

УДК 681.7.068.4

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-141-152

ARTICLE HISTORY

Received 21.04.2026

Accepted 11.05.2026

Сандлер Альберт Кирилович¹, Парменова Дана Георгіївна²
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна
sa@onma.edu.ua¹, parmenova-dg@onma.edu.ua²

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВАЛІВ ГРЕБНИХ ГВИНТІВ

Sandler Albert¹, Parmenova Dana²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
sa@onma.edu.ua¹, parmenova-dg@onma.edu.ua²

FIBER OPTIC SENSOR FOR CONTROLLING PROPELLER SHAFTS

Резюме. Проаналізовано вимоги щодо метрологічного забезпечення процесу тензометрії гребних валів сучасних суден. Аналітичним дослідженням встановлено, що схемотехнічних рішень в області волоконно-оптичних тензометрів, які повною мірою задовольняють вимогам до якості контролю валопроводів ГВ, до останнього часу не було відомо. Для подолання цієї проблеми запропоновано нове схемотехнічне рішення волоконно-оптичного датчика для контролю величин крутіння гребних валів. Основна відмінність датчика полягає у застосуванні закритого оптичного каналу на основі оптичного тунельного ефекту з одночасною деформацією зсуву та вигину чутливого елемента. Це забезпечить зменшення впливу дестабілізуючих експлуатаційних факторів на точність та вірогідність вимірювань.

Summary. The requirements for metrological support of the process of tensometry of propeller shafts of modern vessels have been analyzed. Analytical research has established that until recently, circuit solutions in the field of fiber-optic strain gauges that fully meet the requirements for the quality control of propeller shafts were not known. To overcome this problem, a new circuit solution of a fiber-optic sensor for controlling the values of propeller shaft rotation has been proposed. The main difference of

the sensor is the use of a closed optical channel based on the optical tunnel effect with simultaneous shear and bending deformation of the sensitive element. This will ensure a reduction in the impact of destabilizing operational factors on the accuracy and reliability of measurements.

У сталому режимі роботи, під час одночасного впливу крутного моменту від суднового двигуна та гребного гвинта, амплітуди крутильних коливань гребного валу (ГВ) можуть виникати як у межах, так і поза резонансним діапазоном. Під час цього процесу стала величина кута закручування може тривалий час суттєво перевищувати припустимі величини [1, 2]. Резонансні явища, що виникають у валопроводах внаслідок розвитку крутильних коливань, є джерелом виникнення техногенних аварій, які можуть мати катастрофічні наслідки [3]. Тому протидія деструктивному процесу виникнення небезпечних крутильних коливань напряму обумовлює стан безпеки життєдіяльності на морі.

Стандарт ISO 3046-5:2001 вимагає врахування внеску усіх гармонійних складових крутильних коливань у всьому діапазоні частот обертання валопроводу [4].

Сучасні засоби та пристрої для тензометрії ГВ працюють у складних умовах, що характеризуються впливом дестабілізуючих факторів (ДФ). Серед них – концентровані електромагнітні та теплові поля, вібрації, а також потужний локальний вплив суднового енергетичного обладнання [5 - 9]. Вплив ДФ на існуючі тензодатчики відбувається у такий спосіб.

Волоконно-оптичний тензодатчик містить випромінюючий відрізок волоконного світловода 1, що грає роль джерела випромінювання, до якого надходить випромінювання від лазера або світлодіода 2, і приймального волоконного світловода 3 (рис. 1) [10].

Приймальний світловод грає роль фотоприймача, з виходу якого випромінювання 4 реєструється приймачем випромінювання. Обидва відрізки волоконного світловода мають світловодну серцевину 5 і оболонку 6. Обидва відрізки світловода закріплюються клеєм 7 або іншим способом на поверхні контрольованого об'єкта. При цьому відстань між кріпленнями світловода становить вимірювальну базу L значення якої вибирається з максимального значення деформації розтягування-стиснення конкретного контрольованого об'єкта. Для того, щоб осі відрізків волоконних світловодів збігалися при зміні відстані між торцями світловодів при зміні деформації, світловоди розміщуються у вільно розташованій на поверхні об'єкта контролю втулці 8, в якій вони можуть переміщатися.

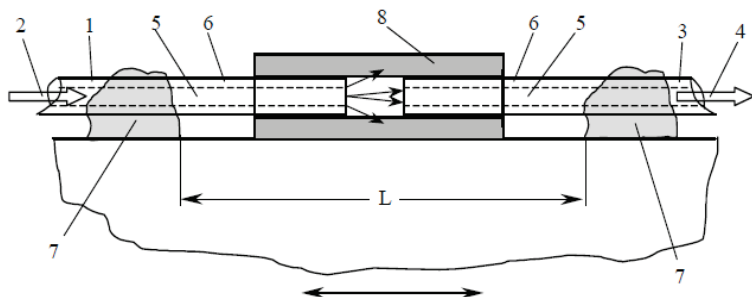


Рис. 1. Схема волоконно-оптичного тензодатчика торцевої схеми: 1 – відрізок випромінюючого світловоду; 2 – випромінювання, що вводиться у світловід; 3 – відрізок приймального світловоду; 4 – випромінювання, що потрапляє на фотоприймач; 5 – сердцевина світловода; 6 – оболонка світловода; 7 – пристрій кріплення світловода на поверхні об'єкта контролю; 8 – втулка, що центрує. Стрілка внизу показує характер деформації об'єкта

Принцип роботи перетворювача заснований на тому, що випромінювання з хвильоводу розходить у апертурному куті i , у міру віддалення від випромінюючого торця світловода, енергетична освітленість буде зменшуватися, і, отже, зменшуватиметься сигнал, що реєструється.

Оскільки абсолютні значення деформації розтягування і стиснення при прийнятних значеннях вимірюваної бази становлять лише одиниці або сотні мікрометрів, для підвищення чутливості тензодатчика простір між вихідним кінцем випромінюючого волокна і вхідним кінцем приймального волокна заповнений рідиною з великим коефіцієнтом поглинання на довжині хвилі випромінювання.

Однак, з рис. 1 також впливає, що відкриті торцеві поверхні піддаються деструктивному впливу в процесі експлуатації. Серед факторів, що сприяють руйнуванню оптичних волокон, слід виокремити вплив вологи, кислотного та лужного середовища, а також механічні дії на їхню поверхню.

Але у [7, 11] зазначено, що ДФ та рідина заповнення значним чином впливають на стан торцевих поверхонь оптичних волокон. Це негативно відбивається на параметри та характеристики випромінювання у оптичній системі датчика. Окрім механічних ушкоджень, які спричиняють виникнення подряпин і шорсткостей, існують й інші причини появи неоднорідностей. Зокрема, це може бути

забруднення поверхні, проникнення і конденсація вологи під час різких температурних перепадів, а також деформації поверхонь під дією механічних впливів.

Руйнування скляних матеріалів під впливом вологи та високих температур обумовлене стимульованим гідролізом. У результаті цього процесу молекула води поетапно інтегрується в напружений зв'язок Si-O-Si, розриваючи його і створюючи нові зв'язки через атоми водню. Весь процес відбувається в поверхневому шарі скла. Для відкритих поверхонь скла порушення місткового зв'язку між іонами кремнію утворює два нестабільні різнозаряджені радикали. Ці радикали вирізняються високою реактивністю до молекул оточуючого середовища, особливо до H_2O . У результаті атом кремнію зв'язується з групою OH, що формує угруповання Si-OH, відоме як силанол. Силанольні групи характеризуються хімічною активністю – іон водню H може легко переміщуватися та замінюватися іншими функціональними сполуками. Таким чином, на поверхні скла можуть утворюватися інші оксиди, а за певних умов навіть формуватися цілі шари. Згодом на поверхні адсорбуються молекули води, що досягають динамічної рівноваги з водяною парою у навколишньому середовищі. Хімічно зв'язаний шар води має товщину близько 10^{-10} см і називається постійним гідратованим поверхневим шаром. Механізми водної (гідролітичної) та кислотної корозії мають схожість: у обох випадках основна дія спрямована на катіони-модифікатори, передусім на реакційно активні лужні іони. Якщо в звичайному склі гідролітична та кислотна корозія є незначними, то лужні розчини викликають значну деградацію більшості видів скла, руйнуючи навіть їх сітчасту структуру. Інтенсивність цього процесу зростає експоненціально зі збільшенням концентрації лугу та температури. Після завершення реакції з лугами на поверхні процес переходить у глибші шари скла, проникаючи через сітчасту структуру силікатів. Таким чином, подальша деградація набуває дифузійного характеру. Цей механізм стає ще більш активним за умов підвищеної температури та збільшеного вмісту лужних компонентів у склі. Утворений у процесі реакції шар поступово потовщується, сприяючи зростанню пористості та площі поверхні скла. Ця пориста поверхня активно адсорбує воду навіть фізичним шляхом завдяки капілярним силам. У результаті вилужений верхній шар скла розбухає, утворюючи гель кремнієвої кислоти товщиною до 100 ... 200 нм. Зі збільшенням товщини і пористості вилуженого шару корозійний процес може поширюватися на нижчі структури скла, що зрештою призводить до його поступового руйнування. В умовах обмеженої вологості хід реакцій змінюється.

Початковий гідроліз із чистою водою переходить у лужну взаємодію, інтенсивність якої зростає при підвищенні температури. Лужний вплив призводить до руйнування кремнеземистого каркаса скла, формуючи на його поверхні пошкоджений шар. Очевидно, що утворення постійних деструктурованих поверхневих шарів сприяє зміні шорсткості крайових оптичних поверхонь. Дослідження цього процесу демонструють, що із підвищенням шорсткості поверхні вхідного торця оптичного волокна змінюється ефективність введення випромінювання та його модовий склад [7].

Крім того у датчиках з відкритим оптичним каналом відсутня можливість компенсації температурних коливань зовнішнього середовища.

Таким чином, як мету дослідження доцільно зазначити забезпечення високої ефективності використання та надійності роботи валів гребних гвинтів через впровадження новітніх засобів діагностування та прогнозування технічного стану, які забезпечують підвищення вірогідності процесів діагностування валів за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання

Особливості впливу ДФ на параметри волоконно-оптичного тензодатчикув дозволив конкретизувати відмінності, які мають бути притаманні новому схемотехнічному рішенням вимірювального пристрою. Для вдосконалення експлуатаційних характеристик у розроблюваному тензометрі:

- вимірювальний оптичний канал повинен бути закритим який базується на одномодових світловодах. Це пов'язано з тим, що такі світловоди забезпечують більший діапазон зміни сигналу проти багатомодових при однакових значеннях амплітуди деформації;
- забезпечена інваріантність до ДФ;
- збережено надійність, чутливість та простота схемотехнічних рішень тензометрів відомих типів.

Суть запропонованого конструктивного рішення вдосконаленого датчика полягає у застосуванні закритого оптичного каналу на основі оптичного тунельного ефекту з одночасною деформацією зсуву та вигину чутливого елементу. На рис. 2 представлена схема такого датчика.

Основою запропонованого датчика є комбінований світловод, який складається з первинного стрижневого світловоду 3 та вторинного коаксіального світловоду, що вкриті загальною захисною оболонкою 5.

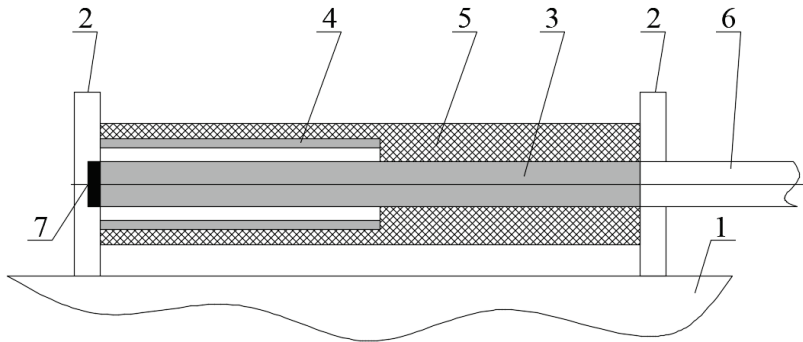


Рис. 2. Волоконно-оптичний датчик на основі оптичного тунельного ефекту: 1 – гребінний вал; 2 – жорсткі опори; 3 – первинний стрижневий світловід; 4 – вторинний коаксіальний світловід; 5 – загальна захисна оболонка; 6 – біскляний термокомпенсуючий світловід; 7 – віддзеркалюючий шар

Первинний світловід жорстко зафіксований у опорах 2, які монтується на ГВ 1. Вторинний світловід жорстко зафіксований одним кінцем лише на одній опорі. Між первинним світловідом та волоконно-оптичною лінією зв'язку вбудовано ділянку біскляного термокомпенсуючого світловоду 6. Зміна величини вигину під впливом температури бути ініціювати зміну величини оптичного випромінювання, що залишає біскляний світловід. Також первинний світловід на одному з торців має віддзеркалюючий шар 7.

При виникненні у ГВ деформацій зсуву опори також зсуваються одна по відношенню до іншої. В наслідок чого у первинному світловіді відбуваються деформації зсуву та вигину за спіральною траєкторією. Процеси, які відбуваються, знаходять своє відбиття у зміні показника заломлення первинного світловоду та процесу тунелювання оптичної потужності з первинного до вторинного світловоду.

Величина зміни показника заломлення при згинанні та крученні ОВ [12, 13]

$$n^* = n_0 + \frac{1}{2n_0} (-2\chi\rho\cos\varphi + \chi^2\rho^2\cos^2\varphi + \nu^2\rho^2),$$

де n_0 – показник заломлення ненапруженого оптичного волокна;

χ і ν – параметри кривизни та кручення осі, вигнутого по спіралі ОВ

$$\chi = \frac{R}{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2}; \nu = \frac{p}{2\pi} \frac{1}{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2},$$

φ – кут, який відрховується від осі $x(\xi)$;

R, p – радіус вигину осі ОВ і крок спіралі відповідно.

Тоді коефіцієнт оптичного тунельного зв'язку між первинним та вторинним світловодами

$$C = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{(\beta^2 - k^2 n_2^2) d \rho^2}} \frac{\rho \sqrt{(k^2 n_2^2 - \beta^2)} \exp\left(-\left(\sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}\right) d\right)}{(k \rho (n_2^2 - n_1^2))^2 K_1^2\left(\rho \sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}\right) d},$$

де n_2 – показник заломлення вторинного світловода;

k – хвильове число;

K_1 – функція Бесселя;

β – різниця постійних поширення у первинному та вторинному світловодах;

А величина оптичної потужності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається до фотоприймача може буде визначена як

$$P_R(z) = \left[1 - \frac{\sin^2 CL \sqrt{1 + \left[\frac{(\beta_R - \beta_T + \beta_E + \beta_H)}{2C} \right]^2}}{1 + \left[\frac{(\beta_R - \beta_T + \beta_E + \beta_H)}{2C} \right]^2} \right] P_0, \quad (1)$$

де P_0 – сумарна потужність, уведена в коаксіальну структуру;

β_R – стала поширення у первинному світловоді;

β_T – постійна поширення у вторинному світловоді;

β_E – збільшення постійної поширення через еліптичність коаксіальної структури;

β_H – збільшення постійної поширення через збурювання, що порушують циркулярну симетрію коаксіальної структури;

L – довжина коаксіальної ділянки комбінованого світловоду.

Функція перетворення, побудована за (1) надана на рис. 3.

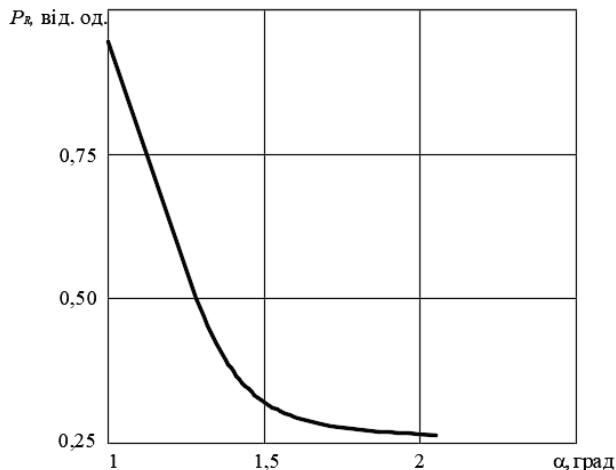


Рис. 3. Залежність оптичної потужності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару, від величини кута крутіння для світловоду з сапфірового скла

У той самий час результати моделювання показників первинного світловоду, як чутливого елемента тензометра, при впливі зсувних деформацій показують, що з теорії пружності, максимальне значення показника заломлення спостерігається біля зовнішньої межі світловода. Тільки застосування штучного сапфіру як матеріал для виготовлення первинного світловоду дозволяє досягти високих значень власних частот за збереження стандартного розмірного ряду [14, 15]. Для розширення найбільш раціонального одномодового режиму тензометру пропонується використовувати первинний світловід із депресованою серцевиною. Зниження показника заломлення серцевини дозволяє зменшити кількість симетричних хвиль, що поширюються, з чотирьох до двох.

Для інших профілів показника заломлення, на критичних частотах спостерігається витік оболонкових хвиль у зовнішнє середовище, оскільки порушується умова повного внутрішнього відображення на межі "оболонка - навколишнє середовище". Причому витік у довкілля починається раніше, ніж у внутрішню область. У такому випадку то порушення умови повного внутрішнього відображення відбувається спочатку на межі "серцевина - оболонка", а не на кордоні "оболонка - навколишнє середовище". Це призводить до початку "втікання" хвиль у серцевину світловода

Таким чином, запропонований тезодатчик у змозі забезпечити більш вірогідні результати моніторингу стану валів гребних гвинтів за рахунок більшої стійкості до впливу ДФ завдяки застосуванню закритому оптичному каналу. Крім того, застосування біскляного термокомпенсуючого світловода дозволить суттєво нівелювати вплив темних полів суднового обладнання.

До додаткових переваг вдосконаленої моделі тензометра слід віднести адаптивність щодо вибору локальних робочих точок для кожного каналу дистанційного контролю. Це дозволяє розробляти оптимальні конфігурації інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи на основі волоконно-оптичних технологій. Подальший розвиток такого підходу полягає у застосуванні мережі пристроїв для діагностування усього пропульсивного комплексу та самоідентифікації та автодіагностики вимірювальних пристроїв із застосуванням новітніх типів оптичного волокна [16 - 22].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Кардашев, Д. Л., Аболешкін, С. Є. Оцінка величини усталеного кута закручування гребного вала // Суднові енергетичні установки. — 2025. — № 51. — С. 4 - 9.
2. Сагін, С. В., Парменова, Д. Г. Діагностування технічного стану суднових дизелів // Суднові енергетичні установки. — 2025. — № 51. — С. 66 - 77.
3. Парменова, Д. Г. Анализ аварийных ситуаций с судами морского флота // Судовождение. — 2014. — № 24. — С. 134 -140.
4. ISO 3046-5:2001 Reciprocating internal combustion engines — Performance — Part 5: Torsional vibrations.
5. Кулешов, І. М. Парменова, Д. Г., Мамкічев, М. А. Аналіз аварійності світового морського торговельного флоту у 2020-2021 роках // Матеріали науково-технічної конференції "Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт", 24.03.2022 – 25.03.2022. — Одеса: НУ "ОМА". — 2022. — С. 141 – 143.
6. Клюев, В. В. Технические средства диагностирования. — М.: Машиностроение, 1989. — 671 с.
7. 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 / К., Київський університет інфраструктури та технологій. – 2021. – 20 с.

8. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій. – Одеса: Видатінформ НУ "ОМА", 2018. – 165 с.

9. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. Засіб діагностування поршневих кілець // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: ОНМА. – С. 64 - 70.

10. Сандлер, А. К. Моделирование акселерометра маятникового типа // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – №1. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 75 - 81.

11. Борисов, В. И., Силутина, Е. М., Шилова, И. В. Волоконно-оптический тензодатчик. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/volokonno-opticheskiy-tenzodatchik>.

12. Snyder, A., Love, D. Theory of optical waveguides. URL: <https://epdf.tips/optical-waveguide-theory.html>.

13. Ovchinkin. A. V., Sinitca. P. I., Malov. A. N. The stress-deformed state of the optical fiber due to buffer gel freezing. // "Proceedings of the First Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics – APCOM'2000". –2000. – P. 60 - 67.

14. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ"ОМА". – 2019. – С. 27 - 33.

15. Bo Liu, Zhihao Yu, Cary Hill, Yujie Cheng, Daniel Homa, Gary Pickrell, and Anbo Wang. Sapphire-fiber-based distributed high-temperature sensing system // Opt. Lett. – 2016. – № 41. – P. 4405-4408.

16. 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.

17. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. – М.: Мир, 1984. – 512 с.

18. E. Udd, W. B. Spillman Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. London: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.

19. Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S. Yu. Fiber Optic Sensors. – London: CRC Press, 2017. – 492 p.

20. E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids. – San Diego: Academic Press, 1997. – 337 p.

21. Сандлер, А. К., Рябцов, О. В. Застосування спеціальних оптичних волокон для вдосконалення навігаційного обладнання // Automation of Technological and Business Processes. – 2025. – № 17 (4). – С. 11 - 17.

22. M. V. Levinskyi, O. O. Petrychenko, S. Goolak, V. Lukosevicius. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – Vol. 17(5). – P. 2141.

Abstract. Modern tools and devices for tensometry of propeller shafts operate in difficult conditions, characterized by the influence of destabilizing factors. Among them are concentrated electromagnetic and thermal fields, vibrations, as well as the powerful local influence of ship power equipment. These disturbances significantly complicate or even make it impossible to effectively diagnose and predict the technical condition of shaft lines with respect to torsional vibrations. Analysis of modern solutions demonstrates the need for modern means of tensometry that would meet the requirements of modern technical operation and repair. First of all, these are fiber optics devices that are insensitive to most destabilizing factors (DF) inherent in operating conditions. At the same time, an analysis of literary sources showed that until recently, circuit solutions in the field of fiber-optic tensometers that fully meet the requirements for the quality control of shaft lines of ships were not known. Thus, the development and research of a new fiber-optic strain gauge is an urgent scientific and technical task. Analysis of the designs of known strain gauges allowed specifying the requirements for a new circuit design of the measuring device. To improve the operational characteristics in the developed strain gauge:

- the measuring optical channel must be closed;
- there is a possibility of compensating for fluctuations in the external temperature;
- the reliability, sensitivity and simplicity of the circuit designs of strain gauges of known types are preserved.

The essence of the proposed design solution of the improved sensor is to use a closed optical channel based on the optical tunnel effect with simultaneous shear and bending deformation of the sensitive element. Fig. 3 shows a diagram of such a sensor.

To expand the most rational single-mode mode of the strain gauge, it is proposed to use a primary fiber with a depressed core. Reducing the refractive index of the core allows reducing the number of propagating symmetric waves from four to two.

The implementation of more advanced information and measurement systems will significantly affect the restoration and promotion of the competitive development of national maritime enterprises and inland waterway transport enterprises, the development of competitive human resources, and the introduction of digitalization principles in the management of technical operation and repair of vessels