L. Bilro, N. Alberto, J.L. Pinto and R. Nogueira, “Optical Sensors Based on Plastic Fibers” Sensors, Vol. 12, pp. 12184-12207, Sept. 2012.
5. S.H. Law, M.A. van Eijkelenborg, G.W. Barton, C. Yan, R. Lwin and J. Gan, “Cleaved end-face quality of microstructured polymer optical fibres” Opt. Commun., pp. 513-520, 2006.
6. K. Peters, "Polymer optical fiber sensors – a review" Smart Materials and Structures, vol.20, no.1, pp. 338-346, Dec. 2011.
7. R.J. Bartlett, R.P. Chandy, P. Eldridge, D.F. Merchant, R. Morgan and P.J. Scully “Plastic optical fibre sensors and devices” Trans. Instrum. Meas. Control, Vol. 22, pp. 431–457, 2000.
8. M. Komachiya, R. Minamitani, T. Fumino, T. Sakaguchi, and S. Watanabe, “Proof-testing and probabilistic lifetime estimation of glass fibers for sensor applications”, Appl. Opt. Vol. 38, pp. 2767-2774, May1999.
9. M.C.J. Large, J. Moran, L. Ye, “The role of viscoelastic properties in strain testing using microstructured polymer optical fibres (mPOF)” Meas. Sci. Technol., Vol.20, No.3, pp. 4014-4020, 2009.
10. G.D. Peng, P.L. Chu, “Polymer Optical Fibre Sensing” Proc. SPIE, Vol. 4929, pp. 303-311, Sept. 2002.
11. M. Silva-Lopez, A. Fender, W.N. MacPherson, J.S Barton, J. D.C. Jones, D. Zhao, H. Dobb, D.J. Webb, L. Zhang and I. Bennion, “Strain and temperature

sensitivity of a single-mode polymer optical fiber” *Optics Letters*, Vol. 30, No. 23, pp. 3129-3131, Dec. 2005.

12. J.M. Cariou, J. Dugas, L. Martin, and P. Michel, “Refractive-index variations with temperature of PMMA and polycarbonate” *Applied Optics*, Vol. 25, Issue 3, pp. 334-336, 1986.

13. J. Brandrup, E.H. Immergut, and E.A. Grulke, “*Polymer Handbook*”, 4th edition. John Wiley & Sons, Inc., 1999, – 2366 p.

14. B. J. White, J. P. Davis, L. C. Bobb, H. D. Krumboltz, and D. C. Larson, “Optical-fiber thermal modulator,” *Lightwave Technol.* Vol. 5, Issue 9, pp. 1169–1175, Sept. 1987.

15. A. Bertholds and R. Dandliker, “Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibres”, *Lightwave Technol.* Vol.6, Issue 1, pp. 17-20, Jan. 1988.

16. S. Kiesel, K. Peters, T. Hassan, and M. Kowalsky, “Large Deformation In-Fiber Polymer Optical Fiber Sensor”, *Photonics Technology Letters, IEEE* Vol.20, Issue 6, pp.416-418, Mar. 2008.

17. A. Bertholds and R. Dandliker, “Deformation of single-mode optical fibers under static longitudinal stress,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 5, pp. 895-900, 1987.

18. C. Jiang, M.G. Kuzyk, J.L. Ding, W.E Johns and D.J. Welker, “Fabrication and mechanical behavior of dye-doped polymer optical fiber” *Journal of Applied Physics*, Vol.92, No.4, pp. 4–12, 2002.

19. D. X. Yang, J. Yu, X. Tao and H. Tam “Structural and mechanical properties of polymeric optical fiber” *Materials Science and Engineering*, A364, pp. 256–259, 2004.

20. S. Kiesel, K. Peters, T. Hassan and M. Kowalsky, “Behaviour of intrinsic polymer optical fibre sensor for large-strain applications” *Meas. Sci. Technol.* Vol. 18, pp. 3144-3154, Sept. 2007.

21. Kiesel, K. Peters, T. Hassan and M. Kowalsky, “Calibration of a single-mode polymer optical fiber large-strain sensor”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 3, pp. 4016-4023, Feb. 2009.
22. O. Abdi, K. Peters, M. Kowalsky, T. Hassan, “Validation of a single-mode polymer optical fiber sensor and interrogator for large strain measurements”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 22, No. 7, pp. 5207-5217, Jun. 2011.
23. D. Gallego, H. Lamela, “High sensitivity interferometric polymer optical fiber ultrasound sensors for optoacoustic imaging and biomedical application”, *Optics Letters*, Vol. 34, No. 12, pp.1807-1809, Jun. 2009.
24. D. Gallego, D. Sáez-Rodríguez, D. Webb, O. Bang, H. Lamela, “Interferometric microstructured polymer optical fiber ultrasound sensor for optoacoustic endoscopic imaging in biomedical applications”, *Proc. SPIE*, Vol. 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, June 2, 2014.
25. De Vries, M.; Arya, V.; Meller, S.; Masri, S.F.; Claus, R.O. Implementation of EFPI-based optical-fiber sensor instrumentation for the NDE of concrete structures. *Cement. Concrete Commun.* **1997**, 19, 69–79.
26. Valis, T.; Hogg, D.; Measures, R.M. Fiber optic Fabry-Perot strain gauge. *IEEE Photon. Tech. Lett.* 1990, 2, 227–228.
27. Quirion M., Ballivy G. Concrete strain monitoring with Fabry-Perot fiber-optic sensor // *Journal of materials in civil engineering*. – 2000. – T. 12. – №. 3. – C. 254-261.
28. Zhang Q. et al. All-fiber vibration sensor based on a Fabry-Perot interferometer and a microstructure beam // *JOSA B*. – 2013. – T. 30. – №. 5. – C. 1211-1215.
29. Kim D. H., Han J. H., Lee I. Vibration measurement and flutter suppression using patch-type EFPI sensor system // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. – 2005. – T. 6. – №. 1. – C. 17-26.

30. Rees N. D. et al. Submicrometer fiber-optic Fabry–Perot interferometer formed by use of the Langmuir–Blodgett technique //Optics letters. – 2001. – Т. 26. – №. 23. – С. 1840-1842.
31. Jia P. G., Wang D. H. Self-calibrated non-contact fibre-optic Fabry–Perot interferometric vibration displacement sensor system using laser emission frequency modulated phase generated carrier demodulation scheme //Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 23. – №. 11. – С. 115201.
32. Zhang Q. et al. All-fiber vibration sensor based on a Fabry–Perot interferometer and a microstructure beam //JOSA B. – 2013. – Т. 30. – №. 5. – С. 1211-1215.
33. Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Часть 1. Волоконно-оптические интерферометры. / Лиокумович Л.Б. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 110 с.
34. Kondrat M. et al. Modal interference fiber optic sensor //Proc. SPIE. – 2004. – Т. 5611. – С. 225-232.
35. Lujo I. et al. Measuring structural vibrations with a multimode fiber optical sensor //Applied Electromagnetics and Communications, ICECom 2007. 19th International Conference – IEEE, 2007. – С. 1-4.
36. Gupta B., Bhargaw H. N., Sardana H. K. Qualifying fibre optic temperature sensor using speckle metrology //Int. Inf. Technol. Knowl. Manage. – 2008. – Т. 1. – №. 2. – С. 337-350.
37. Francis T. S. et al. Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields //Applied optics. – 1993. – Т. 32. – № 25. – С. 4685-4689.
38. Pan K. et al. Multimode fiber sensing by using mean-absolute speckle-intensity variation //Applied optics. – 1994. – Т. 33. – №. 10. – С. 2095-2098.
39. Cerecedo-Núñez H. H. et al. Optical fiber characterization for its implementation in speckle pattern interferometry //Sixth Symposium Optics in

Industry. – International Society for Optics and Photonics, 2007. – C. 64220M-64220M-6.

40. Gomez J. A., Lorduy H., Salazar A. Improvement of the dynamic range of a fiber specklegram sensor based on volume speckle recording in photorefractive materials // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2011. – T. 49. – № 3. – C. 473-480.

41. Gomez J. A., Salazar A. Self-correlation fiber specklegram sensor using volume characteristics of speckle patterns // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2012. – T. 50. – № 5. – C. 812-815.

42. Lomer Barboza M. M. et al. Measurement of displacement in the micrometer range using speckle pattern correlation in multimode fibers. – SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2013.

43. Rodriguez-Cobo L. et al. Optical fiber strain sensor with extended dynamic range based on specklegrams // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2013. – T. 203. – C. 341-345.

44. Rao, P. Vengal, et al. Multimode fused coupler fiber optic pressure sensor. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP, 2011. p. 450-452.

45. Lomer M. et al. Interference of speckle patterns projected by multimode fibers // *SPECKLE 2015: VI International Conference on Speckle Metrology*. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – T. 9660. – C. 96601S.

46. Bottacchi, Stefano. *Noise and signal interference in optical fiber transmission systems: an optimum design approach*. John Wiley & Sons, 2008.

47. Doya, Valérie, et al. "Speckle statistics in a chaotic multimode fiber." *Physical Review E* 65.5 (2002): 056223.

48. Kang, Yong Hoon, Ki Hyun Kim, and Byoung-ho Lee. "Angular and speckle multiplexing of photorefractive holograms by use of fiber speckle patterns." *Applied optics* 37.29 (1998): 6969-6972.

49. Takai, Nobukatsu, and Toshimitsu Asakura. "Statistical properties of laser speckles produced under illumination from a multimode optical fiber." *JOSA A* 2.8 (1985): 1282-1290.
50. Valley, George C., George A. Sefler, and T. Justin Shaw. "Multimode waveguide speckle patterns for compressive sensing." *Optics letters* 41.11 (2016): 2529-2532.
51. B. Redding et.al., "All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction", *Optics. Express*, vol. 21, Issue 5, pp. 6584-6600, Mar. 2013.
52. J.W. Goodman. "Speckle in certain nonimaging applications" in *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*, USA: Roberts & Co., 2007, ch.7, pp. 235-270
53. H. S. Efendioglu, "A review of fiber-optic modal modulated sensors: Specklegram and modal power distribution sensing," *IEEE Sensors Journal*, 17(7), 2055-2064, 2017.
54. V. Varyshchuk, Ya. Bobotski, (2015). Correlation Processing of Speckle Pattern in Multimode Polymer Optical Fiber for Deformation Monitoring in Nanometer Range. In O. Fesenko, L. Yatsenko (Ed.), *Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies*, pp. 329 – 338.
55. Schmid, P., and W. Stephan. "Lasers. Characterization of Laser Diodes by Measuring the Speckle Contrast at the End of a Multimode Fiber." *Journal of optical communications* 5.1 (1984): 32-36.
56. Ha, Woosung, et al. "Acousto-optic control of speckle contrast in multimode fibers with a cylindrical piezoelectric transducer oscillating in the radial direction." *Optics express* 17.20 (2009): 17536-17546.
57. Redding, Brandon, Sebastien M. Popoff, and Hui Cao. "All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction." *Optics express* 21.5 (2013): 6584-6600.

58. Rodriguez-Cobo, Luis, Mauro Lomer, and Jose-Miguel Lopez-Higuera. "Fiber specklegram-multiplexed sensor." *Journal of Lightwave Technology* 33.12 (2015): 2591-2597.
59. Муравський, Л. І. "Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів." К.: Вид-во" Наук. думка (2010).
60. Кульчин, Ю. Н., Витрик, О. Б., Камшилин, А. А., & Ромашко, Р. В. (2009). *Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей*. М.: Физматлит.
61. Варищук В.І., Бобицький Я.В. Контроль малих деформацій багатомодового полімерного волокна шляхом аналізу спекл-картин на його виході. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» *Радіоелектроніка та телекомунікації*. — 2014. – №796 – С. 243-248.
62. Grattan, L. S., and B. T. Meggitt, eds. *Optical fiber sensor technology: Advanced applications-Bragg gratings and distributed sensors*. Springer Science & Business Media, 2013.
63. V. Varyshchuk, Y. Bobitski, H. Poisel, Deformation sensing with multimode POF using speckle correlation processing method // *Opto-Electronics Review* 25(1), 2017, P. 19-23.
64. Kaufmann, Guillermo H., ed. *Advances in speckle metrology and related techniques*. John Wiley & Sons, 2011.
65. Петровська Г.А. Дослідження оптичних волокон методом цифрової голографічної інтерферометрії. / Г.А. Петровська, В.І. Варищук, В.М. Фітьо. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» *Радіоелектроніка та телекомунікації*. — 2014. – №796 – С. 249-253.
66. Suhail, SI Mohamed, et al. "Vision based system for surface roughness characterisation of milled surfaces using speckle line images." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 402. No. 1. IOP Publishing, 2018.

67. Balamurugan, R., et al. "Laser Speckle Decorrelation Technique for In-plane Deformation Measurement." *Lasers in Engineering* (Old City Publishing) 39 (2018).
68. Winzer, Peter J., and Walter R. Leeb. "Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar." *Optics letters* 23.13 (1998): 986-988.
69. .Муравський Л.І., Вороняк Т.І., Кметь А.Б. Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики / *Наук. ред. акад. НАН України З.Т. Назарчук. – Львів: СПОЛОМ, 2014. – 272 с.*
70. Spillman, W. B., Kline, B. R., Maurice, L. B., & Fuhr, P. L. Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses. *Applied optics*, 28(15), 1989, 3166-3176.
71. Snyder, Allan W., and John Love. *Optical waveguide theory*. Springer Science & Business Media, 2012.
72. WU, Shudong; YIN, Shizhou; FRANCIS, T. S. Sensing with fiber specklegrams. *Applied optics*, 1991, 30.31: 4468-4470.
73. Edwards, Alex T. Comparison of strain gage and fiber optic sensors on a sting balance in a supersonic wind tunnel. *Diss. Virginia Tech*, 2000.
74. Максименко О.П. Застосування методу цифрової кореляції зображень для вимірюванні деформацій балкових зразків / О.П. Максименко, Л.Ф. Франкевич, О.М. Сахарук, А.Р. Дрималик // *Відбір і обробка інформації. – 2011. – Вип. 35 (111). – С. 102–108.*
75. Квасніков В. П. Шляхи підвищення точності вимірювання деформації та механічних напружень / В. П. Квасніков, Т. І. Ганєва // *Метрологія та прилади. – Київ, 2015. - № 6. – С. 15-18*
76. Li, Hong-Nan, Dong-Sheng Li, and Gang-Bing Song. "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering." *Engineering structures* 26.11 (2004): 1647-1657.

77. Barrias, António, Joan Casas, and Sergi Villalba. "A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications." *Sensors* 16.5 (2016): 748.

78. Liu, Xin, et al. "Distributed fiber-optic sensors for vibration detection." *Sensors* 16.8 (2016): 1164.

79. Варишук В.І. Дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод. / В. І. Варишук, В. Я. Татарин, Я. В. Бобицький // Східно-Європейський журнал передових технологій – 2014. – № 6(9) – С. 17-22.

80. V.I. Varyshchuk, V.Y. Tatoryn, Y.V. Bobitski, "Polymer optical fiber vibration measuring based on speckle phenomena" Proc. of the X International Conference Electronics and Applied physics, Kyiv, Ukraine, October 22 – 25, 2014, P. 11 – 12

81. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. Algorithm for automated diagnosis of object technical state with multimode fiber sensor. In: Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 IEEE First Ukraine Conference on. IEEE, 2017. p. 744-747.

82. García, Iker, et al. "Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring." *Sensors* 15.7 (2015): 15494-15519.

83. Putha K., Dantala D., Padmavanthi M. Study on intensity modulated POF vibration sensors //Seventh International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2019). – International Society for Optics and Photonics, 2019. – T. 11205. – С. 112050W.

84. Zhang Z. et al. Research Progress of Fiber Grating Vibration Sensor //2017 5th International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology (FMSMT 2017). – Atlantis Press, 2017. – С. 686-695.

85. Reis F. M. et al. Structural health monitoring suitable for airborne components using the speckle pattern in plastic optical fibers //IEEE Sensors Journal. – 2017. – T. 17. – №. 15. – С. 4791-4796.

Додаток А. Акти впровадження результатів дисертації

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор
науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
Давидчак О.Р.
2021р.

АКТ

про використання результатів дисертації асистента
Варищука Василя Ігоровича «Інтерферометр на полімерному оптичному волокні
як перетворювач для вимірювання механічних величин» представленої на
здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
у навчальному процесі кафедри фотоніки

Комісія у складі зав.кафедри фотоніки д.т.н., проф. Бобицького Я.В.,
д.ф.-м.н., проф. Фітьо В.М., д.т.н., доц. Яремчук І.Я. та ст.викладача ЗВО
Петровської Г.А. склала даний акт про те, що результати дисертації асистента
Варищука В.І. «Інтерферометр на полімерному оптичному волокні як
перетворювач для вимірювання механічних величин» використано у навчальному
процесі кафедри фотоніки.

Зокрема, модернізовано лабораторний практикум для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка» з дисципліни «Фотонні інформаційні та
енергетичні системи», в якому використано результати досліджень, щодо
модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних оптичних
волокнах при селективному збудженні мод та його застосування для побудови
структурних та функціональних схем волоконно-оптичних вимірювальних
перетворювачів частоти вібрації та механічних коливань.

Голова комісії
завідувач кафедри фотоніки
д.т.н., проф.

Бобицький Я.В.

Члени комісії:
д.ф.-м.н., проф.

Фітьо В.М.

д.т.н., доц.

Яремчук І.Я.

ст.викладач ЗВО

Петровська Г.А.



АКТ

про використання результатів дисертації асистента

Варищука Василя Ігоровича «Інтерферометр на полімерному оптичному волокні як перетворювач для вимірювання механічних величин» представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук при виконанні науково-дослідної роботи ДБ/Тектон кафедри фотоніки Національного університету «Львівська політехніка»

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини д.т.н. Небесного Р.В., завідувача кафедри фотоніки, д.т.н., проф. Бобицького Я.В., завідувачки відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Лазько Г.В. та начальниці планово-фінансової групи Чулой Т.М. цим актом підтверджують, що результати дисертації асистента Варищука В. І. «Інтерферометр на полімерному оптичному волокні як перетворювач для вимірювання механічних величин» використано при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи ДБ/Тектон «Архітектура мікро- та наноструктур в умовах оптичної дифракції та плазмонного резонансу для потреб сучасної фотоніки», № державної реєстрації 0115U000427.- ----

В результаті досліджень, виконаних асистентом Варищуком В. І.

- проведено обґрунтування особливостей реєстрації інформативного сигналу інтерферометра на полімерному оптичному волокні, який працює на явищі міжмодової інтерференції випромінювання;
- розроблено структурні та функціональні схем волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів деформації;
- проведено дослідження механізму модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних волокнах при збудженні мод вищих порядків;

Голова комісії,
 Начальник НДЧ, д.т.н.

Небесний Р.В.

Члени комісії:
 Завідувач кафедри фотоніки,
 д.т.н., проф.

Бобицький Я.В.

Завідувачка відділу науково-організаційного
 супроводу наукових досліджень, к.т.н.

Лазько Г.В.

Начальниця планово-фінансової групи

Чулой Т.М.

Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Варищук В.І. Контроль малих деформацій багатомодового полімерного волокна шляхом аналізу спекл-картин на його виході. / В.І. Варищук, Я.В. Бобицький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації. — 2014. — №796 — С. 243-248. *Особистий внесок здобувача: розробка методу прямого кореляційного порівняння спекл-структур для вимірювання та контролю параметрів деформації.*

2. Петровська Г.А. Дослідження оптичних волокон методом цифрової голографічної інтерферометрії. / Г.А. Петровська, В.І. Варищук, В.М. Фітьо. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації. — 2014. — №796 — С. 249-253. *Особистий внесок здобувача: розробка методики для дослідження розподілу показника заломлення в оптичних волокнах методом цифрової голографічної інтерферометрії.*

3. Варищук В.І. Дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод. / В. І. Варищук, В. Я. Татарин, Я. В. Бобицький // Східно-Європейський журнал передових технологій — 2014. — № 6(9) — С. 17-22. *Особистий внесок здобувача: експериментальне дослідження механізму модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних оптичних волокнах при селективному збудженні мод.*

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

4. V. Varyshchuk, Y. Bobitski, H. Poisel. Multimode polymer fiber strain gauge based on speckle correlation, Int. J. Microelectron. Comput. Sci., Vol.5, No3, 2014, pp. 111-115. *Особистий внесок здобувача: дослідження та обґрунтування можливості використання інтерферометра на полімерному волокні як перетворювача для вимірювання деформації.*

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science:

5. V. Varyshchuk, Ya. Bobotski, (2015). Correlation Processing of Speckle Pattern in Multimode Polymer Optical Fiber for Deformation Monitoring in

Nanometer Range. In O. Fesenko, L. Yatsenko (Ed.), *Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies* (pp. 329 – 338). Springer International Publishing. *Особистий внесок здобувача: реєстрація та опрацювання спекл-інтерферограм цифровим матричним сенсором.*

6. V. Varyshchuk, Y. Bobitski, H. Poisel, Deformation sensing with multimode POF using speckle correlation processing method // *Opto-Electronics Review* 25(1), 2017, P. 19-23. *Особистий внесок здобувача: вимірювання параметрів деформації волокна з використанням методу кореляційного аналізу спекл-сигналів.*

***Праці опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та
всеукраїнських конференцій:***

7. V. Varyshchuk, H. Poisel, Y. Bobitski. “Polymer Optical Fiber Based Strain Sensor” Proc. of XII international conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, Lviv-Slavske, February 25 – March 1, 2014, P. 314-316. *Особистий внесок здобувача: дослідження зміни параметрів деформації об'єкта з вбудованим давачем на основі полімерного волокна.*

8. Варищук В.І. «Алгоритм кореляційного аналізу спекл-картин на виході багатомодових полімерних волокон при використанні в системах томографічного типу» матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Інформаційні та моделюючі технології», Черкаси, 29-31 травня 2014 р., С. 105. *Особистий внесок здобувача: запропоновано топологію виміральної системи на базі масиву полімерних волокон.*

9. V. Varyshchuk, Y. Bobitski, H. Poisel. “Using a multimode polymer optical fiber as a high sensitivity strain sensor”, Proc. of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES), Lublin, Poland, June 19 – 21, 2014, P. 464 – 467. *Особистий внесок здобувача: оцінка метрологічних характеристик перетворювача деформації на полімерному оптичному волокні.*

10. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. “Correlation processing of speckle pattern in multimode polymer optical fiber for deformation monitoring in nanometer range” International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials (NANO 2014), Lviv, Ukraine, August 27-30, 2014, P. 485. *Особистий внесок*

здобувача: обґрунтовано особливості цифрової реєстрації спекл-структур для їх кореляційного порівняння.

11. В.І. Варищук, Я.В. Бобицький. «Метод кореляційної обробки сигналів інтерферометрів на багатомодових полімерних волокнах» матеріали VI-ї Українсько-польської науково-практичної конференції Електроніка та Інформаційні Технології (ЕЛІТ-2014), Львів-Чинадієво, 28-31 серпня 2014 р., С. 17-19. *Особистий внесок здобувача: розробка методики опрацювання спекл-інтерферограм в режимі реального часу.*

12. V.I. Varyshchuk, V.Y. Tataryn, Y.V. Bobitski, “Polymer optical fiber vibration measuring based on speckle phenomena” Proc. of the X International Conference Electronics and Applied physics, Kyiv, Ukraine, October 22 – 25, 2014, P. 11 – 12. *Особистий внесок здобувача: розроблено структурну та функціональну схеми волоконно-оптичного вимірювального перетворювачів частоти вібрації.*

13. Варищук В.І., Татарин В.Я, Бобицький Я.В. “Дослідження модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при селективному збудженні мод” матеріали IV-ї міжнародної науково-практичної конференції “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”, м. Чернівці, Україна, 23 – 25 жовтня 2014 р., с. 37. *Особистий внесок здобувача: дослідження зміни амплітуди сигналу на виході багатомодового полімерного волокна від амплітуди сигналу модуляції.*

14. Варищук В.І., Татарин В.Я., Бобицький Я.В. Волоконно-оптичний сенсор частоти вібрації на багатомодовому полімерному волокні, матеріали VII-ї міжнародної науково-технічної конференції Оптоелектронні інформаційні технології «ФОТОНІКА-ОДС-2015», м. Вінниця, 21-23 квітня 2015 р., с.113. *Особистий внесок здобувача: вимірювання частоти механічних коливань з використанням інтерферометра на полімерному волокні.*

15. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. “An Experimental Study of Utilizing Multimode Polymer Fiber for Load Detection” Proc. of XII international conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, Lviv-Slavske, February 23 – 26, 2014, P. 399-401. *Особистий внесок*

здобувача: вимірювання деформації бетонних балок з використанням інтерферометра на полімерному волокні.

16. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. Prediction of the output signal of multimode fiber speckle sensor. // Матеріали Міжнародної конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016): Збірник тез. – 2016 – С.318-321. *Особистий внесок здобувача: моделювання вихідного сигналу волоконного перетворювача при просторовій фільтрації випромінювання.*

17. V. Varyshchuk, Y. Bobitski. Algorithm for automated diagnosis of object technical state with multimode fiber sensor. In: Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 IEEE First Ukraine Conference on. IEEE, 2017. p. 744-747. *Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму для тривалого автоматизованого контролю параметрів деформації.*