



УДК: 621.373.826

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ НАВИГАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

USE OF SPECIAL OPTICAL FIBERS TO IMPROVE NAVIGATION EQUIPMENT

Sandler A. K.¹, Ryabtsov O. V.²

National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine¹

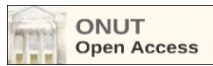
ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0709-0542>, ²<https://orcid.org/0000-0001-8259-7266>

E-mail: ¹albertsand4@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: [10.15673/atbp.v17i4.3271](https://doi.org/10.15673/atbp.v17i4.3271)

Анотація. В останні роки волоконно-оптичні гіроскопи знайшли широке застосування як навігаційні датчики. Завдяки доведеним перевагам, таким як стійкість до електромагнітних перешкод, висока роздільна здатність, невеликі розміри та структурна міцність, волоконні гіроскопи добре зарекомендували себе при вимірах з високою точністю координат морських та повітряних суден. Використання катушки одномодового волокна для виготовлення гіроскопа є простим та економічним. Однак такий датчик має видимість інтерференційної смуги, що швидко зменшується зі збільшенням довжини резонатора через розбіжність пучка, що виходить з одномодового волокна, що підводить. Зменшення видимості інтерференційної смуги може призвести до зниження відношення сигнал/шум і, отже, обмеження максимальної довжини резонатора для деяких додатків, де потрібна велика початкова довжина резонатора або великий динамічний діапазон, наприклад, для моніторингу тріщин і руйнувань в системах моніторингу стану конструкцій. В цілому, видимість інтерференційної смуги гіроскопа визначається розміром сердечника, числової апертурою, модовим розподілом потужності в волокні, що підводить, і довжиною резонатора. Один із способів покращення видимості інтерференційної смуги – використання револьверного оптичного волокна. Ці волокна є унікальним поєднанням низьких оптичних втрат і відносно простої мікроструктури оболонки. Це робить їх виробництво економічно вигідним. Проста, але ефективна конструкція револьверних волокон суттєво знижує витрати на виробництво, не жертвуючи високими оптичними характеристиками. Крім того, раціональним є використання альтернативних типів скломатеріалів виготовлення сенсорних елементів гіроскопів.

Abstract. In recent years, fiber-optic gyroscopes have found wide application as navigation sensors. Due to their proven advantages such as immunity to electromagnetic interference, high resolution, small size and structural strength, fiber gyroscopes have proven themselves well in high-precision measurements of marine and aircraft coordinates. Using a single-mode fiber coil to fabricate a gyroscope is simple and economical. However, such a sensor has an interference fringe visibility that rapidly decreases with increasing resonator length due to the divergence of the beam emerging from the single-mode fiber feed. The reduction in the interference fringe visibility can lead to a decrease in the signal-to-noise ratio and, therefore, a limitation of the maximum resonator length for some applications where a large initial resonator length or a large dynamic range is required, for example, for monitoring cracks and fractures in structural condition monitoring systems. In general, the visibility of the gyroscope interference fringe is determined by the core size, numerical aperture, mode power distribution in the feed fiber, and the length of the resonator. One way to improve the visibility of the interference fringe is to use a revolver optical fiber. These fibers are a unique combination of low optical losses and a relatively simple cladding microstructure. This makes their production economically viable. The simple but effective design of revolver fibers significantly reduces production costs without sacrificing high optical characteristics. In addition, it is rational to use alternative types of glass materials for the manufacture of gyroscope sensor elements.

Keywords: revolving optical fibers, gyroscope, interference fringe, glass material

Ключові слова: револьверні оптичні волокна, гіроскоп, інтерференційна смуга, скломатеріал



Постановка проблеми в загальному вигляді. У сучасному судноплаванні, особливо із застосуванням безпілотних суден, де точність навігації та орієнтації відіграє критичну роль, а також у багатьох інших високотехнологічних галузях, волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) займають все більш важливе місце (рис. 1).



Рис. 1. Безпілотний підводний апарат

Fig. 1. Unmanned underwater vehicle

Вони є значним кроком уперед порівняно з застарілими електромеханічними гіроскопами, які страждають від зносу механічних частин та обмеженої точності. В даний час лазерні гіроскопи широко поширені в аерокосмічних додатках, однак їх надійність залишає бажати кращого через використання газових лазерів, функціонування яких пов'язане з високою напругою та потенційними проблемами з довговічністю. Ці компоненти є потенційною точкою відмови всієї системи, що критично важливо в умовах, де відмова може мати катастрофічні наслідки. Альтернативні технології, такі як системи глобального позиціонування (GPS) та гіроскопи на мікроелектромеханічних системах (MEMS), пропонують свої переваги, але їх точність, швидкість відгуку та загальна надійність часто не відповідають вимогам високоточних додатків. Більше того, GPS піддається впливу атмосферних перешкод і може бути повністю недоступним у певних умовах, наприклад, у закритих приміщеннях, під водою або в районах з інтенсивною радіоперешкодою. Це робить їх непридатними для низки критично важливих завдань, де потрібна автономна та надійна система орієнтації. ВОГ, на відміну від перерахованих вище систем, мають ряд істотних переваг. Відсутність рухомих частин забезпечує високу надійність і довговічність, виключаючи механічне зношування та пов'язані з ним проблеми.

Миттєва готовність до роботи без тривалого періоду "розігріву", характерного для інших типів гіроскопів, значно підвищує оперативність і скорочує час реакції. Гнучкість у налаштуванні чутливості, що досягається зміною довжини волоконного датчика, дозволяє адаптувати ВОГ до різних додатків та вимог. Тим не менш, широке поширення ВОГ стримується двома основними факторами: висока вартість та низька стійкість до теплових та вібраційних навантажень. Ці обмеження обумовлені, в першу чергу, необхідністю використання складних приймально-передаючих пристроїв і спеціальних волокон, здатних зберігати поляризацію оптичного випромінювання, що проходить. Виробництво таких волокон і компонентів вимагає застосування високоточних технологій і коштовних матеріалів, що позначається на кінцевій вартості всього будівництва.

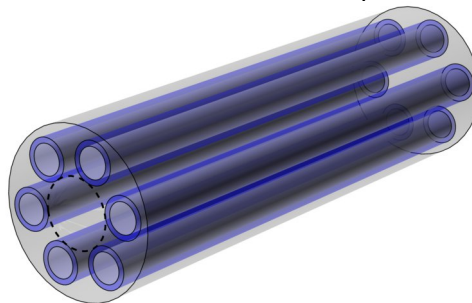


Рис. 2. Структура револьверного оптичного волокна

Fig. 2. Structure of a revolver optical fiber

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Головний аргумент на користь заміни оптичного волокна іншим середовищем у волоконно-оптичному гіроскопі полягає в тому, що перші досліди Санька проводилися в порожній трубці, де повітря з низьким тиском не продемонструвало ефекти, що проявляються в оптичному



волокні. У зв'язку з цим очевидно, що доцільно використання такого оптичного середовища, яке, з одного боку, дозволило б прямувати оптичному випромінюванню, а з іншого боку, не змінювало б його частотних і фазових характеристик. Такі середовища включають фотонні кристали із дефектами. У таких середовищах дефект є порожнистим хвилеводом.

Порожнисті револьверні оптичні волокна (РОВ), що є інноваційною технологією передачі світла, стають об'єктом інтенсивних досліджень (рис. 2).

Їх унікальні властивості відкривають нові горизонти в областях, раніше недоступних для традиційної волоконної оптики, значно покращуючи характеристики різних пристроїв і технологій. Серед таких областей можна виділити газові лазери середнього інфрачервоного діапазону, де РОВ дозволяють досягти безпрецедентної потужності та стабільності випромінювання. Ширококутові джерела світла, засновані на РОВ, демонструють значно більшу смугу пропускання, що критично важливо для високошвидкісної передачі даних та спектроскопічних досліджень [1 - 5].

Можливості нелінійної оптики, наприклад, генерація гармонік та параметричне посилення, також набувають значного поліпшення завдяки унікальним властивостям РОВ. Передача потужних імпульсів без істотних втрат стає реальністю завдяки здатності РОВ ефективно спрямовувати та утримувати світло. Нарешті, компресія імпульсів, необхідна багатьох оптичних системах, досягається з більшою ефективністю з допомогою РОВ. Особливу увагу привертають антирезонансні револьверні порожнисті оптичні волокна (АРРОВ). Ці волокна є унікальним поєднанням низьких оптичних втрат і відносно простої мікроструктури оболонки. Це робить їх виробництво економічно вигідним порівняно з складнішими типами волокон, такими як РОВ з фотонною забороненою зоною. Проста, але ефективна конструкція АРРОВ суттєво знижує витрати на виробництво, не жертвуючи при цьому високими оптичними характеристиками.

Геометрія АРРОВ є системою з кількох тонкостінних скляних трубок, розташованих по колу навколо центральної серцевини, на певній відстані один від одного. Для забезпечення механічної стабільності ці трубки з'єднуються з внутрішньою стінкою підтримуючого капіляра. Цікаво, що сам капіляр майже не впливає на оптичні властивості волокна, зокрема на дисперсію, тому в більшості моделей його вплив можна ігнорувати. Кожна зі скляних трубок підтримує певну кількість оптичних мод, які можна розглядати як кільцеві резонанси. Ефективна напрямна властивість АРРОВ заснована на принципі антирезонансу: якщо моди трубок не узгоджені по фазі з модою серцевини, світло ефективно концентрується в центральній частині волокна, мінімізуючи втрати. Таким чином, скляні трубки діють як антирезонансні елементи (АРЕ), що пригнічують небажані моди та забезпечуючи низькі втрати. Антирезонансний ефект досягається за рахунок інтерференції хвиль, відбитих від внутрішньої та зовнішньої поверхонь трубок, що призводить до утворення смуг пропускання з мінімальними втратами. Ці лінії обмежені спектрально резонансами трубок. Навіть найпростіший тип АРРОВ – трубчасте оптичне волокно (ТОВ) – демонструє всі ключові особливості антирезонансних властивостей: сильні резонанси, зумовлені модами АРЕ, та характерна зміна втрат у смугах пропускання. Це дозволяє використовувати ТОВ як просту та ефективну модель для вивчення властивостей складніших АРРОВ. Останні експериментальні результати, одержані з використанням покращених конструкцій волокон, демонструють позарезонансні втрати всього 7,7 дБ/км у різних спектральних областях. Це видатний результат, що значно перевершує характеристики багатьох традиційних оптичних волокон, і робить АРРОВ надзвичайно привабливими для широкого кола додатків. Низькі втрати відкривають можливості для створення високоефективних оптичних систем на великих відстанях, а також розробки нових пристроїв, що вимагають мінімального рівня загасання сигналів.

Постановка завдання. Мета дослідження – Визначення шляхів вдосконалення характеристик РОВ при застосуванні у навігаційних волоконно-оптичних гіроскопах.

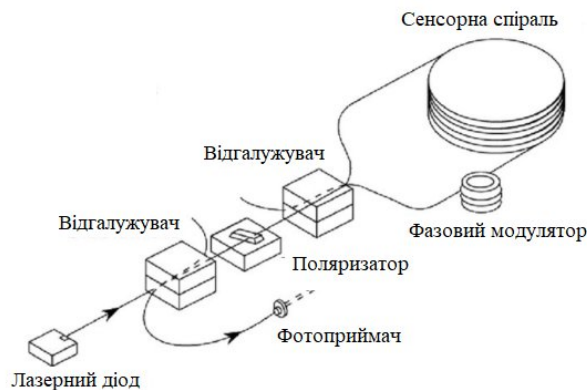


Рис. 3. Схема волоконно-оптичного гіроскопа

Fig. 3. Diagram of a fiber optic gyroscope

Науково-технічне завдання, яке створено запитом практики, вирішується тим, що пропонується волоконно-оптичні гіроскопи для потреб навігації створювати із застосуванням порожнистих револьверних оптичних



волокон. Відмінність пропонованого гіроскопа полягає у тому, для виробництва РОВ застосовані альтернативні скломатеріали, а саме найбільш доцільне з техніко-економічної точки зору скло зі штучного сапфіру.

Викладення матеріалу дослідження. Волоконно-оптичні гіроскопи засновані на ефекті Саньяка який генерує різницю оптичних фаз $\Delta\varphi$, між двома протиспрямованими хвилями в волоконній котушці, яка обертається (сенсорна спіраль) (рис. 3).

Довгий волоконно-оптичний кабель намотується у петлі, щоб збільшити ефективну площу системи. Два промені поширюються волокном у протилежних напрямках. Через ефект Саньяка промінь, що рухається проти обертання, відчуває більш коротку затримку поширення сигналу, ніж інший промінь. Оскільки оптичне випромінювання поширюється в матеріальному середовищі, і воно відноситься до оптичного волокна, виготовленого з кварцу або кварцового скла, такі фізичні явища, як ефект подвійного променезаломлення, ефект Керра, ефект Фарадея несприятливо впливають на кут обертання петлі волоконно-оптичних гіроскопів та фіксовану фазу оптичного сигналу. Ці ефекти, пов'язані з процесом поширення оптичного випромінювання в матеріалі оптичного середовища, призводять до зсуву фаз протиспрямованих хвиль, що не пов'язане з обертанням замкнутої петлі. Диференціальний фазовий зсув, що виходить в результаті, вимірюється за допомогою інтерферометрії, таким чином, переводячи один компонент кутової швидкості в зсув інтерференційного візерунка, який вимірюється фотометрично.

Модифіковані зони РОВ викликають розширення променя, коли він поширюється від одномодового оптичного волокна до РОВ. Розширення променя у поєднанні з осью симетрією та модовими властивостями РОВ уможливує збудження (і рекомбінацію) мод, які мають аналогічну азимутальну симетрію. Моді, які збуджуються в РОВ, мають різні постійні поширення, таким чином вони рухаються з різними швидкостями. В результаті моди накопичують різницю фаз, у міру того, як вони поширюються по РОВ. У зв'язку з збудженням і рекомбінацією мод у пристрої, в результаті інтерференції двох або більшого числа променів у просторі має місце чергування максимумів і мінімумів інтенсивності, тобто виникає система інтерференційних смуг - геометричне місце точок з однаковим інтерференційним ефектом, що відповідає рівним різницям фаз (різницям).

При складанні двох суворо монохроматичних (гармонічних) коливань з однаковою частотою ω : $S_1 = a_1 \sin(\omega t + j_1)$ та $S_2 = a_2 \sin(\omega t + j_2)$, які мають амплітуди a_1 і a_2 , фази $\omega t + j_1$ і $\omega t + j_2$ і різницю фаз $\Delta j = j_1 - j_2$, виникає результуюче коливання з амплітудою A , яка визначається як:

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta. \quad (1)$$

Якщо (1) переписати через інтенсивності I_1 і I_2 коливань, що інтерферують, тобто

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\varphi, \quad (2)$$

де I_1 та I_2 – інтенсивності моди серцевини та моди оболонки;

$\Delta j = 2\pi\Delta nL/\lambda$ - повне зрушення фази;

$\Delta n = n_{co} - n_{cl}$, n_{co} і n_{cl} - ефективні показники заломлення серцевини та оболонки;

L - довжина резонатора;

l – довжина оптичної хвилі у вакуумі.

Вираз (2) – рівняння двопрменевої інтерференції, що визначає розподіл інтенсивності в інтерференційному полі залежно від різниці фаз Δj .

Якість інтерференційного сигналу зазвичай кількісно оцінюється видимістю інтерференційної лінії (або інтерференційним контрастом). У загальному випадку, чим вища видимість інтерференційної смуги, тим вище відношення сигнал/шум і вища точність виміру. Таким чином, видимість інтерференційної лінії (V) можна розрахувати як [6 -10]

$$V = \frac{2\sqrt{I_1I_2}}{I_1 + I_2},$$

Якщо визначати відношення потужностей двох інтерференційних променів як

$$k = I_1/I_2. \quad (3)$$

то видимість смуги можна визначити як

$$V = \frac{2\sqrt{k}}{1+k}. \quad (4)$$

Крок смуг та період (P) інтерференційного візерунка визначається як:

$$P = 2\lambda/(\Delta nL),$$

де L - фізична довжина РОВ; λ – довжина хвилі випромінювання.

З (3, 4) випливає, що видимість лінії зменшується зі збільшенням довжини резонатора, встановлюючи верхню межу довжини резонатора ВОГ. Відомо кілька методів кількісної оцінки відношення I_2 до I_1 і, отже, видимості інтерференційної лінії ВОГ. Найбільш простий метод полягає в оцінці світлового випромінювання як плоскої хвилі, що розходить, з рівномірним розподілом інтенсивності в поперечному перерізі [11 -13].

Виходячи з цієї моделі плоскої хвилі, відношення k визначається як



$$k = \frac{(1 - R)^2 \rho^2}{\rho + 2L \operatorname{tg} \frac{\epsilon}{\epsilon} \sin^{-1} \left(\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \right) \frac{1}{d}}$$

де Γ - радіус серцевини волокна; L - довжина резонатора; n_{co} , n_{cl} - ефективні показники заломлення серцевини та оболонки; R - прикордонний коефіцієнт відбиття.

Вочевидь, що традиційний матеріал волоконної техніки - кварцове скло уже досягло своєї технічної межі в плані збільшення видимості інтерференційної лінії.

Зважаючи на існуючі обмеження, досліджена потенційна можливість застосування альтернативних видів скломатеріалів для створення ВОГ, а саме ситалів, фуллеренів, волокон зі штучного сапфіру та діаманту (рис. 4).

Загальною вимогою до розглянутих оптичних матеріалів, що відрізняються за рядом оптичних і механічних властивостей, є забезпечення експлуатації в екстремальних умовах і підвищеною довговічністю. У якості можливого матеріалу для створення сенсорної спіралі розглянуті такі оптичні матеріали як: штучний діамант, ситали, штучний сапфір та скло на основі фуллеренів.

Матеріалами, що в змозі теоретично суттєво поліпшити характеристики ВОГ при оптимальних розмірах волоконної котушки, є скло на основі фуллерена та штучного технічного діаманта. Але впровадження волокна зі штучного технічного діаманта суттєво обмежується вартістю та технологічними особливостями виробництва.

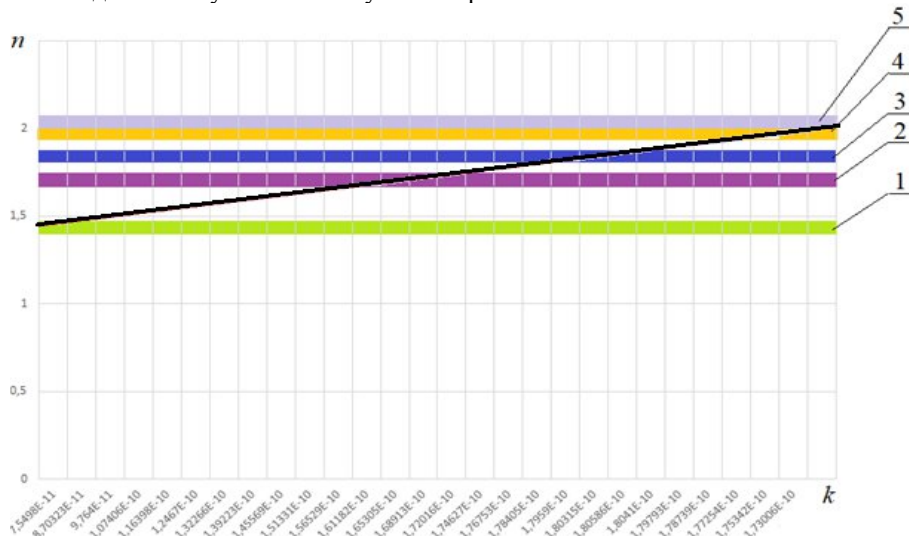


Рис. 4. Залежність коефіцієнту k від показника заломлення n при застосуванні РОВ, виконаного з:

Fig. 4. Dependence of the coefficient k on the refractive index n when using DOM made of

1 - кварцового скла; 2 - ситалового скла; 3 - скла зі штучного сапфіра;

4 - фуллеренового скла; 5 - скла зі штучного технічного діаманту

1 - quartz glass; 2 - sital glass; 3 - artificial sapphire glass;

4 - fullerene glass; 5 - artificial technical diamond glass

При впливі зовнішнього світла та повітря властивості фуллерен кардинально змінюються - скломатеріал починає хімічно взаємодіяти з абсорбованим киснем і окиснюватися. Крім впливу світла, утворення хімічних зв'язків між фуллереном і киснем сприяє термічний вплив на фуллерен на повітрі. У випадку створення пристроїв на основі суміші фуллерена й іншого підданого впливу кисню органічної речовини, буде відбуватися значна зміна властивостей усього пристрою у зв'язку з неоднаковою зміною властивостей фуллерена й цієї речовини під дією кисню. Іншої важливою особливістю фуллерена є його схильність до полімеризації й олигомеризації під дією тиску. При цьому в основному відбувається димеризація (сполучення двох однакових або різних з утворенням димеру -двомолекулярного комплексу) й лінійна полімеризація залежно від ступеня впливу. Збереження характеристик волокна з фуллерену потребує наявності захисної оболонки з наноматеріалів. Але захисна оболонка може викликати спотворення чутливості ВОГ.

Волокна з ситалового скла, незважаючи на високу міцність на стиск та вигин, чутливі до різких ударних впливів, особливо при неправильній термообробці. Процес об'ємної кристалізації вимагає точного підбору складу та термічного режиму. Це робить виробництво більш складним та коштовним у порівнянні зі звичайним склом. Для оптичних застосувань потрібна спеціальна модифікація збільшення прозорості, що знову ж таки збільшує вартість.

Тому у якості матеріалу, що забезпечує необхідні характеристики, при знаходженні у припустимому діапазоні геометричних розмірів, найбільше раціонально використовувати стекла на основі штучного сапфіру [14 - 20]. Застосування такого скла дозволить майже у 0,25 рази збільшити видимість інтерференційної лінії, що



позитивно вплине на точність вимірювань ВОГ.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Видимість смуг у ВОГ зменшується залежно від довжини резонатора через розбіжність променю, що виходить зі звичайного одномодового волокна, що призводить до обмеженого динамічного діапазону гіроскопу. Одним зі способів збільшення динамічного діапазону є зменшення розбіжності променю світла - це застосування РОВ з сапфірового скла. Підсилити цей ефект може використання волокна з градієнтним профілем показника заломлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аль-Судані Хайдер Алі. Застосування фотонно-кристалічних волокон у навігації // *Technology audit and production reserves* - 2015. - № 2/1(22). - С. 43 – 47. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41416.
2. Рябцов, О. В. Організаційне вдосконалення технічної експлуатації волоконно-оптичних гіроскопів для суднових систем динамічного позиціонування // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 79 - 92.
3. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.
4. Sandler, A., Budashko, V. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. - 2022. - №. 5 (119). - P. 25 - 33. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266267.
5. Сандлер, А. К., Омельченко, Т. Ю. Застосування новітніх типів оптичного волокна у навігаційних підводних безпілотних апаратах // *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: с avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025*. Paris-Vinnytsia: La Fedelta & UKRLOGOS Group LLC, 2025. - С. 214 - 221. DOI 10.36074/logos-04.04.2025.
6. Zeisberger, M., Hartung, A., Schmidt, M. A. Understanding Dispersion of Revolver-Type Anti-Resonant Hollow Core Fibers // *Fibers*. - 2018. - № 4:68. DOI:10.3390/fib6040068.
7. Hassan, M. R. A., Yu, F., Wadsworth, W. J., Knight, J. C. Cavity-based mid-IR fiber gas laser pumped by a diode laser // *Optica*. - 2016. № 3. - P. 218 – 221.
8. Wang, Z.; Belardi, W.; Yu, F.; Wadsworth, W. J.; Knight, J. C. Efficient diode-pumped mid-infrared emission from acetylene-filled hollow-core fiber // *Opt. Express*. - 2014. - № 22. - P. 21872 -21878.
9. Sollapur, R., Kartashov, D., Zürich, M., Hoffmann, A., Grigороva, T., Sauer, G., Hartung, A., Schwuchow, A., Bierlich, J., Kobelke, J.; et al. Resonance-enhanced multi-octave supercontinuum generation in antiresonant hollow-core fibers // *Light Sci. Appl.* - 2017. - № 6.
10. Russell, P. S. J., Hölzer, P., Chang, W., Abdolvand, A., Travers, J. C. Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics // *National Photonics*. - 2014. - № 8. - P. 278 -286.
11. Zhang, Y. Fringe Visibility Enhanced Extrinsic Fabry-Perot Interferometer Using a Graded Index Fiber Collimator // *IEEE Photonics Journal*. - 2010. - Vol. 2. - № 3. - P. 469 - 481. DOI:10.1109/jphot.2010.2049833.
12. K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar, R. O. Claus, B. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors // *Optical Letters*. - 1991. - vol. 16. - № 4. - pp. 273 - 275.
13. V. Arya, M. de Vries, K. A. Murphy, A. Wang, R. O. Claus, Exact analysis of the extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor using Kirchhoff's diffraction formalism // *Opt. Fiber Technol.* - 1995. - vol. 1. - № 4. - pp. 380 -384.
14. Сандлер, А. К. Оптимізація конструктивних параметрів волоконного акселерометру // *Slovak international scientific journal*. – 2020. – № 42. –VOL.1. – P. 25 - 31.
15. Сандлер, А. К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу // *Автоматизація суднових технічних засобів*. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ ОМА. – С. 79 - 89. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89.
16. Mohan Wang, Patrick S. Salter, Frank P. Payne, Adrian Shipley, Stephen M. Morris, Martin J. Booth, and Julian A. J. Fells. Single-mode sapphire fiber Bragg grating // *Optics Express*. - 2022. - Vol. 30. - Issue 9. - pp. 15482-15494. <https://doi.org/10.1364/OE.446664>
17. Chen, W. Ring-core photonic crystal fiber interferometer for strain measurement // *Optical Engineering*. – 2010. – Vol. 49 (9). – P. 094402. DOI: 10.1117/1.3488045.
18. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics*. - 2023. - Vol. 5. - № 5(125). - P. 24 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061. 2023. 289773.
19. T. Habisreuther, T. Elsmann, Z. Pan, A. Graf, R. Willsch, M. A. Schmidt. Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics // *Appl. Therm. Eng.* - 2015. - №91. Pp. 860 -865.

**REFERENCES**

1. Al'-Sudani Khayder Ali. Zastosuvannya fotonno-krystalichnykh volokon u navihatsiyi // Technology audit and production reserves - 2015. - № 2/1(22). - С. 43 – 47. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41416.
 2. Ryabtsov, O. V. Orhanizatsiynе vdoskonalennya tekhnichnoyi ekspluatatsiyi volokonno-optychnykh hiroskopiv dlya sudnovykh system dynamichnoho pozytsionuvannya // Avtomatyzatsiya sudnovykh tekhnichnykh zasobiv: nauk.-tekhn. zb. – 2025. – Vyp. 30. – Odesa: NUOMA. – S. 79 - 92.
 3. Sandler, A. K. Metod pidvyshchennya efektyvnosti diahnostuvannya tekhnichnoho stanu sudnovykh hazoturbinykh ustanovok na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.20 / Kyivivs'kyy universytet infrastruktury ta tekhnolohiy. – K., 2021. – 20 s.
 4. Sandler, A., Budashko, V. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2022. - №. 5 (119). - P. 25 - 33. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266267.
 5. Sandler, A. K., Omel'chenko, T. YU. Zastosuvannya novitnikh typiv optychnoho volokna u navihatsiynykh pidvodnykh bezpilotnykh aparatakh // Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC, 2025. - S. 214 - 221. DOI 10.36074/logos-04.04.2025.
 6. Zeisberger, M., Hartung, A., Schmidt, M. A. Understanding Dispersion of Revolver-Type Anti-Resonant Hollow Core Fibers // Fibers. - 2018. - № 4:68. DOI:10.3390/fib6040068.
 7. Hassan, M. R. A., Yu, F., Wadsworth, W. J., Knight, J. C. Cavity-based mid-IR fiber gas laser pumped by a diode laser // Optica. - 2016. № 3. - P. 218 – 221.
 8. Wang, Z.; Belardi, W.; Yu, F.; Wadsworth, W. J.; Knight, J. C. Efficient diode-pumped mid-infrared emission from acetylene-filled hollow-core fiber // Opt. Express. - 2014. - № 22. - P. 21872 -21878.
 9. Sollapur, R., Kartashov, D., Zürich, M., Hoffmann, A., Grigороva, T., Sauer, G., Hartung, A., Schwuchow, A., Bierlich, J., Kobelke, J., et al. Resonance-enhanced multi-octave supercontinuum generation in antiresonant hollow-core fibers // Light Sci. Appl. - 2017. - № 6.
 10. Russell, P. S. J., Hölzer, P., Chang, W., Abdolvand, A., Travers, J. C. Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics // National Photonics. - 2014. - № 8. - P. 278 -286.
 11. Zhang, Y. Fringe Visibility Enhanced Extrinsic Fabry-Perot Interferometer Using a Graded Index Fiber Collimator // IEEE Photonics Journal. - 2010. - Vol. 2. - № 3. - P. 469 - 481. DOI:10.1109/jphot.2010.2049833.
 12. K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar, R. O. Claus, BQuadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors // Optical Letters. - 1991. - vol. 16. - № 4. - pp. 273 - 275.
 13. V. Arya, M. de Vries, K. A. Murphy, A. Wang, and R. O. Claus, BExact analysis of the extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor using Kirchhoff's diffraction formalism // Opt. Fiber Technol. - 1995. - vol. 1. - № 4. - pp. 380 -384.
 14. Sandler, A. K. Optymizatsiya konstruktyvnykh parametriv volokonnoho akselerometru // Slovak international scientific journal. – 2020. – № 42. –VOL.1. – R. 25 - 31.15.
 15. Sandler, A. K. Zastosuvannya al'ternatyvnykh sklomaterialiv dlya datchykv deformatsiyi ta vibratsiyi elementiv propul'syvnoho kompleksu // Avtomatyzatsiya sudnovykh tekhnichnykh zasobiv. – 2023. – Vyp. 28. – S. 79 - 89. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89.
 16. Mohan Wang, Patrick S. Salter, Frank P. Payne, Adrian Shipley, Stephen M. Morris, Martin J. Booth, and Julian A. J. Fells. Single-mode sapphire fiber Bragg grating // Optics Express. - 2022. - Vol. 30. - Issue 9. - pp. 15482-15494. <https://doi.org/10.1364/OE.446664>
 17. Chen, W. Ring-core photonic crystal fiber interferometer for strain measurement // Optical Engineering. – 2010. – Vol. 49 (9). – P. 094402. DOI: 10.1117/1.3488045.
 18. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. - 2023. - Vol. 5. - №. 5(125). - P. 24 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061. 2023. 289773.
 19. T. Habisreuther, T. Elsmann, Z. Pan, A. Graf, R. Willsch, M. A. Schmidt. Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics // Appl. Therm. Eng. - 2015. - №91. Pp. 860 -865.
- Отримана в редакції 21.11.2025. Прийнята до друку 08.12.2025. Received 21 November 2025. Approved 08 December 2025. Available in Internet 30 December 2025