

І. Ш. Невлюдов, д-р техн. наук, професор, В. Є. Овчаренко, д-р техн. наук, професор,
О. В. Токарева, канд. техн. наук, професор

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Ключові слова: система, моніторинг, контроль, полімерний композиційний матеріал, композитна конструкція, температура, деформація, сенсор, оптоволоконна бреггівська решітка.

Сучасні полімерні композиційні матеріали (ПКМ) набули широкого застосування в авіаційній, аерокосмічній, енергетичній та транспортній галузях, а також у приладобудуванні й робототехніці завдяки поєднанню високої питомої міцності, корозійної стійкості, малої маси та можливості цілеспрямованого формування механічних і функціональних властивостей. У приладобудівних і робототехнічних системах використання ПКМ забезпечує створення легких, жорстких і динамічно стабільних конструкцій, що є критично важливим для досягнення високої точності позиціонування, швидкодії та енергоефективності сучасних автоматизованих і роботизованих комплексів. Водночас складна багатофазна структура ПКМ зумовлює підвищену чутливість до механічних і теплових навантажень, що може призводити до накопичення пошкоджень, розвитку внутрішніх дефектів і деградації експлуатаційних характеристик матеріалу. У зв'язку з цим актуальним завданням є забезпечення надійного контролю деформаційно-го й температурного стану таких матеріалів у реальних умовах експлуатації.

Традиційні методи вимірювання деформацій і температури, зокрема тензорезистивні датчики, термопари та ультразвукові методи непрямого контролю, мають низку обмежень при застосуванні до полімерних композиційних конструкцій. До них належать локальність вимірювань, чутливість до електромагнітних завад, обмежена довговічність, а також складність інтеграції в структуру матеріалу без порушення його цілісності. Крім того, такі сенсори часто не забезпечують необхідної точності та стабільності показників у разі тривалого впливу змінних навантажень і температурних градієнтів. У відповідь на зазначені обмеження значного розвитку набули волоконно-оптичні методи моніторингу. Оптичні сенсори характеризуються малими геометричними розмірами, хімічною інертністю, стійкістю до корозії та електромагнітних впливів, що робить їх особливо придатними для роботи в складних експлуатаційних середовищах. Важливою перевагою є можливість інтеграції сенсорних елементів безпосередньо в матеріал на етапі виготовлення композитної конструкції.

Серед різних типів волоконно-оптичних сенсорів особливе місце займають оптоволоконні бреггівські решітки (ОБР), що являють собою ділянки оптичного волокна з періодично модифікованим показником заломлення. Такі сенсори набули широкого застосування для вимірювання деформацій і температури завдяки високій чутливості, стабільності характеристик та електромагнітній нечутливості. Принцип їх роботи ґрунтується на явищі вибіркового відбиття оптичного випромінювання з довжиною хвилі, визначеною періодом решітки та ефективним показником заломлення волокна. Під дією механічних деформацій або температурних змін відбувається зсув резонансної (бре-

гівської) довжини хвилі, що створює можливість високоточного визначення відповідних фізичних параметрів. Однією з ключових переваг ОБР є висока чутливість до деформацій і температури при одночасному збереженні стабільності показників у часі. Це забезпечує можливість довготривалого моніторингу стану ПКМ без необхідності частого калібрування сенсорів. Крім того, ОБР дозволяють реалізувати мультиплексування, тобто розміщення декількох сенсорів уздовж одного оптичного волокна, що суттєво розширює можливості просторового контролю параметрів у складних конструкціях. Важливим аспектом застосування оптоволоконних бреггівських решіток є їх сумісність з полімерними матрицями композитних матеріалів. Дослідження показують, що правильно інтегровані ОБР не призводять до істотного ослаблення механічних характеристик композиту та можуть ефективно відтворювати реальний напружено-деформований стан матеріалу. Це відкриває перспективи використання таких сенсорів не лише для експлуатаційного моніторингу, а й для контролю процесів виготовлення та отвердіння композитних виробів.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділено проблемі розділення впливів деформації та температури на спектральний відгук ОБР. Центральна довжина хвилі бреггівського відбиття визначається ефективним показником заломлення оптичного волокна та геометричним періодом модуляції. Будь-які зовнішні впливи, що призводять до зміни цих параметрів, зумовлюють зсув відбивної довжини хвилі. Саме ця залежність лежить в основі використання ОБР як сенсорів деформацій і температури. Оскільки обидва фактори впливають на зсув довжини хвилі, розробляються різні підходи до компенсації температурного ефекту, зокрема застосування додаткових еталонних решіток або комбінованих сенсорних схем. Це дозволяє підвищити точність вимірювань і забезпечити коректну інтерпретацію експериментальних даних. Порівняльний аналіз з традиційними сенсорними технологіями свідчить, що оптоволоконні бреггівські решітки мають суттєві переваги за такими критеріями, як довговічність, стійкість до зовнішніх впливів та можливість інтеграції в композитні структури. Застосування таких сенсорів сприяє підвищенню безпеки експлуатації відповідальних конструкцій, зниженню витрат на технічне обслуговування та запобіганню аварійним ситуаціям за рахунок раннього виявлення критичних змін стану матеріалу. Крім того, оптоволоконні системи моніторингу здатні працювати на великих відстанях без втрати якості сигналу, що є важливим для контролю протяжних або важкодоступних конструкцій.

Механічна деформація викликає подовження або стискання волоконної решітки, що призводить до зміни її просторового періоду. Одночасно відбувається зміна ефективного показника заломлення внаслідок фотоеластичного ефекту, зумовленого перерозподілом напружень у матеріалі волокна. Сумарний вплив цих чинників викликає лінійний зсув бреггівської довжини хвилі, величина якого прямо пропорційна прикладеній деформації в широкому діапазоні навантажень. Температурні зміни також істотно впливають на спектральні характеристики ОБР. Підвищення температури спричиняє теплове розширення оптичного волокна, що змінює період решітки, а також викликає термооптичний ефект, пов'язаний зі зміною показника заломлення матеріалу. Вклад кожного з цих механізмів у загальний температурний відгук залежить від складу волокна, технології виготовлення решітки та умов її закріплення в композитній структурі. Теоретичні підходи до розділення температурного та деформаційного впливів базуються на використанні двох ідентичних решіток із різними умовами механічного закріплення або на поєднанні ОБР із сенсорами іншого типу.

Спектральні характеристики ОБР, зокрема форма відбивного піка та його ширина, також несуть важливу інформацію про стан матеріалу. Нерівномірний розподіл де-

формацій або локальні дефекти в композиті можуть призводити до асиметрії спектра або його розширення. Аналіз таких змін відкриває можливості для раннього виявлення пошкоджень, зокрема мікротріщин і зон деградації матеріалу.

Інтеграція оптоволоконних бреггівських решіток у полімерні композиційні матеріали потребує врахування особливостей як волоконно-оптичного сенсора, так і структури самого композиту. Основною метою вбудовування ОБР є забезпечення надійного механічного зчеплення між оптичним волокном і матрицею композиту без погіршення цілісності волокна та без істотного впливу на міцнісні характеристики матеріалу. У межах даного дослідження реалізовано інтеграцію оптичного волокна з бреггівською решіткою у внутрішню структуру композиту шляхом його розміщення між шарами армувального наповнювача. Такий підхід забезпечує ефективну передачу механічних деформацій від композиту до волокна та мінімізує ризик локальних концентрацій напружень.

Процес виготовлення зразків полімерного композиційного матеріалу здійснюється методом вакуумної інфузії з використанням епоксидної матриці та скловолоконного армування. Оптоволоконні сенсори попередньо очищувалися від захисного полімерного покриття на ділянці розташування бреггівської решітки для покращення адгезії з матрицею. Положення сенсора в композиті визначалося відповідно до напрямку основних робочих напружень, що дозволяло досліджувати осьові деформації матеріалу. Схематично розташування ОБР у структурі композиту наведено на рис. 1, де показано взаємне положення армувальних шарів, оптичного волокна та зони чутливості решітки.

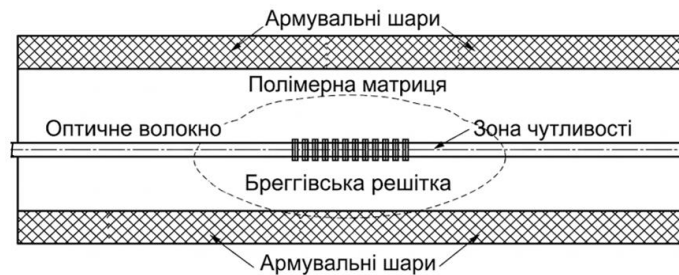


Рисунок 1 – Схема розташування ОБР у композиційному матеріалі

Експериментальна установка для вимірювання деформацій і температури (рис. 2) складається з оптоволоконного інтеррогатора, механічного навантажувального стенда та системи температурного контролю. Інтеррогатор забезпечує реєстрацію спектрального зсуву довжини хвилі бреггівського відбиття з роздільною здатністю не гірше 1 пм, що відповідає вимірюванню деформацій порядку кількох мікродеформацій. Механічне навантаження зразків здійснюється за схемою одноосового розтягу з плавним наростанням сили, що дозволяє отримати квазістатичні залежності деформацій.

Для опису зв'язку між прикладеним механічним навантаженням і спектральним зсувом ОБР використовується лінійна модель, у якій сумарна зміна довжини хвилі бреггівського відбиття визначається впливом деформації та температури. У загальному вигляді цей зв'язок представлений співвідношенням:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(k_\varepsilon\varepsilon + k_T\Delta T),$$

де $\Delta\lambda_B$ – зсув резонансної довжини хвилі, ε – механічна деформація, ΔT – зміна температури, k_ε , k_T – коефіцієнти чутливості ОБР до деформації та температури відповідно.

Значення коефіцієнтів визначається експериментально шляхом калібрування сенсорів до інтеграції в композит.

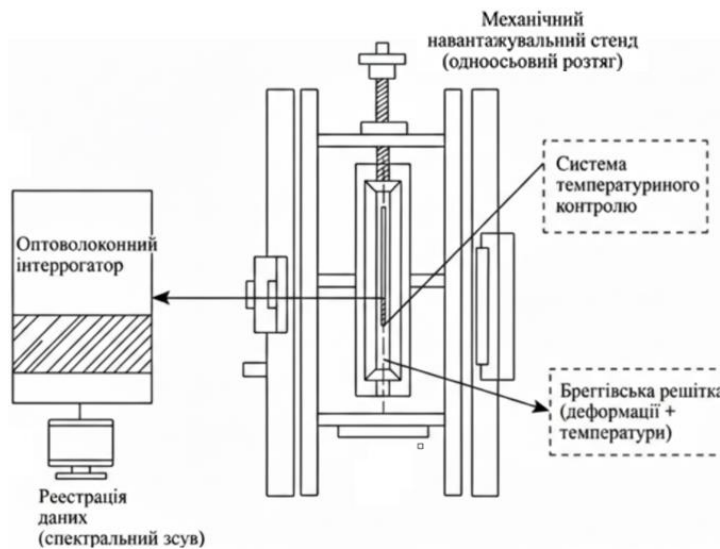


Рисунок 2 – Схема установки для вимірювання деформацій і температури

З метою розділення температурного та деформаційного впливів у дослідженні застосовано підхід компенсації температури на основі використання еталонної ОБР. Додатковий сенсор розміщується в зоні композиційного матеріалу, яка не піддавалася механічному навантаженню, але перебувала в тих самих теплових умовах. За таких умов температурний внесок у спектральний зсув бреггівської довжини хвилі визначається незалежно та віднімається з сумарного сигналу вимірювальної решітки. Реалізація зазначеного підходу дозволяє підвищити точність визначення деформацій у змінних теплових умовах. Особливу увагу було приділено аналізу впливу вбудовування оптоволоконного сенсора на механічні властивості композиту. Порівняльні випробування зразків із сенсорами та без них показали відсутність статистично значущого зниження межі міцності або модуля пружності матеріалу.

Експериментальні вимірювання деформацій проводилися шляхом прикладання контрольованого механічного навантаження до зразка композиційного матеріалу з інтегрованою ОБР. У процесі навантаження безперервно реєструвався спектральний зсув бреггівської довжини хвилі, який безпосередньо корелює з величиною осової деформації оптичного волокна. Обробка експериментальних даних здійснювалася на основі аналізу спектрів відбиття ОБР у часовій області. Для кожного навантажувального циклу реєструвалася зміна положення спектрального піка, після чого виконувалося його апроксимування гаусівською функцією з метою уточнення значення центральної бреггівської довжини хвилі. Такий підхід дозволив зменшити вплив шумових складових спектра та підвищити відтворюваність результатів вимірювань.

Отримана залежність спектрального зсуву від прикладеної деформації (рис. 3) має чітко виражений лінійний характер в усьому досліджуваному діапазоні навантажень, що свідчить про адекватність використаної сенсорної моделі та відсутність суттєвих нелінійних ефектів, зумовлених взаємодією волокна з композиційною матрицею. Коефіцієнт чутливості становив близько 1,2 пм/мкє, що узгоджується з теоретичними значеннями для стандартних кремнеземних оптичних волокон. Відхилення експериме-

нтальних точок від апроксимуючої прямої не перевищували $\pm 3\%$, що свідчить про високу повторюваність результатів та стабільність показань сенсорної системи. Невеликі флуктуації сигналу можуть бути пояснені локальною неоднорідністю напруженого стану в зоні розміщення решітки та впливом мікроструктурних особливостей композитної матриці.

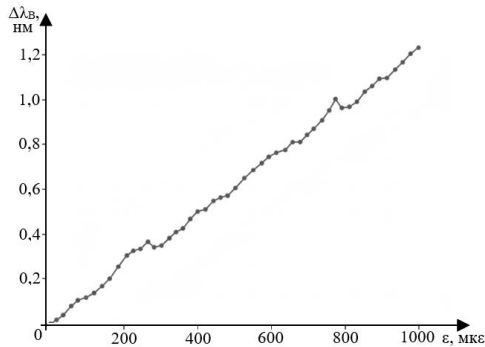


Рисунок 3 – Залежність спектрального зсуву ОБР від механічної деформації

Дослідження температурної стабільності інтегрованих оптоволоконних сенсорів виконувалося в діапазоні температур від 20 до 80 °С з циклічним нагріванням і охолодженням зразків. Отримані результати показали високу відтворюваність температурної характеристики сенсорів, а також відсутність виражених гістерезисних ефектів спектрального зсуву під час повторних температурних циклів, що є важливим для використання сенсорних систем у складі довготривалих систем моніторингу в реальних умовах експлуатації.

Також ряд досліджень було спрямовано на кількісну оцінку температурної чутливості оптоволоконних бреггівських решіток, інтегрованих у полімерний композиційний матеріал. Температурні випробування проводилися за стабілізованих теплових режимів із безперервною реєстрацією спектрального положення відбитої бреггівської довжини хвилі. На основі отриманих експериментальних даних побудовано залежності спектрального зсуву від температури (рис. 4).

Аналіз отриманих температурних характеристик показав близьку до лінійної залежність спектрального зсуву від температури в усьому досліджуваному діапазоні. Така поведінка узгоджується з теоретичними уявленнями щодо сумарного впливу термооптичного ефекту та теплового розширення як матеріалу оптичного волокна, так і композиційної матриці. Відсутність помітних нелінійних відхилень свідчить про стабільність оптичних і механічних властивостей сенсорного елемента в умовах температурних навантажень.

Середнє значення температурного коефіцієнта чутливості становило близько 10 пм/°С, що підтверджує можливість використання ОБР для одночасного контролю температури та деформацій у композитних конструкціях. Водночас результати підкреслюють необхідність коректної температурної компенсації під час визначення механічних деформацій, оскільки навіть незначні температурні коливання можуть спричинити помітні спектральні зсуви. Порівняння експериментальних результатів із теоретичними моделями підтвердило їхню узгодженість у межах експериментальної похибки. Серії повторних навантажень із фіксованими рівнями деформації не виявили помітного дрейфу спектральних характеристик ОБР протягом усього циклу експериментів. Це свідчить про відсутність деградації оптичного волокна та стабільність адгезійного

зв'язку між волокном і композитною матрицею. Оптоволоконні бреггівські решітки забезпечують високу точність вимірювань та характеризуються низкою експлуатаційних переваг, зокрема електромагнітною нечутливістю, можливістю мультиплексування та інтеграції в конструкцію без порушення її цілісності.

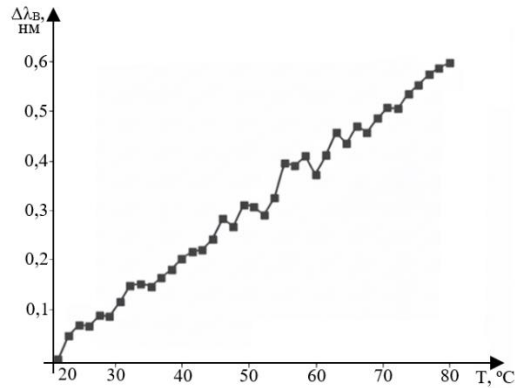


Рисунок 4 – Температурна залежність спектрального зсуву ОБР

Результати досліджень підтверджують доцільність застосування оптоволоконних бреггівських решіток для моніторингу деформацій і температури в полімерних композиційних матеріалах та обґрунтовують можливість їх використання як складову системи автоматичного моніторингу та контролю напружено-деформованого стану композитних конструкцій. На рис. 5 представлено структурну схему системи автоматичного моніторингу та контролю напружено-деформованого стану полімерної композиційної конструкції з використанням оптоволоконних бреггівських решіток. Об'єктом керування є полімерна композитна конструкція, на яку діють керуючі впливи та зовнішні механічні й температурні збурення, що формують її поточний деформаційний і тепловий стан. Первинне перетворення фізичних величин здійснюється за допомогою вимірювальної ОБР, інтегрованої в навантажену зону матеріалу, та еталонної ОБР, розміщеної в області без механічних деформацій і призначеної для реєстрації температурної складової сигналу. Сигнали з обох сенсорів надходять до оптичного інтеррогатора, який забезпечує збудження оптичного волокна, реєстрацію відбитих спектрів і визначення бреггівських довжин хвиль у режимі реального часу.

У блоці обробки реалізуються процедури демодуляції, фільтрації та температурної компенсації, що дозволяє сформуванню коректну оцінку деформаційного стану на основі скоригованого спектрального зсуву. Отримані дані використовуються для оцінювання поточних параметрів напружено-деформованого стану конструкції та їх зіставлення з допустимими або прогнозними значеннями.

Інтеграція математичної моделі об'єкта керування в контур системи забезпечує прогнозування динаміки стану конструкції та формування предиктивної інформації, необхідної для реалізації адаптивних алгоритмів керування. На цій основі регулятор формує керуючі дії з урахуванням експлуатаційних обмежень і критеріїв безпеки, які реалізуються через відповідні виконавчі механізми шляхом корекції режимів навантаження або теплового впливу. Закриття інформаційного зворотного зв'язку між об'єктом і вимірювальною підсистемою створює умови для стабільного підтримання допустимого технічного стану конструкції в умовах змінних зовнішніх впливів.

Особливістю запропонованої структури є використання оптоволоконних бреггівських решіток як інтегрованих сенсорів, що забезпечують просторово-часовий конт-

роль напружено-деформованого стану матеріалу без порушення цілісності композитної конструкції, що дозволяє будувати системи автоматичного контролю з багатоканальним зворотним зв'язком, у яких вимірювальна підсистема є невід'ємною частиною контуру аналізу та прийняття рішень.

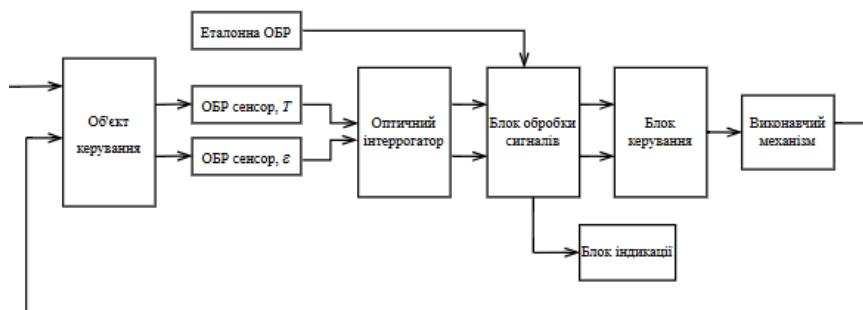


Рисунок 5 – Структурна схема системи моніторингу та контролю напружено-деформованого стану композитних конструкцій

Запропонований підхід є перспективним для застосування в авіаційних, транспортних та енергетичних конструкціях, де поєднання високих питомих характеристик композитів із підвищеними вимогами до експлуатаційної надійності та безпеки має визначальне значення. Отримані результати обґрунтовують доцільність розгляду систем на основі оптоволоконних бреггівських решіток не лише як засобів вимірювання, а як функціональних елементів автоматизованих систем керування технічним станом композитних конструкцій.

В результаті проведених досліджень встановлено, що оптоволоконні сенсори, інтегровані в полімерний композиційний матеріал, зберігають стабільний лінійний характер відгуку в досліджуваному діапазоні механічних навантажень і температурних впливів. Це дає змогу використовувати стандартні калібрувальні залежності для перетворення спектральних зсувів бреггівської довжини хвилі у відповідні фізичні параметри, що спрощує процедури обробки даних і підвищує практичну придатність сенсорних систем.

З позицій практичного впровадження використання оптоволоконних бреггівських решіток відкриває можливості для створення розподілених сенсорних структур, орієнтованих на довготривалий контроль стану відповідальних елементів композитних конструкцій. Такий підхід є особливо актуальним у галузях, де полімерні композиційні матеріали експлуатуються за умов складних навантажувальних і температурних режимів та потребують підвищеного рівня надійності.

Література

1. Talam D. B., El-Badawy El-S. A., Shalaby H. M. H., Ali M. H. EDFA gain flattening using fiber Bragg gratings employing different host materials. *Optical and Quantum Electronics*. 2020. Vol. 52, No. 3. Art. 161.
2. Bhaskar C. V. N., Pal S., Pattnaik P. K. Recent advances in fiber Bragg grating based temperature and strain measurement. *Results in Optics*. 2021. Vol. 5. Art. 100130.
3. Wang H.-P., Dai J.-G., Wang X.-Z. Improved temperature compensation of fiber Bragg grating-based sensors applied to structures under different loading conditions. *Optical Fiber Technology*. 2021. Vol. 63. Art. 102506.

4. Kumar J., Mahakud R., Kumar S., Saini P. K., Prakash O., Dixit S. K., Nakhe S. V. Analysis and experiment on simultaneous measurement of strain and temperature by etched and un-etched FBG pair. *Results in Optics*. 2021. Vol. 5. Art. 100135.
5. Campanella C. E., Cuccovillo A., Campanella C., Yurt A., Passaro V. M. N. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 9. Art. 3115.
6. Zhu Ch., Gerald R., Huang J. Progress toward sapphire optical fiber sensors for high-temperature applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, No. 11. P. 8639–8655.
7. Van Steenkiste R. J. Strain and temperature measurement with fiber optic sensors. Boca Raton, FL, USA CRC Press, 1996. 294 p. ISBN 978-1-56676-480-3.
8. Fernández-Medina A., Frövel M., López Heredero R., Belenguer T., de la Torre A., Moravec C., San Julián R., Gonzalo A., Cebollero M., Álvarez-Herrero A. Embedded fiber Bragg grating sensors for monitoring temperature and thermo-elastic deformations in a carbon fiber optical bench. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 14. Art. 6499.
9. Троицкий В. А., Карманов М. Н., Троицкая Н. В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 2. С. 29–33.
10. Tsai L., Cheng T. C., Chiang C. C., Lin C. L. Application of the embedded optical fiber Bragg grating sensors in curing monitoring of Gr/epoxy laminated composites. *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*. 2009. Vol. 7293. Art. 729307.
11. Невлюдов І. Ш., Токарева О. В. Автоматичне управління технологічними об'єктами. Харків : ХНУРЕ, 2018. 190 с.
12. Сільвестров А. М., Островерхов М. Я., Шефер О. В., Ладік Н. А., Зіменков Д. К. Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 386 с.
13. Powell J. D., Emami-Naeini A. F., Ivler C. M. Feedback control of dynamic systems. 9th ed. Pearson, 2025. 1046 p.
14. Oustaloup A. Control in system dynamics: comparative analysis of feedback strategies. John Wiley and Sons Ltd, 2024. 464 p.

Bibliography (transliterated)

1. Talam D. B., El-Badawy El-S. A., Shalaby H. M. H., Ali M. H. EDFA gain flattening using fiber Bragg gratings employing different host materials. *Optical and Quantum Electronics*. 2020. Vol. 52, No. 3. Art. 161.
2. Bhaskar C. V. N., Pal S., Pattnaik P. K. Recent advances in fiber Bragg grating based temperature and strain measurement. *Results in Optics*. 2021. Vol. 5. Art. 100130.
3. Wang H.-P., Dai J.-G., Wang X.-Z. Improved temperature compensation of fiber Bragg grating-based sensors applied to structures under different loading conditions. *Optical Fiber Technology*. 2021. Vol. 63. Art. 102506.
4. Kumar J., Mahakud R., Kumar S., Saini P. K., Prakash O., Dixit S. K., Nakhe S. V. Analysis and experiment on simultaneous measurement of strain and temperature by etched and un-etched FBG pair. *Results in Optics*. 2021. Vol. 5. Art. 100135.
5. Campanella C. E., Cuccovillo A., Campanella C., Yurt A., Passaro V. M. N. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 9. Art. 3115.

6. Zhu Ch., Gerald R., Huang J. Progress toward sapphire optical fiber sensors for high-temperature applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, No. 11. P. 8639–8655.
7. Van Steenkiste R. J. Strain and temperature measurement with fiber optic sensors. Boca Raton, FL, USA CRC Press, 1996. 294 p. ISBN 978-1-56676-480-3.
8. Fernández-Medina A., Frövel M., López Heredero R., Belenguer T., de la Torre A., Moravec C., San Julián R., Gonzalo A., Cebollero M., Álvarez-Herrero A. Embedded fiber Bragg grating sensors for monitoring temperature and thermo-elastic deformations in a carbon fiber optical bench. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 14. Art. 6499.
9. Troytskyi V. A., Karmanov M. N., Troytskaia N. V. Nerazrushiushchy kontrol kachestva kompozytsyonnykh materyalov. *Tekhnicheskaiia dyagnostyka y nerazrushiushchy kontrol*. 2014. No. 2. P. 29–33.
10. Tsai L., Cheng T. C., Chiang C. C., Lin C. L. Application of the embedded optical fiber Bragg grating sensors in curing monitoring of Gr/epoxy laminated composites. *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*. 2009. Vol. 7293. Art. 729307.
11. Nevliudov I. Sh., Tokarieva O. V. Avtomatychne upravlinnia tekhnolohichnymy ob'ektamy. Kharkiv : KhNURE, 2018. 190 p.
12. Silvestrov A. M., Ostroverkhov M. Ya., Shefer O. V., Ladik N. A., Zimenkov D. K. Suchasni systemy avtomatychnoho keruvannia tekhnolohichnymy kompleksamy. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2023. 386 p.
13. Powell J. D., Emami-Naeini A. F., Ivler C. M. Feedback control of dynamic systems. 9th ed. Pearson, 2025. 1046 p.
14. Oustaloup A. Control in system dynamics: comparative analysis of feedback strategies. John Wiley and Sons Ltd, 2024. 464 p.

УДК 620.067

І. Ш. Невлюдов, д-р техн. наук, професор, В. Є. Овчаренко, д-р техн. наук, професор,
О. В. Токарева, канд. техн. наук, професор

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті розглянуто методи вимірювання та контролю деформацій і температури в полімерних композиційних матеріалах із використанням оптоволоконних бреггівських решіток (ОБР) як інтегрованих сенсорних елементів. Полімерні композиційні матеріали набули широкого застосування в авіаційній, енергетичній, транспортній, машинобудівній, приладобудівній та робототехнічній галузях, де поєднання малої маси, високої питомої міцності та жорсткості супроводжується підвищеними вимогами до надійності та контролю технічного стану конструкцій у процесі експлуатації. З огляду на це актуальним є створення засобів безперервного моніторингу напружено-деформованого та температурного стану композитних елементів без порушення їхньої цілісності.

Запропонований підхід ґрунтується на інтеграції оптоволоконних бреггівських решіток безпосередньо в об'єм полімерного композиційного матеріалу, що забезпечує можливість локального та розподіленого контролю деформаційних і температурних параметрів у режимі реального часу. У роботі проаналізовано фізичні принципи формування бреггівського відбиття, механізми впливу механічних деформацій і температурних змін на спектральні характеристики решіток, а також методи розділення температурної та деформаційної складових вимірювального сигналу на основі використання еталонних сенсорів і алгоритмів компенсації.

Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують лінійність відгуку ОБР у досліджуваних діапазонах навантажень і температур, високу повторюваність вимірювань та добру узгодженість отриманих даних із теоретичними моделями й результатами альтернативних методів контролю. Показано можливість застосування ОБР для одночасного вимірювання деформацій і температури в умовах змінних тепло-механічних впливів.

На основі отриманих результатів розроблено структурну схему системи автоматичного моніторингу та контролю напружено-деформованого стану полімерних композиційних конструкцій. У запропонованій системі оптоволоконні бреггівські решітки виконують функції первинних вимірювальних перетворювачів, формуючи інформаційні сигнали для подальшої цифрової обробки, оцінювання технічного стану та реалізації адаптивних або предиктивних алгоритмів керування. Запропонований підхід створює передумови для переходу від періодичного контролю до безперервного автоматизованого моніторингу та може бути використаний під час проектування інтелектуальних композитних конструкцій з підвищеними вимогами до безпеки та надійності.

Ключові слова: система, моніторинг, контроль, полімерний композиційний матеріал, композитна конструкція, температура, деформація, сенсор, оптоволоконна бреггівська решітка.

I. Sh. Nevlyudov, V. E. Ovcharenko, O. V. Tokarieva

SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL OF THE STRESS–STRAIN STATE OF POLYMER COMPOSITE STRUCTURES

The article addresses methods for measuring and controlling strain and temperature in polymer composite materials using fiber Bragg gratings (FBGs) as integrated sensing elements. Polymer composite materials have found widespread application in the aerospace, energy, transportation, mechanical engineering, instrumentation, and robotics sectors, where the combination of low weight, high specific strength, and stiffness is accompanied by increased requirements for reliability and continuous assessment of the structural condition during operation. In this context, the development of non-invasive tools for continuous monitoring of the stress–strain and temperature state of composite elements is of significant relevance.

The proposed approach is based on the integration of fiber Bragg gratings directly into the volume of the polymer composite material, enabling both local and distributed real-time monitoring of strain and temperature parameters. The paper analyses the physical principles underlying Bragg reflection formation, the mechanisms by which mechanical strain and tem-

perature variations affect the spectral characteristics of the gratings, as well as methods for separating temperature and strain components of the measurement signal using reference sensors and compensation algorithms.

The results of experimental studies are presented, confirming the linear response of FBGs within the investigated ranges of mechanical loading and temperature variation, high measurement repeatability, and good agreement between the obtained data and theoretical models as well as alternative measurement techniques. The feasibility of using FBGs for simultaneous measurement of strain and temperature under variable thermomechanical conditions is demonstrated.

Based on the obtained results, a structural scheme of a closed-loop system for automatic monitoring and control of the stress–strain state of polymer composite structures has been developed. In the proposed system, fiber Bragg gratings perform the functions of primary sensing elements, generating information signals for subsequent digital processing, technical state assessment, and implementation of adaptive or predictive control algorithms. The proposed approach enables a transition from periodic inspections to continuous automated monitoring and can be applied in the design of intelligent composite structures with increased requirements for safety and reliability.

Keywords: system, monitoring, control, polymer composite material, composite structure, temperature, strain, sensor, fiber Bragg grating.

Отримано редколегією 30.09.2025

Невлюдов Ігор Шакирович (Igor Nevliudov), д-р техн. наук, професор, зав. каф. Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0002-3833-9582>;

Овчаренко Віталій Євгенович (Vitalii Ovcharenko), д-р техн. наук, професор, професор Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0009-0006-4114-204X>;

Токарева Олена Віталіївна (Olena Tokarieva), канд. техн. наук, доцент, професор Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0002-0465-9297>.