

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Варищук Василь Ігорович

УДК 535.417

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

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бобицький Ярослав Васильович,
завідувач кафедри фотоніки
Національного університету «Львівська політехніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Подчашинський Юрій Олександрович,
Державний університет «Житомирська політехніка»,
завідувач кафедри метрології та інформаційно-
вимірювальної техніки, м. Житомир

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Вороняк Тарас Іванович,
Фізико-механічний інституту ім. Г.В. Карпенка
Національної Академії Наук України, м. Львів

Захист відбудеться « 24 » вересня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 в Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, Львів-13, вул. Устияновича, 5, Х учбовий корпус, ауд.51.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий « 20 » серпня 2021 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.04,
кандидат технічних наук,
доцент*



Ю. З. Вашчурак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Завдяки інтенсивному розвитку волоконної оптики були розроблені та отримують все більше поширення волоконно-оптичні давачі інтерференційного типу, які володіють високою чутливістю, завадостійкістю та можуть використовуватись спільно з мікроелектронними пристроями обробки та передачі даних. Волоконно-оптичні інтерферометри знаходять щораз ширше застосування в різних галузях науки і техніки. В першу чергу це машинобудування, метеорологія, 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 волоконного інтерферометра.

Оскільки полімерні оптичні волокна (ПОВ) 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 напружено-деформованого стану. Окрім того, волоконні сенсори дають можливість створювати протяжні вимірювальні системи, 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, спрощення конструкції чутливого елемента вимірювальної системи, 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 методів 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 вимірювання параметрів механічних величин

з використанням сенсорів та перетворювачів на основі полімерних оптичних волокон є актуальною 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 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.

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:

- вперше 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 вібрації 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 з його безпосередньою участю. 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-структур 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 реєстрації спекл-сигналів 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 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами та напрямками, викладені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, подано дані про їх апробацію та публікацію основних положень.

У **першому розділі** проведено огляд та аналіз існуючих схем волоконно-оптичних інтерферометрів та 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 області

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 ґрунтується на аналізі спекл-структури випромінювання, яка утворюється внаслідок міжмодової інтерференції у волокні.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та виділено основні науково-технічні завдання дисертаційних досліджень.

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.

Представлено методику для вимірювання зміни деформаційного стану оптичного волокна, яка ґрунтується на обчисленні коефіцієнта кореляції між матрицями інтенсивностей поточного та опорного спекл-зображень однакового розміру, отриманих на виході багатомодового волокна. Значення коефіцієнта кореляції для розподілів інтенсивності спекл-структур до I_1 і після I_2 деформаційного впливу на волокно обчислюється на основі виразу:

$$C = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{\sqrt{(\langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2)(\langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2)}} \quad (1)$$

де кутові дужки означають операцію усереднення по просторових координатах x та y . Відомо, що коефіцієнт кореляції між двома спекл-картинами утвореними на виході багатомодового оптичного волокна, до і після деформації, відповідно, пов'язаний з максимальним додатковим набігом фази між модами співвідношенням:

$$C = \frac{\sin^2(\Delta\varphi_{\max}/2)}{(\Delta\varphi_{\max}/2)^2} \quad (2)$$

Припустивши, що всі направлені моди мають приблизно однакову інтенсивність, а їх додаткові зсуви фаз рівномірно розподілені в діапазоні від деякого мінімального значення $\delta\varphi_{\min}$ до деякого максимального значення $\delta\varphi_{\max}$, запропоновано оцінювати значення додаткової різниці фаз між модами внаслідок зміни довжини оптичного волокна Δl за формулою:

$$\Delta\varphi_{\max} = k\varepsilon n \Delta l \left(\frac{1}{\cos(\theta_m)} - \frac{1}{\cos(\theta_0)} \right) \quad (3)$$

де n – показник заломлення серцевини волокна, ε – коефіцієнт пружно-оптичного ефекту, 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 поширення випромінювання у волокні.

Підставивши у рівняння (2) значення для максимальної додаткової різниці фаз між модами внаслідок видовження волокна з рівняння (3), отримано вираз для коефіцієнта кореляції між двома спекл-інтерферограмами у вигляді:

$$C = \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi \varepsilon n \Delta l}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos(\theta_m)} - 1 \right) \right)}{\left(\frac{\pi \varepsilon n \Delta l}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos(\theta_m)} - 1 \right) \right)^2} \quad (4)$$

Вираз (4) 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-сигналів визначається зміною довжини оптичного волокна і не залежить від інших факторів. Теоретична залежність $C(\Delta l)$ розрахована на основі виразу (4) для полімерного волокна із ступінчастим профілем показника заломлення, довжиною 1 м, для якого $\Delta n = 0,08$, діаметр серцевини дорівнює 980 мкм при довжині хвилі $\lambda = 0,6328$ мкм, представлена на рис. 1. Аналіз результатів моделювання показав, що існує деяке характерне значення 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 вони будуть повністю декорелювати. В такому випадку подальша обробка сигналів стає неможливою.

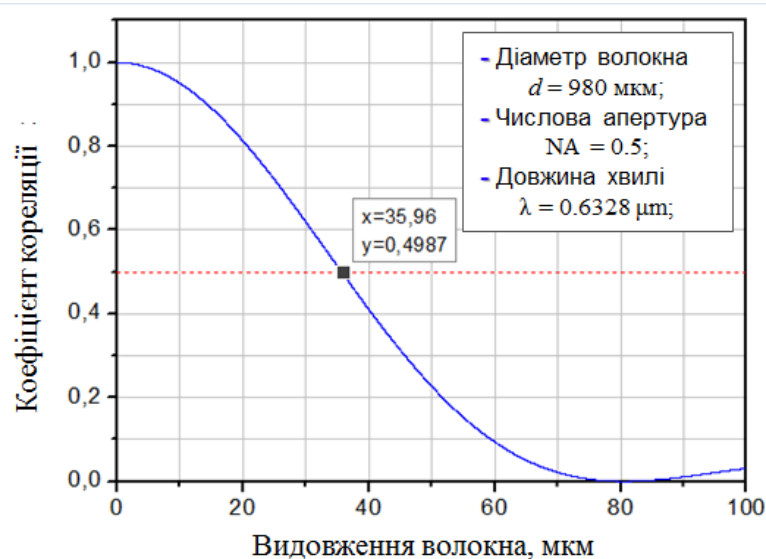


Рис.1. Залежність коефіцієнта кореляції спекл-картин від величини видовження полімерного оптичного волокна розрахована для довжини хвилі $\lambda=0,6328$ мкм.

Якщо $\Delta l < \Delta l_0$ коефіцієнт 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.

Удосконалено метод для вимірювання частоти вібрації та механічних коливань, який ґрунтується на аналізі спекл-структури випромінювання на виході полімерного волокна при збудженні в ньому мод вищих порядків. Запропоновано вводити випромінювання під кутом до повздовжньої осі оптичного волокна для отримання поперечного розподілу інтенсивності у формі кільця, радіус якого визначається кутом вводу випромінювання. Використання такого підходу дозволяє підвищити чутливість волоконного перетворювача, оскільки моди вищих порядків є більш чутливими до зовнішнього механічного збурення. При механічному збуренні волокна внаслідок вібрації, окремі спекли в розподілі інтенсивності стають яскравішими, інші, навпаки, більш темними, а деякі не змінюються взагалі. Однак, сумарна інтенсивність випромінювання в цілому практично не змінюється. Інтенсивність окремого i -го спекла, що реєструється фотоприймачем, при зовнішньому збуренні волокна може бути записана у вигляді:

$$I_i = A_i \left[1 + B_i \left[\cos(\delta_i) - F(t) \varphi_i \sin(\delta_i) \right] \right] \quad (5)$$

де A_i та B_i описують зміну амплітуди випромінювання внаслідок взаємодії між модами, δ_i зміна фази випромінювання, яке поширюється у волокні, $F(t)$ зовнішнє збурення волокна і φ_i представляє фазу випромінювання. Таким чином, сумарна інтенсивність випромінювання може бути отримана як сума всіх значень I_i :

$$I_T = \sum_{i=1}^N A_i + \sum_{i=1}^N -A_i B_i \cos(\delta_i) - \sum_{i=1}^N A_i B_i \varphi_i F(t) \sin(\delta_i) \quad (6)$$

При просторовій фільтрації вихідного випромінювання на фотоприймач потрапляє лише частина спекл-сигналу якій відповідатиме деяка кількість спеклів n . При умові що $n \ll N$, та беручи до уваги лише ті компоненти рівняння (6) які змінюються в часі, зміну інтенсивності спекл-структури відповідно до сигналу збурення $F(t)$ можна записати у вигляді:

$$\Delta I_T = \left[\sum_{i=1}^n C_i \sin(\delta_i) \right] F(t) \quad (7)$$

де C_i представляє сумарну амплітуду всіх спеклів. Вираз (7) описує зміну інтенсивності спекл-структури на виході багатомодового волокна внаслідок зовнішнього збурення при діафрагмуванні частини вихідного 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.

Для експериментального дослідження зміни коефіцієнта кореляції двох послідовних спекл-сигналів на виході багатомодового полімерного волокна, представлених у вигляді цифрових зображень однакового розміру, розроблено схему волоконно-оптичного інтерферометра показану на рис. 2.

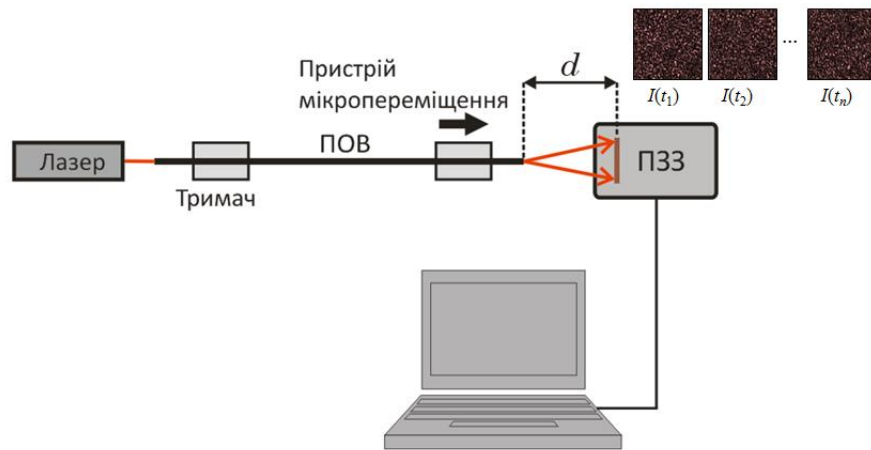


Рис.2. Схема установки для визначення зміни деформаційного стану волокна методом прямого кореляційного порівняння цифрових спекл-зображень

Випромінювання від лазера напряму вводиться у вхідний торець стандартного ПОВ довжиною 1 м з діаметром серцевини 980 мкм та числовою апертурою рівною 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 на виході волокна реєструвалась за допомогою цифрової камери приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), зображення з якої передавалось на комп'ютер. Спочатку ПЗЗ камера реєструє опорне зображення спекл-картини, яке відповідає початковому стану волоконного хвилеводу. Деформація волокна внаслідок зовнішньої механічної дії призводить до зміни інтенсивності та просторового положення спеклів в зареєстрованій картині. За допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення здійснювалась подальша обробка отриманих цифрових зображень і розрахунок зміни коефіцієнта кореляції внаслідок деформації волокна.

Залежності зміни коефіцієнта кореляції від видовження волокна отримані для різних відстаней між вихідним торцем волокна та матрицею ПЗЗ відеокамери представлені на рис. 3. 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 матрицею ПЗЗ камери спочатку становила 4 см і далі збільшувалась до 6 та 8 см з метою збільшення середнього розміру спеклів приблизно в два рази. 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. 4. При цьому значення видовження волокна знайдене після останньої процедури перезапису буде додаватись до значення отриманого до перезапису опорного зображення. Використовуючи такий підхід можна проводити кількісні вимірювання деформації волокна, які значно перевищують значення при якому починає спостерігатись повна декореляція двох спекл-сигналів. На основі результатів представлених на рис.3. можна зробити висновок, що вища чутливість до зміни деформації отримується при менших відстанях між торцем волокна та матрицею ПЗЗ камери, що в свою чергу відповідає меншому середньому розміру скла в зареєстрованій картині.

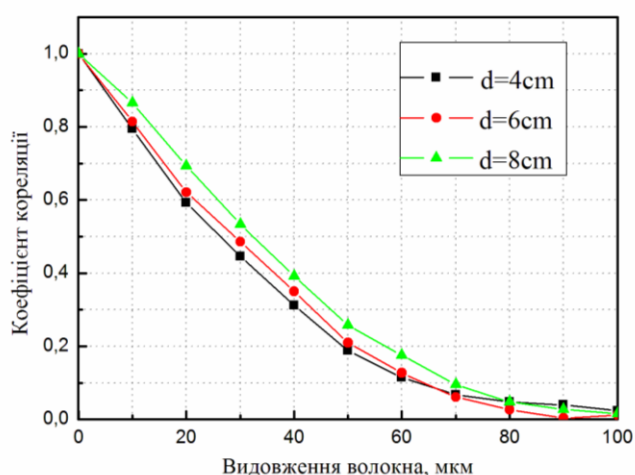


Рис. 3. Залежність коефіцієнта кореляції від видовження волокна для різних відстаней між торцем волокна та матрицею ПЗЗ камери: $d = 4, 6$ та 8 см.

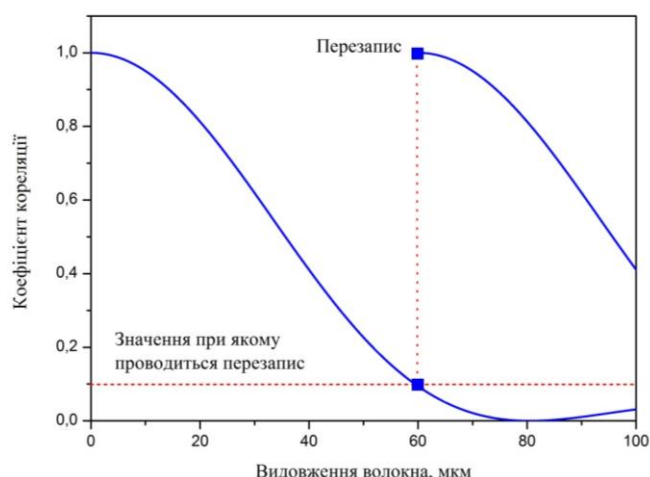
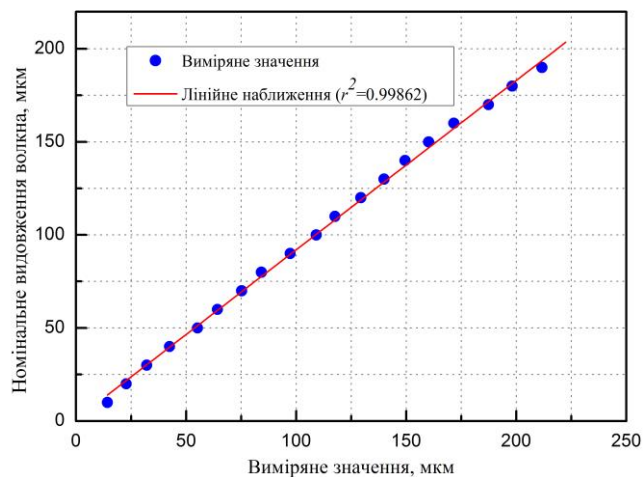


Рис.4. Зміна коефіцієнта кореляції спекл-структур при видовженні оптичного волокна отримані до і після перезапису опорного зображення.

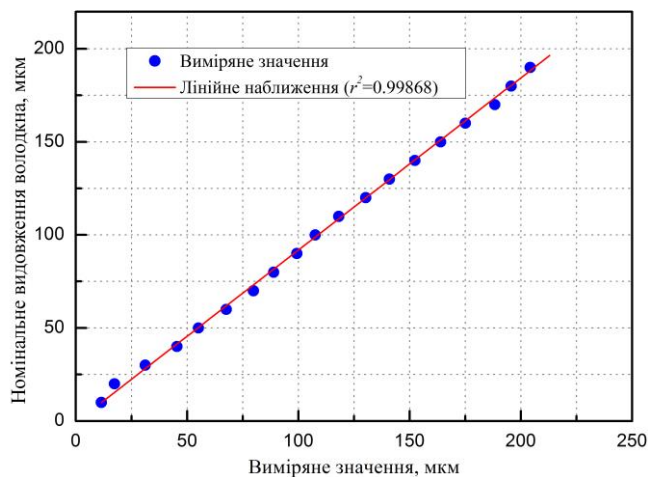
Таким чином, як і більшість оптичних схем перетворювачів, які використовуються для метрологічних задач, дана схема повинна бути прокалібрована перед початком проведення вимірювань враховуючи вплив параметрів навколишнього середовища, геометрію схеми та роздільну здатність матриці ПЗЗ камери.

Для наочного представлення впливу розміру спеклів в зареєстрованому зображенні на результати вимірювання деформації, на рис. 5 (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 при їх наближенні з використанням поліноміальної функції другого порядку. Отримані результати вимірювання демонструють добру збіжність

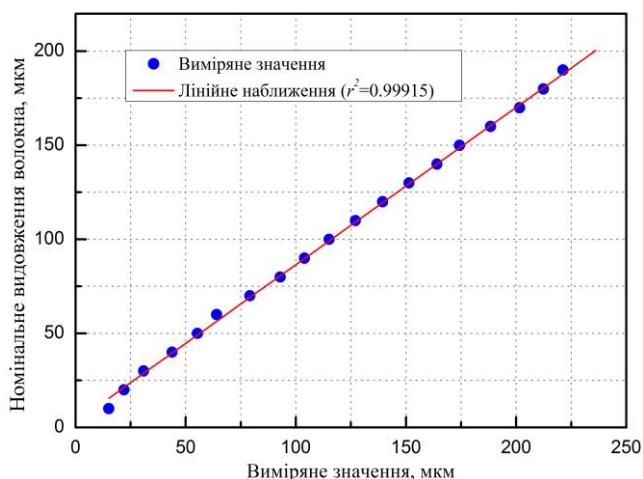
значень вимірюваних з використанням інтерферометра на багатомодовому полімерному волокні та номінальних значень деформації (значень переміщення мікрометричного гвинта). Звідси слідує, що розроблений метод дозволяє отримати лінійну залежність вимірюваного вихідного параметра від прикладеного навантаження в зазначеному діапазоні деформації волокна. Коефіцієнт лінійної регресії (r^2) при наближенні результатів вимірювання перевищує значення 0,998 для всіх трьох випадків.



а)



б)



в)

Рис.5. Вимірні значення видовження волокна для різних відстаней d між торцем волокна та матрицею ПЗЗ камери: а – 4см; б – 6см; в – 8см

Підтверджено, що сумарне вимірне значення деформації відрізняється від номінальної деформації за абсолютною величиною. Найбільше значення абсолютної похибки вимірювання деформації отримано для найбільшого середнього розміру спекла і є меншим 3 мкм. Відносна похибка вимірювань не перевищує 5% для діапазону видовження волокна 0 – 50 мкм, що свідчить про придатність методу для вимірювання параметрів деформації.

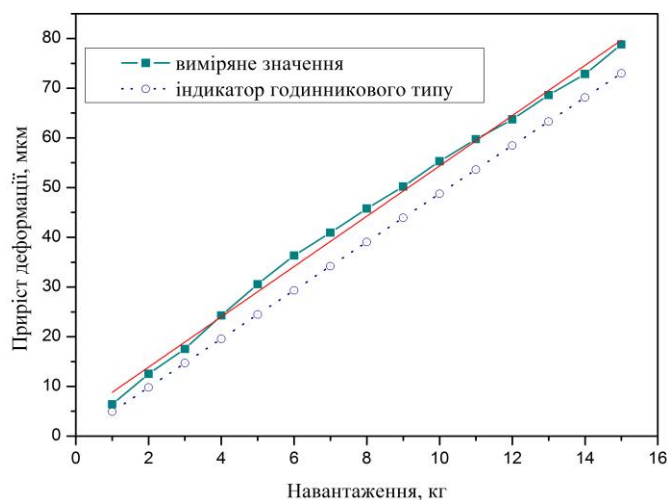
На основі результатів дослідження процесу модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодовому полімерному волокні при збудженні мод вищих порядків запропоновано базову структурну схему волоконно-оптичного

перетворювача частоти вібрації та механічних коливань та описано особливості її функціонування. Використання такої схеми вимірального перетворювача дозволяє підвищити ефективність перетворення модуляції фази в модуляцію інтенсивності випромінювання на виході волокна та здійснювати контроль за зміною амплітуди сигналу збурення.

У **четвертому розділі** представлено приклади застосування розробленого методу вимірювання деформації та удосконаленого методу вимірювання частоти механічних коливань для вимірювання характеристик елементів конструкцій. Для дослідження деформації зразка бетонної призми за допомогою розробленого методу виготовлено дослідні зразки бетонних балок з вбудованим в них полімерним волокном. Досліджуваний зразок було встановлено на нерухомі циліндричні опори так, щоб його повздовжня вісь була перпендикулярною до опор (рис. 6 (а)). На зразок кріпили вантажну площину, після чого встановлювали в початкове положення покази індикатора деформації з ціною поділки 0,001 мм та верхньою межею вимірювання 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 при деформації. Отримані результати вимірювань порівняли із значеннями деформації, які визначали за допомогою мікрометра годинникового типу. На рис. 6 (б) подано залежності величини деформації досліджуваного зразка від навантаження, отримані за розробленим методом, а також за результатами вимірювань мікрометром.



а)



б)

Рис.6. Загальний вигляд установки для дослідження зразка бетонної балки (а) та залежності його деформації від прикладеного навантаження (б)

Як видно з рис.6 (б), результати вимірювання деформації методом прямого кореляційного аналізу спекл-зображень на виході волокна добре збігаються з результатами вимірювань виконаних за допомогою механічного мікрометра, що підтверджує придатність розробленого методу для вимірювання характеристик деформації досліджуваного зразка. 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 (рис. 7).

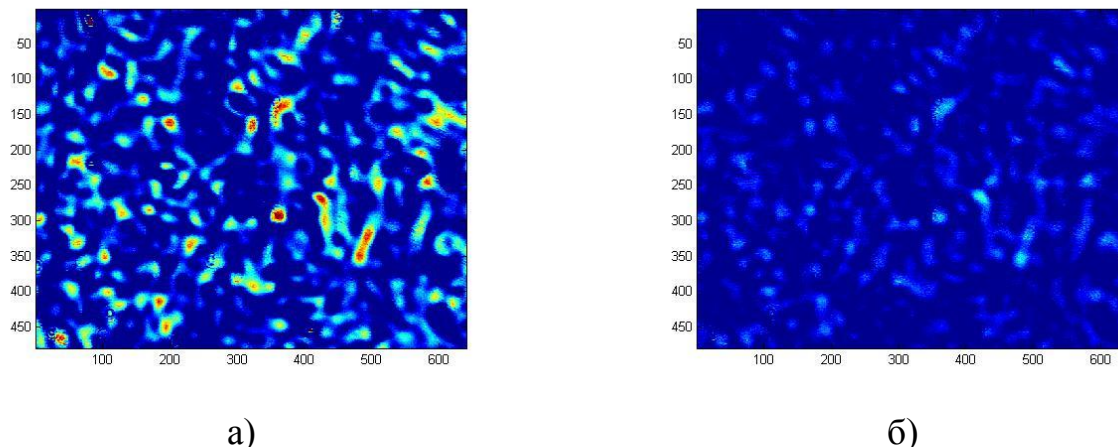


Рис.7. Зображення спекл-інтерферограм сформованих при навантаженні балки вагою 1 кг (а) та після зняття навантаження (б)

Для вимірювання частоти механічних коливань з використанням перетворювача на основі багатомодового полімерного волокна розроблено схему експериментальної установки яка представлена на рис. 8. Випромінювання з лазера 1 направлене на торець полімерного волокна завдовжки 1 м з діаметром серцевини 980 мкм. Для збудження мод вищих порядків випромінювання лазера вводилось під кутом відносно осі волокна, формуючи на виході спекл-структуру в формі кільця.

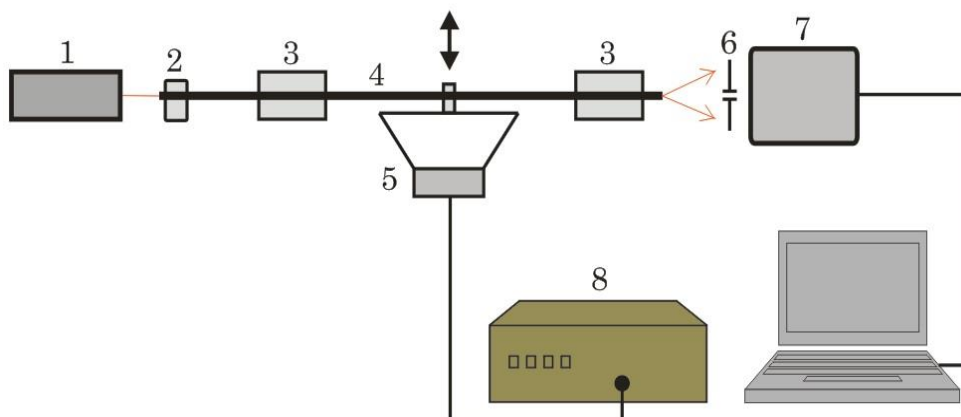


Рис.8. Схема експериментальної установки для вимірювання частоти вібрації волокна: 1 – лазер; 2 – поворотний столик; 3 – тримачі для фіксації та натягу волокна; 4 – полімерне оптичне волокно; 5 – пристрій модуляції; 6 – діафрагма; 7 – фотоприймач; 8 – генератор сигналів

В якості модулятора було використано акустичний динамік 4, з прикріпленням до дифузора 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 направляли на чутливий елемент фотоприймача з діафрагмою. Сигнал з фотоприймача подавався на цифровий осцилограф і вимірювання частоти проводилось з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Для

виділення інтерференційних коливань інтенсивності вихідного сигналу перед фотоприймачем встановлена діафрагма, яка розміщується відносно приймача так, щоб амплітуда сигналу на виході з приймача була максимальною. Зміну амплітуди вихідного сигналу при частоті сигналу модуляції 60 Гц і амплітуді модуляції 1 мм показано на рис. 9, а частотний спектр такого сигналу представлено на рис. 10.

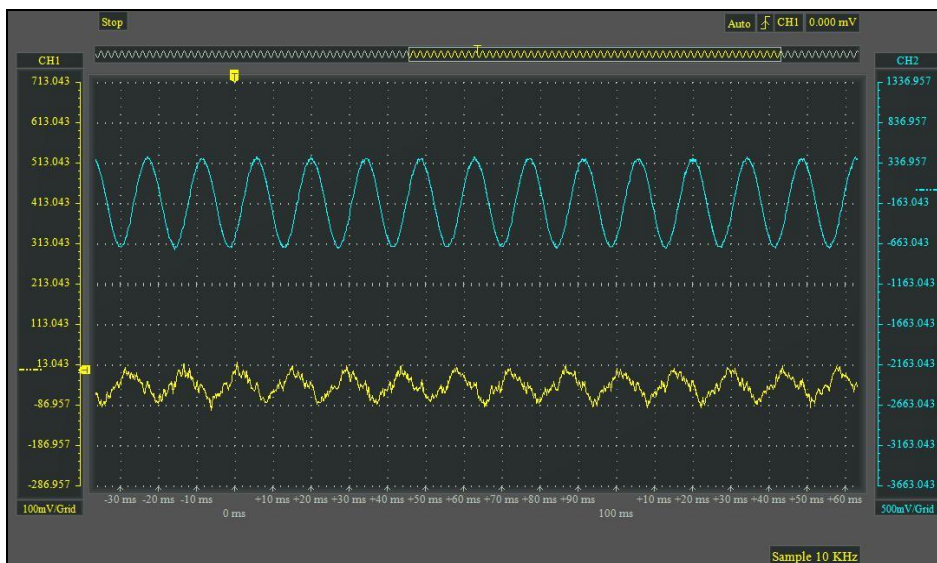


Рис. 9. Часова діаграма вихідного сигналу фотоприймача при вібрації чутливої ділянки волокна з частотою 60 Гц

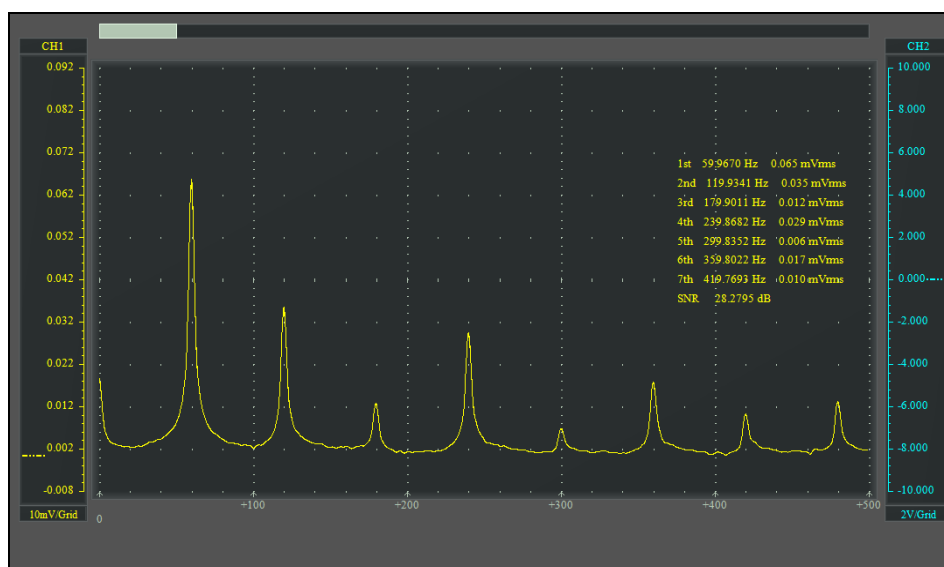


Рис.10. Частотний спектр вихідного сигналу багатомодового полімерного волокна при вібрації волокна з частотою 60 Гц

Щоб дослідити функцію перетворення вимірювального перетворювача частоти було експериментально досліджено зміну вихідного сигналу фотоприймача при різних частотах та амплітудах механічної вібрації оптоволокна (рис. 11).

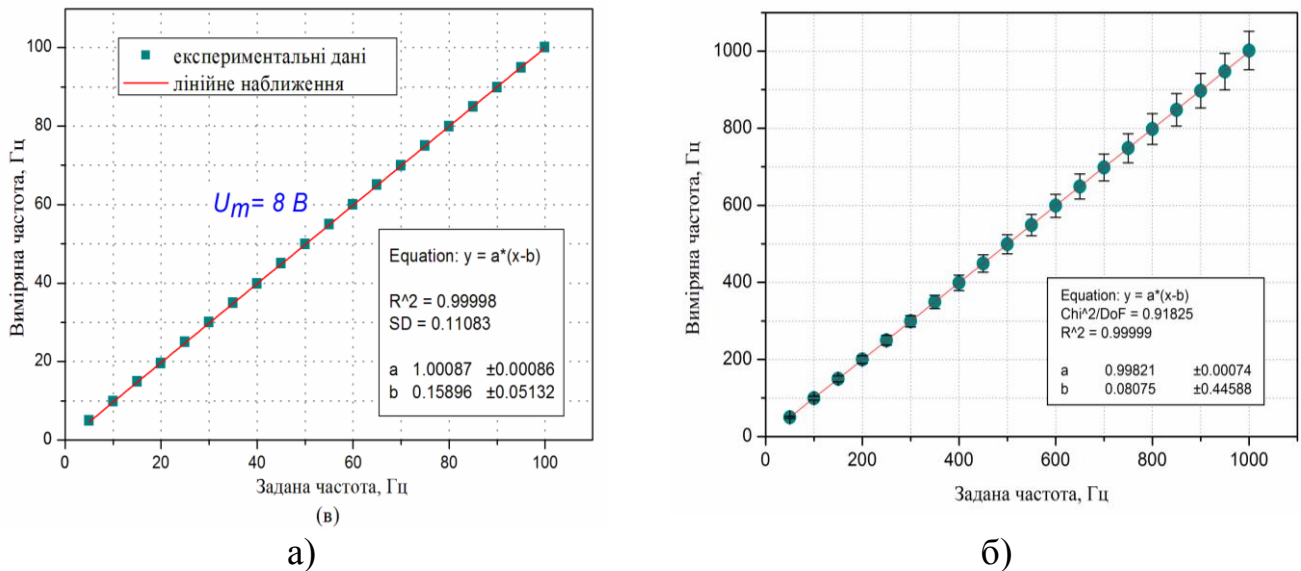


Рис.11. Порівняння виміряного значення частоти вібрації з частотою заданою умовами експерименту при величині амплітуди сигналу збурення 1 мм

Отримані результати показали, що для різних значень амплітуди сигналу модуляції вимірне значення частоти вихідного сигналу чутливого елемента на полімерному волокні збігається з частотою сигналу збурення заданою умовами експерименту. 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 викликаной його зовнішнім механічним збуренням.

У **висновках** викладені основні результати дисертаційної роботи, розкрито їх наукову новизну та практичну цінність. Підтверджено досягнення поставленої мети і науково-технічних завдань досліджень та наведено рекомендації щодо практичного застосування отриманих результатів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

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 вимірювальних перетворювачів механічних величин на базі багатомодових полімерних оптичних волокон та їх застосування для побудови інтерферометричних вимірювальних систем контролю 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 дисертації отримано та обґрунтовано такі основні результати та висновки:

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. За результатами досліджень залежності коефіцієнта кореляції спекл-сигналів від видовження полімерного волокна при його деформації розроблено та експериментально досліджено метод для вимірювання параметрів деформації 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 повздовжньої 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. За результатами досліджень механізму модуляції інтенсивності випромінювання в багатомодових полімерних волокнах удосконалено метод вимірювання частоти вібрації оптичного волокна. Розроблено 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.

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/УкрМіСо’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.

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 контрольних-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.

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

АННОТАЦІЯ

Варишук В.И. Интерферометр на полимерном оптическом волокне как преобразователь для измерения механических величин. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 - Приборы и методы измерения механических величин – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2021.

Диссертация посвящена разработке теоретических и практических основ построения функциональных схем волоконно-оптических измерительных преобразователей механических величин на базе интерферометра на полимерном оптическом волокне. Проведено теоретическое обобщение основных физических свойств спекл-структур, которые формируются на выходе многомодовых полимерных оптических волокон в результате межмодовой интерференции, с точки зрения их возможного использования в качестве информативного параметра для метрологических приложений. На основе результатов исследований предложен новый подход к разработке волоконно-оптических сенсоров и измерительных преобразователей механических величин на базе многомодовых полимерных оптических волокон. Разработанный метод обработки сигналов интерферометра на полимерном оптическом волокне, основанный на прямом корреляционном сравнении распределений интенсивности опорного и текущего спекл-изображений, позволяет проводить автоматизированный контроль параметров деформации технических объектов. В результате исследований механизма модуляции интенсивности излучения в многомодовых полимерных волокнах при селективном возбуждении мод предложен метод для измерения частоты механических колебаний и вибрации, который позволяет повысить эффективность преобразования модуляции фазы в модуляцию

интенсивности излучения на выходе волокна. Проведенные в работе исследования по разработке и интерпретации сигналов измерительных преобразователей на многомодовых полимерных волокнах могут служить основой для создания контрольно измерительных приборов, предназначенных для исследования различных физических полей, а также контроля и диагностики напряженно-деформированного состояния технических объектов. Учитывая механические свойства чувствительных элементов измерительных преобразователей на основе полимерных оптических волокон, их способность к мультиплексированию и создания протяженных каналов для передачи информативного сигнала, могут быть реализованы распределенные волоконно-оптические измерительные системы.

Ключевые слова: волоконно-оптический интерферометр, межмодовой интерференция, спекл-структура, измерительный преобразователь.

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.

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

Підписано до друку 19.08.21
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Зам. №19/08-2
Ум. друк. арк. 0,9
Наклад 100 прим.

Видавництво “Галич-Прес”
Видавець ФОП Король І.В.
м. Львів, вул. Гнатюка, 17
Ел. пошта: lvivprint@ukr.net. Тел. 096-59-88-924
Свідоцтво ДК №5353 від 24.05.2017 р.