

УДК 621.438

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-126-140

ARTICLE HISTORY

Received 04.04.2026

Accepted 30.04.2026

Сандлер Альберт Кирилович¹, Дончев Іван Іванович²
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна¹
Державний заклад Південноукраїнський національний
педагогічний університет, Одеса, Україна²
sa@onma.edu.ua¹, idonchev85@gmail.com²

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Sandler Albert¹, Donchev Ivan²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine¹
The State institution South Ukrainian national pedagogical University,
Odessa, Ukraine²
sa@onma.edu.ua¹, idonchev85@gmail.com²

AUTOMATED FIBER-OPTICAL DEVICE FOR TEMPERATURE CONTROL OF GAS TURBINE ELEMENTS

Резюме. Найбільш ефективними серед сучасних є системи моніторингу технічного стану суднових газотурбінних установок, які застосовують підходи, що базуються на безперервному спостереженні за змінами технічних параметрів протягом тривалого проведення вимірювань. Однак їх розвиток має певні обмеження через недосконалість сучасних вимірювачів надвисоких температур жарової труби турбіни. Метою даної роботи є створення новітніх засобів вимірювання температурних полів жарової труби газових турбін. Об'єкт дослідження – процеси формування й перетворення вимірювального сигналу в пристроях контролю температури. Рішення

проблеми досягається шляхом розробки інноваційного волоконно-оптичного датчика з модифікованою конструкцією чутливого елемента. Відмінність пропонованого датчика полягає в тому, що для виробництва застосовані альтернативні скломатеріали.

Summary. *The most effective modern systems are those for monitoring the technical condition of ship gas turbine units, which employ approaches based on continuous observation of changes in technical parameters over extended measurement periods. However, their development faces certain limitations due to the imperfections of modern ultra-high-temperature sensors for turbine flame tube. The aim of this work is to create state-of-the-art means for measuring temperature fields in gas turbine hot walls. The subject of the study is the processes of forming and converting the measurement signal in temperature control devices. The problem is solved by developing an innovative fiber-optic sensor with a modified design of the sensing element. The proposed sensor differs in that alternative glass materials are used in its manufacture.*

Суттєвий вплив суднових газотурбінних установок (СГТУ) на безпеку судноплавства вимагає створення умов їх безпечної експлуатації. Це досягається впровадженням та застосуванням систем технічного діагностування та прогнозування технічного стану. Ключовою особливістю СГТУ, що визначає підхід до діагностування, є вкрай високе теплове та силове навантаження на елементи конструкції. Ці навантаження фактично досягають верхньої межі міцності, і будь-яке перевищення допустимих значень може призвести до руйнування компонентів, а в результаті – до виходу з ладу всієї установки. Для запобігання таким ситуаціям необхідний ретельний контроль основних термогазодинамічних параметрів двигуна з високим ступенем точності та достовірності. Крім того, обробка даних та прийняття рішень з діагностики часто потребують оперативного підходу в реальному часі, щоб оперативно відреагувати на зміни, доки параметри залишаються у допустимих рамках.

Іншою важливою особливістю СГТУ є відсутність резервованих елементів чи вузлів. Камера згоряння є одним з таких вузлів, деталі якого постійно піддаються потужним динамічним та тепловим навантаженням. Проведення постійного моніторингу протягом значних періодів часу теплового стану жарових труб та виявлення зон перегріву їх внутрішніх стінок дає змогу заздалегідь запобігти аварійним та катастрофічним наслідкам [1, 2].

Основою вимірювальних систем теплового стану жарових труб із застосуванням оптоволоконних датчиків є аналіз спектрів та інтенсивності початкового оптичного випромінювання та зворотного розсіяного світла після його проходження через світловод [3, 4].

Одним із найпоширених рішень для моніторингу розподілу високої температури є розподілені волоконно-оптичні датчики температури (ВОДТ) на основі розсіювання Рамана. У датчиках цього типу інтенсивність стоксової компоненти практично не схильна до впливу температури, в той час як інтенсивність антистоксової компоненти чітко залежить від неї. Шляхом визначення відношення інтенсивностей цих двох компонент можна точно визначити температуру.

Основні недоліки Раманівських ВОДТ пов'язані з обмеженою точністю, високою вартістю обладнання та чутливістю до зовнішніх факторів. Вони відмінно підходять для розподілених вимірювань на десятках кілометрів, але поступаються за стабільністю та простотою традиційним точковим датчикам.

Крім того, Раманівським ВОДТ притаманні такі недоліки, які суттєво обмежують їх використання у задачах моніторингу жарових труб ГТД:

- низька просторова роздільна здатність. Зазвичай становить 0,5 ... 2 м, що обмежує можливість точного локального контролю температури. Для завдань, де важлива висока деталізація (наприклад, контроль окремих вузлів устаткування), це є значним;
- обмежена точність вимірів. Абсолютна похибка може досягати $\pm 1 \dots 2^\circ\text{C}$. Потрібно застосування складних методів компенсації та калібрування;
- висока вартість обладнання. Для роботи необхідні спеціалізовані оптоелектронні аналізатори (лазери, спектрометри, фотодетектори), що робить систему надкоштовною порівняно з класичними датчиками;
- чутливість до зовнішніх факторів: механічні напруги у волокні можуть спотворювати сигнал; забруднення чи пошкодження оболонки знижує надійність; потрібна акуратна прокладка та захист кабелю.
- складність обробки даних. Сигнал Раманівського розсіювання слабкий, потребує складних алгоритмів фільтрації та аналізу. Це збільшує час відгуку та навантаження на обчислювальні системи;
- не є оптимальними для завдань, де потрібна висока точність та локальний вимір [5 - 9].

Брилоєнівські ВОДТ забезпечують розподілений моніторинг на десятках кілометрів, але їхні недоліки пов'язані з:

- високої вартістю обладнання. Для роботи необхідні потужні лазери, спектрометри та аналізатори, що робить систему значно дорожчою за Раманівські DTS і тим більше класичних термопар;
- складністю обробки даних. Бриллюенівське розсіювання слабке і потребує складних алгоритмів інтерпретації. Це збільшує час відгуку та навантаження на обчислювальні системи;
- обмеженою точністю. Абсолютна похибка зазвичай становить $\pm 0,5 \dots 1^\circ\text{C}$, що гірше, ніж у платинових термоопірів (RTD), але краще, ніж у Раманівських DTS.
- низькою просторовою роздільною здатністю;
- чутливістю до механічної напруги. Деформації та розтягування волокна впливають на сигнал, що може призводити до помилкових показань;
- складністю експлуатації. Потрібний кваліфікований персонал для налаштування та обслуговування, що обмежує масове впровадження;
- не оптимальністю для завдань, де потрібна висока точність та локальний вимір [5 - 9].

ВОДТ зазначених типів, створені на основі традиційних світловодів, вже дійшли межі можливості свого вдосконалення [9]. Подальше поліпшення метрологічних характеристик ВОДТ найбільш доцільно здійснювати за рахунок застосування альтернативних скломатеріалів [9 - 12].

Мета дослідження – визначення видів та сполучень скломатеріалів для створення ВОДТ, які працюють протягом значних термінів часу у умовах надвисоких температур.

На основі аналізу потенційних можливостей ВОДТ амплітудної модуляції й методів корекції погіршень волоконних вимірювальних перетворювачів застосовано наступний алгоритм синтезу структурної моделі (рис. 1) [13].

За основу обраний розроблений компанією "LIOS Technology GmbH" температурний датчик, заснований на методі рефлектометрії частотної області (Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)). Датчик працює не в часовому діапазоні, як техніка, яка працює за методом Optical Time Domain Reflectometer (OTDR), а в частотному. Відповідно до методу OFDR інтенсивність лазера протягом інтервалу часу вимірювання модулюється синусоподібно, а частота у вигляді лінійної частотної модуляції. Відхилення частоти є прямою причиною локального спрацювання рефлектометра. Модульоване світло лазера прямує у світловод. Частина перетвореного випромінювання рухається у зворотному напрямку до блоку формування сигналу. Потім

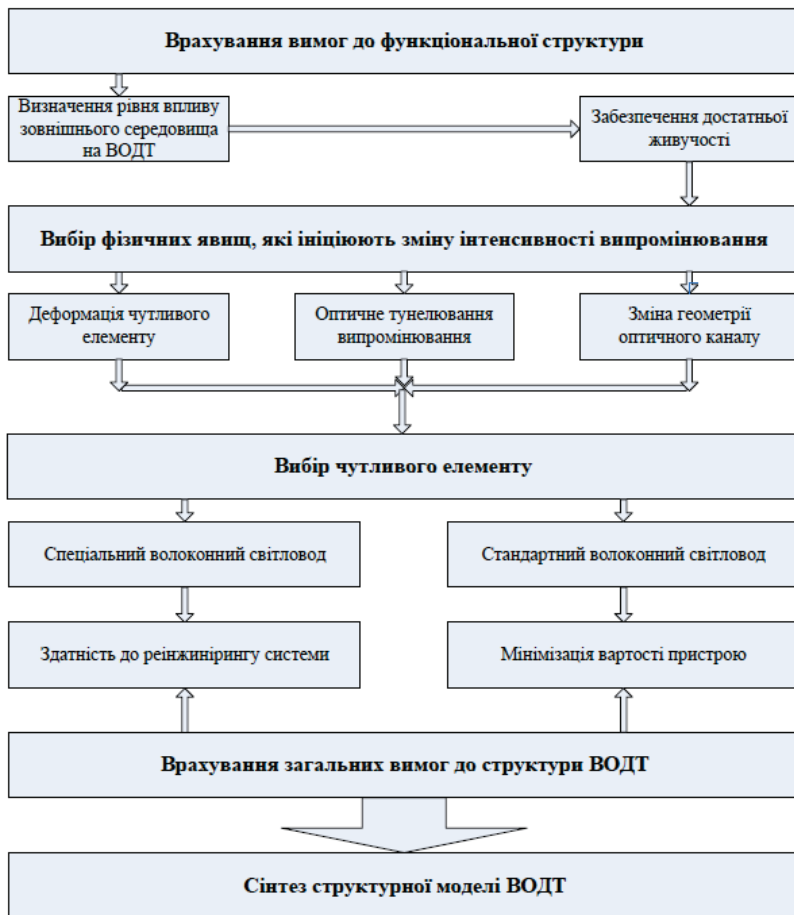


Рис. 1. Алгоритм синтезу ВОДТ для контролю жарових труб газотурбінних двигунів

виконується спектральна фільтрація світла зворотного розсіювання, його перетворення у вимірювальних каналах електричні сигнали, посилення та електронна обробка. Мікропроцесор проводить розрахунок перетворення Фур'є. Амплітуда кривих зворотного розсіювання пропорційна інтенсивності відповідного комбінаційного розсіювання. З відношення кривих зворотного розсіювання одержують температуру волокна вздовж світловодного кабелю.

Оптичні волокна у датчику мають акрилове покриття або покриття, що затверділо в результаті ультрафіолетового випромінювання, придатні для діапазону температур лише до 80 ... 100 °С.

Враховуючи наявні обмеження, досліджена потенційна можливість використання альтернативних видів скломатеріалів для створення чутливих елементів ВОДТ.

Основною вимогою до оптичних матеріалів, що відрізняються комплексом оптичних і механічних характеристик, є їх здатність забезпечувати отримання вірогідної діагностичної інформації в екстремальних умовах експлуатації та високу довговічність.

Найбільшу увагу, як альтернативного скломатеріалу для виготовлення оптичних елементів ВОДТ привернули такі матеріали як скло з рутилу та штучного сафіру.

Рутил (TiO_2) має видатну стійкість до корозії завдяки своїй щільній тетрагональній кристалічній структурі, хімічній інертності та стабільності під впливом зовнішніх факторів. Висока щільність і твердість забезпечують матеріалу опір до стирання і механічного навантаження, а його термостійкість дозволяє використовувати рутил у виробництві вогнетривких матеріалів та захисних покриттів.

Більш стабільна структура рутила, порівняно з анатазом, робить його менш схильним до хімічних реакцій, що дозволяє застосовувати його в агресивних середовищах. Він практично не розчиняється у воді та демонструє високу стійкість до більшості кислот, а також до ультрафіолетового випромінювання та атмосферних впливів. Матеріал зберігає свої властивості при нагріванні до 600 ... 700 °С, що особливо важливо для промислових потреб.

Електрооптичні характеристики рутила залежать від кристалографічної структури, наявності домішок, дефектів ґрат, температури та навколишніх умов. Ключовий вплив мають ізоморфні заміщення та легування перехідними металами, оскільки ці фактори змінюють показник заломлення, діелектричну проникність та ефективність ефекту Керра.

Діелектрична проникність рутила при підвищенні температури помітно зменшується: приблизно від 120 при кімнатній температурі до 80 ... 90 при 300 °С. Показник заломлення також залежить від температури. При нагріванні він знижується внаслідок зменшення поляризуємості кристалічних ґрат і посилення теплових коливань. У діапазоні температур 20 ... 300 °С показник заломлення може знижуватися на 0,01 ... 0,03 одиниці. Це пояснюється посиленням теплових коливань ґрат, що призводить до зниження узгодженості дипольних відгуків. Отже відбувається одночасне зниження

діелектричної проникності, поляризуємості і показника заломлення (рис. 2) [13].

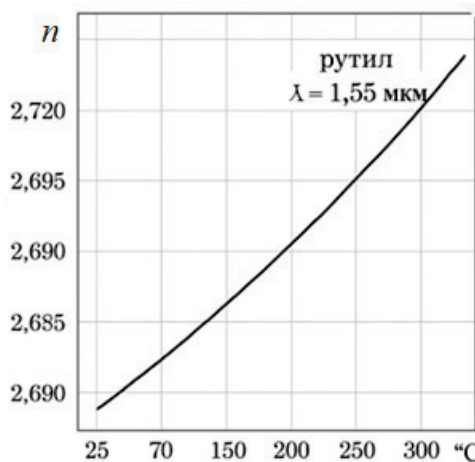


Рис.2. Залежність показника заломлення рутиту від температури за довжини хвилі випромінювання 1,55 мкм [13]

Вартість рутиту сильно залежить від якості, призначення та обсягу закупівлі: технічний діоксид титану в Україні коштує приблизно від 149 ... 238 грн/кг, а імпорتنі преміальні рутильні сорти на міжнародних майданчиках можуть досягати 80000 ... 110000 грн/т.

Сапфірові оптичні волокна відрізняються унікальною термостійкістю (до ~ 2000 °C), високою механічною міцністю (в 5 разів міцніше за скло, стійкі до високих тисків і ударів) і хімічною інертністю (інертні до більшості кислот і лугів, не схильні до корозії). Це робить їх незамінними для датчиків та передачі світла в екстремальних умовах. Їхня ключова перевага – стабільна робота там, де кварцові волокна руйнуються. Оптичний діапазон: прозорість від 170нм до 5,3мкм, що дозволяє використовувати у широкому спектрі.

Однак, сапфірові оптичні волокна коштують у десятки разів дорожче за кварцові: їх ціна може досягати сотень доларів за метр, тоді як кварцові волокна масового виробництва коштують лічені центи за метр. Але сапфірові волокна є єдиною альтернативою високотемпературному діапазоні, де кварцові волокна руйнуються [9, 14 - 17].

Що стосується вибору типу оптичного каналу ВОДТ, то вирішальним аргументом на користь закритого каналу було таке. ВОДТ з відкритим оптичним каналом мають низьку чутливість перетворення, неоптимізовану конструкцію внаслідок труднощів математичного опису моделі, низьку стійкість поверхонь оптичної системи до впливу дестабілізуючих факторів, що суттєво знижує їх метрологічні характеристики [10].

Таким чином науково-технічне завдання, яке створено запитом практики, вирішується тим, що пропонується волоконно-оптичний датчик температури складається з джерела випромінювання, фотоприймача та світловодів. Джерело випромінювання та фотоприймач сполучені з двобічним оптичним розгалужувачем, який зв'язаний з світловодом комутаційним. Схемотехнічне рішення пропонуваного датчика пояснюється рис. 3.

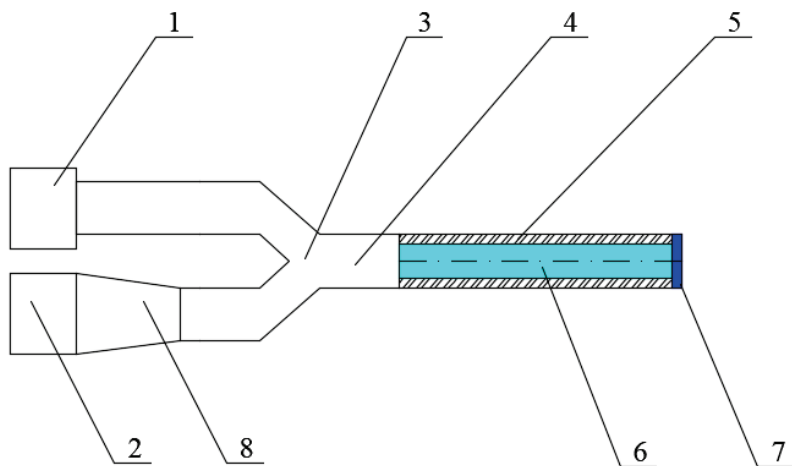


Рис. 3. Волоконно-оптичний датчик температури: 1 – джерело випромінювання; 2 – фотоприймач; 3 – оптичний розгалужувач; 4 – світловод комутаційний; 5 – коаксіальна оболонка з рутилу; 6 – основний світловод з сапфірового скла; 7 – віддзеркалюючий шар; 8 – фокон

Відмінність датчика полягає у тому, що світловод комутаційний сполучений з коаксіальним світловодом, серцевиною якого є основний світловод з сапфірового скла, а навколо нього міститься коаксіальна оболонка з рутилу. Основний світловод з сапфірового скла також

нероз'ємно сполучений з віддзеркалюючим шаром. А між фотоприймачем та розгалужувачем розташований оптичний фокон. Оптичний фокон дозволяє виконати більш точне сполучення гілки розгалужувача та активної ділянки фотоприймача без додаткового юстирування.

У статичному режимі (режим калібровки), тобто при стандартних умов зовнішнього середовища, у джерелі випромінювання генерується випромінювання, яке крізь розгалужувач, надходить до комутаційний та основного світловодів. У основному світловоді з сапфірового скла відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить скрізь нього, яке обумовлене затуханням у матеріалі світловоду під впливом експлуатаційних факторів. Інтенсивність випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається до фотоприймача через комутаційний світловод, розгалужувач та фокон, фіксується і запам'ятовується як поправка.

У динамічному режимі (робочий режим ГТУ) відбувається зміна показника заломлення коаксіальної оболонки. В наслідок чого відбувається порушення умов повного внутрішнього відбивання світла, яке виникає як відклик на тунельне перекачування випромінювання з основного світловоду назовні. Порушення умов повного відбивання світла у основному світловоді знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару.

Для початкових умов за консервації оптичної потужності [18 - 23]

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

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

$$P_T(z) = \frac{\sin^2 \left[cz \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2c} \right)^2} \right]}{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2c} \right)^2} P_0.$$

Потужність, що передається з одного хвильоводу до іншого, залежить від координати L . Максимальне значення цієї потужності $P_{\max}$ визначається за умови, що $z = L_0$. У цьому випадку мінімальне значення потужності $P_{\min}$, що залишається в основному світловоді з сапфірового скла, і максимальне значення потужності $P_{T\max}$ у коаксимальної оболонці з рутилу дорівнюють відповідно:

$$P_{R\min} = \left[1 - \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2 \right]} \right] P_0;$$

$$P_{T\max} = \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2 \right]}.$$

Удосконалена модель ВОДТ має низку обмежень у своїй сфері застосування. Одним із ключових обмежень є вартість, яка поки ще перевищує вартість датчиків, які створені на базі кварцових оптичних волокон.

У зв'язку з цим доцільно передбачити механізми вдосконалення технологічного процесу нанесення рутилової оболонки на основний світловод зі штучного сапфіру.

Однією з найважливіших переваг удосконаленої моделі є її адаптивність до вибору локальних робочих точок для кожного каналу дистанційного зондування. Це дає змогу налаштувати конфігурації фазового зсуву відповідно до вимог лінійності або чутливості. Подальший розвиток запропонованого підходу може полягати у використанні віртуальних пристроїв для визначення віртуальних вимірювальних ліній затримки, а також для забезпечення функцій самоідентифікації та автодіагностики ВОДТ та аналогічних датчиків. Це стане важливим кроком у вдосконаленні опитувальної топології для конкретних ГТУ [24 - 29].

Запропоноване схемотехнічне рішення ВОДТ завдяки застосуванню оптичних елементів забезпечить такі складові технічного ефекту:

- більш адекватне перетворення температури у жаровій трубі ГТУ у зміни інформаційного сигналу;
- компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику;
- можливість створення розгалуженої мережі контролю газового середовища в особливих умовах;
- підвищення якості функціонування за рахунок використання матеріалів з близьким коефіцієнтом теплового поширення та обрання раціональної схеми модуляції опорного випромінювання;
- пожежевибухобезпечність при застосуванні.

На відміну від існуючих, запропоноване схемотехнічне рішення спроможне значним чином збільшити робочий діапазон та інваріантність до експлуатаційних факторів вимірювального засобу [30 - 32].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Савушкін, В. В. Дослідження температурного стану жарової труби камери згоряння ГТД термоіндикаторними фарбами та термопарами // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. – 2023. – № 4. – С. 40 - 45. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).6](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).6).
2. Варламов, Г. Б., Позняков, П. О., Юрашев, Д. М. Комплексні дослідження енергоекологічних показників експлуатації ГТУ у складі газоперекачувального агрегату типу ГТК-10 // Энергосбережение. – 2012. – № 01(95). – С. 15-24.
3. Баранюк, О. В., Воробйов, М. В., Рачинський, А. Ю. CFD-модельовання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія. КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – С. 15-22.
4. Xiong, Q.-R., Zhu, G.-C., Zhong, M. Experimental investigation of temperature measurement on the wall of flame tube for a triple combustor // Journal of Aerospace Power. – 2016. – № 4. – P. 775-779.
5. Волоконно-оптические датчики температуры URL: https://temperatures.ru/pages/volonkonno_opticheskie_datchiki_temperature. Дата звернення 04.04.2026.

6. D. A. Krohn, T. MacDougall, A. Mendez. Fiber optic sensors: Fundamentals and applications: Fourth edition. – Bellingham: The International Society for Optical Engineering, 2015. – 310 p. DOI: 10.1117/3.100291.

7. Горлов, Н. И., Жахметбеков, Д. З. Распределенные волоконно-оптические датчики на принципе вынужденного бриллюэновского рассеяния. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelennye-voлоконно-opticheskie-datchiki-na-printsipe-vynuzhdenogo-brillyuenovskogo-rasseyaniya>. Дата звернення 04.04.2026.

8. Горшков, Б. Г., Горшков, Г. Б., Жуков, К. М. Распределенный волоконно-оптический датчик температуры на основе регистрации бозонных компонент рамановского рассеяния света для криогенных применений URL: <https://quantum-electron.lebedev.ru/wp-content/uploads/2020/05/0506.pdf> Дата звернення 04.04.2026.

9. R. Matias, S. Ikezawa, J. Corres. Fiber Optic Sensors. Current Status and Future Possibilities. – Springer International Publishing, 2017. – 381 p.

10. М. Ли. Каковы антикоррозионные свойства покрытий диоксида титана рутила? URL: <https://www.sasa-zirconia.com/blog/what-are-the-anti-corrosion-properties-of-rutile-titanium-dioxide-coatings-13046.html> Дата звернення 04.04.2026.

11. 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. [dx.doi.org/10.31653/2706-7874](https://doi.org/10.31653/2706-7874).

12. 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.

13. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Структурная модель инвариантного волоконного акселерометра // Судовые энергетические установки. – 2011. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.87-93.

14. D. Homa. Development of Sapphire Optical Fiber Sensors for High Temperature Applications: Ph.D. in Materials Science and Engineering Institution / Virginia Polytechnic Institute and State University. – Virginia, 2016.

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. Liu, H. H, Hu, D. J. J, Sun, Q. Z, Wei, L, Li, K. W et al. Specialty optical fibers for advanced sensing applications // Opto Electron Sci. – 2023. – № 2. – h. 3 - 27. <https://doi.org/10.29026/oes.2023.220025>.
17. Snyder, A. W., Love, J. D. Optical Waveguide Theory. – London: Chapman and Hall, 1991. – 734 p.
18. E. Udd, W. B. Spillman, Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
19. Бусурін, В. І., Носов, Ю. Р. Волоконно-оптичні датчики: фізичні основи, питання розрахунку і застосування. URL: <https://k.twirpx.link/file/4434875>. Дата звернення 04.04.2026.
20. Shizhuo Yin, P. B. Ruffin, Francis T. S. Yu. Fiber Optic Sensors. – London: CRC Press, 2017. – 492 p.
21. Семенов, А. С., Смирнов, В. Л., Шмалько, А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. URL: bookshare.net/index.php?id1=4&category=physics&author=semenov-as&book=1990. Дата звернення 04.04.2026.
22. Ярив, А., Юх, П. Оптические волны в кристаллах. URL: <https://read.in.ua/book104865>. Дата звернення 04.04.2026.
23. 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.
24. Budashko, V., Glazeva, O., Sandler, A., Khniunin, S., Leshchenko, V., Budashko, O. Improving the Method of Predictive Control of Multilevel Systems under Uncertainty // 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. – Kyiv: Aviation Institute Week on October 21 - 24, 2025. – P. 1 - 6. DOI: 10.1109/MSNMC61130.2025.11399677.
25. Сандлер, А. К., Сандлер, А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливopодготовки // Судовые энергетические установки. – 2009. – Вып. 23. – Одесса: ОНМА. – С. 17 - 22.
26. Сандлер, А. К., Батинський, А. І. Волоконно-оптичний пристрій контролю рівня для високотемпературних систем паливopідготовки // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – Одеса: ОНАХТ. – С. 9 - 13. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1802>.

27. Сандлер, А. К., Карпилов, А. Ю. Применение волоконно-оптических датчиков в системах автоматического диагностирования судовых газотурбинных установок // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – Одесса: ОНАХТ. – С. 46 - 52. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i2.1374>.

28. Сандлер, А. К., Карпилов, А. Ю. Волоконно-оптическая система контроля тяги газотурбинных двигателей // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 3. – Одеса: ОНАХТ. – С. 74 - 79. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i3.1499>.

29. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. Схемотехнічне рішення комбінованого датчика клімат-контролю // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – Вып. 19. – Одесса: ОНМА. – С. 69 - 73.

30. R. Ganguli. Gas Turbine Diagnostics: Signal Processing and Fault Isolation. – Abingdon: Taylor & Francis, 2017. – 251 p.

31. C. Nicol. Monitoring and diagnostics for gas turbines – case studies // The Future of Gas Turbine Technology 5th International Conference 27-28 October 2010, Brussels, Belgium. – P. 1 - 17.

32. Sampath, S., Singh, R. An integrated fault diagnostics model using genetic algorithm and neural networks // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2006. – Vol. 128. – No. 1. – P. 49 - 56.

Abstract. One of the key indicators of the economic efficiency of a gas turbine unit (GTU) is the service life of its individual components, particularly those that need to be replaced during scheduled maintenance, i.e. the so-called ‘consumables’. Extending the service life of these components until they need to be replaced or repaired makes it possible to reduce the frequency of maintenance, cut costs associated with taking the engine out of and putting it back into service, and lower the risk of emergencies. Such components include, for example, turbine blades, combustion chamber components, bearings, parts of the lubrication and cooling systems, and others. One of the main factors affecting the service life of these components is the actual operating conditions, which can be determined both by the specific characteristics of the engine’s operating processes and by the conditions of its use on the test bench. The wear and tear of these components, caused by operational processes, most often manifests itself as physical damage resulting from thermal or mechanical stresses. Consequently, the development or modernization of GTU components and assemblies requires a detailed study of their resistance to high temperatures and mechanical stresses. To address this challenge, a new circuit design for

a temperature sensor for the inner surface of the combustion chamber's heating tube has been proposed. The distinctive feature of this sensor lies in the use of a switching optical fiber combined with a coaxial optical fiber. The main element of the latter is a sapphire glass optical fiber surrounded by a coaxial rutile cladding. In addition, the sapphire optical fiber is integrally connected to a reflective layer. An optical coupler is located between the photodetector and the splitter, ensuring precise alignment of the splitter branch with the active region of the photodetector without the need for additional adjustment.