

ЗАСТОСУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАВАЧІВ В КОРАБЛЕБУДУВАННІ

Л.І. Закалик, С.Ю. Лебідь*

Національний університет
«Львівська політехніка»
м. Львів, вул. С. Бандери, 12
*Львівська філія Європейського
університету
м. Львів, вул. Кушевича, 5
E-mail: solomiya.lebid@gmail.com

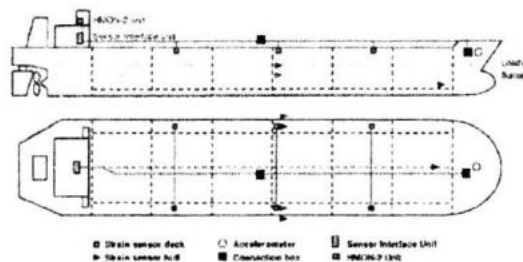
Достатньо давно постає питання доцільності введення новітніх технологій сенсорики в області різних галузей важкої промисловості в світі. Волоконно-оптичні датчики ідеально підходять для роботи в жорстких умовах: високої вібрації; спеки і вологості; у вибухонебезпечних або агресивних середовищах. Стаття аналізує останні дані комерційних моделей волоконно оптичних сенсорів і проводить оцінку доцільності впровадження таких технологій на вітчизняному ринку.

Постановка проблеми. За останні кілька років волоконно-оптичні датчики почали ширше застосовуватися для структурного зондування і моніторингу в таких галузях промисловості як будівництво, аерокосмічній, морській, нафти і газу, композитних матеріалів та систем смарт-структур. Експлуатація волоконно-оптичних датчиків і приладів стала зрозумілою і добре розробленою. Волоконно-оптичні датчики – добрий вибір для неруйнівного контролю (НК), враховуючи їх невеликі розміри, легку вагу і конструкцію з діелектричного скла, що робить їх імунними до електричних перешкод і електро-магнітної інтерференції на відміну від більшості звичайних електронних систем моніторингу.

На сьогодні, волоконно оптичні датчики були впроваджені в композитні матеріали, щоб визначити застигання, внутрішні напруження і деформації, а також для виявлення початкових тріщини і ушкоджень. Закріплені на поверхні пристрої дозволяють в онлайн режимі і в реальному часі моніторингувати деформації і напруження. Крім того, деякі специфічні типи волоконно оптичних датчиків дозволяють багатоточкове зонду-

вання в різних місцях, з використанням одного волокна, або навіть безперервний, розподілений моніторинг температури та деформації на основі систем Рамана чи Бріллюена.

У цій статті розглянуто принципи роботи, типи датчиків та їх застосування для неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій в області кораблебудування. Аналіз останніх досліджень. Для даного аналізу важливі комерційні моделі датчиків, тому розглянуто варіанти наявні на ринку. Компанія SENSFIB Global (Норвегія) пропонує інноваційні волоконно-оптичні датчики для контролю тиску рідини у баках. Ці датчики можна встановити в системі ізоляції резервуарів розрідженого природного газу. Також компанія пропонує волоконно-оптичний датчик розтягу для поверхневого монтажу. Цей тип датчиків однаково добре підходить як для металевих корпусів кораблів, так і для композитних корпусів. Розташування датчиків в системі з локальним та глобальним моніторингом корпусу корабля видно на рис. 1.



Р и с. 1. Розгалужена система моніторингу напружень корпусу корабля компанії SENSFIB Global [1]

Просте рішення для базового моніторингу корпусу корабля (Basic Hull Stress Monitoring – BHSM) відповідає найбільш поширеному класу моніторингу глобальних навантажень (стрес балки). Ця система складається з чотирьох волоконно-оптичних датчиків розтягу і одного волоконно-оптичного вертикального акселерометра [2].

Компанії LxSix Photonics (Канада) і DRS EW & Network Systems Inc. (США) оптимізували величезне замовлення на встановлення системи мережі корабельного зв'язку на основі волоконно-оптичної системи мультиплексування даних (Fiber Optic Data Multiplex System – FODMS)

на військовому кораблі типу руйнівник [3, 4]. FODMS є унікальною подвійно мережевою системою загального призначення, яка забезпечує обмін даними та інтегровані комунікації між двигунами і системою управління живленням, рульового управління, навігаційними датчиками, системою озброєння, сигналізацією, індикаторами та інтегрованими системами мостів, а також бойовими системами. Це є цілісна система передачі інформації, призначеної для вимог корабельних комунікацій та обробки даних, яка є критичною для суднових операцій, підвищення надійності, ремонтпридатності і живучості.

Одним з багатьох завдань моніторингу напружень в корпусі військових кораблів було передчасне виявлення розвитку мікротріщин в матеріалі обшивки. Дослідження, які проводила Морська науково-дослідна лабораторія (Naval Research Laboratory – NRL) полягали в застосуванні кількісного аналізу за допомогою технології волоконно-оптичних датчиків напружень (FOSS technology). Розгалужена система моніторингу складалася з чотирьох розеток з волоконними ґратками брегга (ВГБ), які були встановлені на радіолокаційному містку № 4 (05-316-0-C), де судно раніше виявило передчасні тріщини. Результати моніторингу виявили, що нічне зниження температури – 21 °С, максимальний перепад температур вдень – 60 °С, а найгірший зсув довжини хвилі ґраток у відповідь на зміни температури – 12,6 $\mu\text{e}/^\circ\text{C}$. Це призводить до очевидних розтягів +490 μe (4,9 ksi стрес) [5]. Такий температурний зсув посилить стиск матеріалу після розтягу. В оцінці також були враховані швидкість і маневри корабля під час вимірювань.

Отже, системи моніторингу мають перспективу і рекомендовані для довготермінового впровадження для кращого аналізу навантажень і попередження пошкоджень, що можуть привести до аварійних ситуацій або дорогого ремонту обладнання. Звісно в даному короткому огляді не всі комерційно наявні датчики розглянуто, проте, кількість комерційних варіантів таких систем обмежена, а експериментальна не пройшла

сертифікації, хоча дає надійні і унікальні результати.

Волоконно-оптичні датчики. Тепер з'ясуємо які саме елементи входять в основу комерційних систем датчиків і які варіанти існують на експериментальній стадії.

Волоконно-оптична сенсорна система складається з процесора сигналу, що передає світло до пасивного волоконно-оптичного датчика по оптичному волокну. Датчики, інтегровані з механічними перетворювачами, які реєструють зміни у навколишньому середовищі. Ці зміни в навколишньому середовищі з причинюють передбачувані зміни в характеристиках світла, тобто зміну інтенсивності, фази або поляризації світла, або спектральний зсув, які, відбиваються від датчика назад у процесор сигналу. Модульоване світло перетворюється на сигнал, відповідний до протоколу передачі даних, що і реєструється системою керування.

Компанія DAVIDSON INSTRUMENTS, INC. розробили волоконно-оптичну систему, що вміщає сенсори, які працюють за принципом широкосмугової інтерферометрії, а саме – волоконно-оптичні інтерферометри Фабрі-Перо. Система використовує широкосмугове джерело світла з широким спектром в діапазоні від 600 до 1000 нм. Для будь-якої довжини резонатора Фабрі-Перо, вимірюваний сигнал, що приймається процесором сигналу має піки інтенсивності приблизно на двадцяти чотирьох дискретних довжинах хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_{24}$. Ця сенсорна система має дуже великий динамічний діапазон, тобто система може розпізнати 1 з 15000. Цей великий динамічний діапазон дозволяє системі розпізнати менш ніж 0,01 % від повного діапазону датчика. Вона також має переваги простоти мультиплексування, незалежність від втрат світла, н.р. від пошкодження кабеля, а також те, що датчики можна розміщати на великих відстанях один від одного [6]. Подібні датчики виробляє також компанія FISO (Канада). Цей тип датчиків розтягу дозволяє вимірювати до 10 000 μe натягів з роздільною здатністю < 1 μe .

Іншим типом датчиків для моніторингу надійності матеріалів і великих конструкцій є волоконні ґратки брегга (ВГБ). В деяких випадках ВГБ можуть замінити існуючі методи моніторингу, а часом є єдиною можливістю отримати інформацію про вимірювану величину [7].

ВГБ є фільтрами з перестроюваними довжинами хвилі, чутливими до натягу і температури, що дозволяє їх застосовувати як датчики в області метрології. Їх ключовою перевагою є те, що вимірювана інформація є закодована в довжині хвилі, яка є абсолютною величиною. Це робить датчик незалежним від флуктуації рівня випромінювання так, що система є імунною до потужності випромінювання і втрат світла на конекторах, що шкодить більшості інших типів волоконно-оптичних датчиків. Стандартні фольгові тензодатчики не мають можливості працювати як «абсолютні» давачі, тому це відкриває для ВГБ сенсорів широке поле застосування в дослідженні матеріалів, механіці і будівництві. До інших переваг цих сенсорів належать дистанційна робота, висока чутливість, імунність до електромагнітної інтерференції, атомного випромінювання, вибухових чи хімічно агресивних середовищ і умов низьких чи високих температур. Ще одною перевагою ВГБ є їхній маленький діаметр. Це дозволяє інтеграцію в матеріали або структури, де малі розміри є критично необхідні, такі як внутрішній моніторинг натягу в матеріалах, з високим ступенем локалізації, роздільної здатності і відгуку. Низькі втрати внесення і вузька смуга відбитої або пропущеної довжини хвилі дозволяє зручну мультиплікацію в одномодовому оптичному волокні, що може застосовуватися в будь-якій архітектурі оптичної мережі (зірка, каскад, паралельна, кільце) і змінюватися на протязі часу, що робить систему гнучкою. Отже, ВГБ сенсор дозволяє локалізований, розподілений або квазі-розподілений моніторинг різних матеріалів і структур, таких як мости, дамби, вежі, а також морський, повітряний і космічний транспорт, турбіни електростанцій, лопасті гвинта вітрової енергії і швидкісні автостради.

З іншого боку, проблеми, пов'язані з технологією інтеграції ґраток і зчитуванням сигналу, все ще існують. Зазвичай ґратка вже попередньо навантажена матеріалом перепокриття, що може бути причиною наступним збоєм сенсора. Навіть у випадку ґраток з витяжною вежі треба враховувати вплив матеріалу покриття. Тому, перепокриті акрилатом ґратки не рекомендуються для застосування, в якому обов'язкові довготривалі надійність і стабільність. В неінертних середовищах тріщини утворюються на поверхні покриття через поєднання впливів нагрівки і хімікатів, а особливо води. Перепокриті поліімідом ґратки проявляють майже лінійний температурний відгук в області температур від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. В розчині з $\text{pH} = 13.9$ і під механічним навантаженням 5 Н на протязі більше $3,5$ місяців ґратка з цим типом покриття виявила критичний збій. Покриття ORMOCER® продемонструвало також майже лінійний відгук до термального навантаження від $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після 58 днів в розчині $\text{pH} = 13,7$ і наростаючому статичному навантаженні до $23,5\text{ Н}$ на цьому типі покриття з'явилися тріщини і сенсор був зруйнований.

Сенсори інтегровані в матеріал вимагають дуже точної і підготованої технології впровадження, щоб уникнути небажаних впливів матеріалу на ґратку, таких як загальний стресс після впровадження, мікро згини і точкові навантаження. Як результат таких навантажень, сигнал заінстальованого сенсора може затухати, виявляти двозаломлення, розширення спектру сигналу, підвищення бокових смуг або зсув по довжині хвилі. Через це надійність і довговічність є однаково важливі для індустріального застосування такого типу сенсорів і повинні враховуватися на протязі дизайну, виготовлення і операції сенсорів.

Вченими лабораторії NIST були розроблені, характеризовані, а останнім часом розроблено прилад калібрування для ВГБ датчиків деформації і температури для Морської дослідної лабораторії (NRL). Цей інструмент буде використовуватися для калібрування датчиків деформації пристроїв зачитування, які будуть застосовані на флоті ВМФ. Проект

фінансувався групою флоту координації і калібрування (Navy's Coordination and Calibration Group) [8].

Висновки. Морська дослідна лабораторія (NRL, США) розробила і успішно продемонструвала волоконно-оптичні методи для одночасного точкового вимірювання деформацій з багатьох місць на різних структурах, у тому числі мостах, греблях, корпусах суден і палуби, космічних кораблях, і літаках [8]. Було використано кілька підходів, зокрема волоконні ґратки Бреґґа (FBG) як датчики напружень, в яких зсув оптичної довжини хвилі лінійно пропорційний деформації. Оскільки ВГБ може бути записана з різними початковими бреґґовськими довжинами хвиль в довільних місцях на одному волокні, то тензодатчики можуть бути мультиплексовані і сигнали від цих датчиків можна отримувати з одного волокна. NRL продемонструвала одночасний моніторинг 64 мультиплексованих датчиків. Таке мультиплексування дозволяє обладнати структуру великою кількістю датчиків з невеликим ускладненням самої системи моніторингу та її вартості. Тому що розтяг кодується як зсув довжини хвилі у масивах датчиків ВГБ, немає зміщення базової лінії і абсолютні вимірювання деформації можливо здійснювати без постійного моніторингу. Датчики деформації з ВГБ можуть бути використані в будь-якому випадку, в якому використовуються і звичайні датчики деформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. http://www.ship-technology.com/contractors/controls/light_structures/light_structures2.html.
2. <http://www.lightstructures.no/index.php/products/shipping/hsm/sensfib-global.html>.
3. *LxSix Photonics Completes \$4.0 Million Strategic Investment*, Press release 591148, April 26, 2006, <http://www.marketwire.com/press-release/lxsix-photonics-completes-40-million-strategic-investment-591148.htm>.
4. *DRS Technologies awarded \$7 million contract to provide ship communication network system for the Republic of Korea's Navy, Fiber Optic Sensors and Systems*, 01-MAR-07, http://goliath.ecnext.com/coms2/gi_0199-6450256/DRS-Technologies-awarded-7-million.html.
5. *Nichols J.M.; Seaver M.; Trickey S.T.; Scandell K.C. // Fiber Optic Strain Sensors (FOSS) to Monitor Strains on a Navy Vessel During Operations*, Contract Number: N0001407WX21397, Report Number: A731574, Memorandum rept. 1 Jan-15 Aug 2007.
6. *Berthold J.W. and Needham D.B., Practical Application of Industrial Fiber Optic Sensing Systems // Texas A&M Instrumentation Symposium*, Texas A&M University, January, 2006.
7. *Lebid S., Habel W., Daum W. How reliable measure composite-embedded FBG sensors under the influence of transverse and point-wise deformation // Measurement Science and Technology*. – 2004. – vol. 15. – issue 8. – pp. 1441 – 1447.
8. *Sh. Dyer, NIST delivers high accuracy calibration instrument for Navy optical fiber sensors // http://www.thefreelibrary.com/NIST*.