

УДК 621.373

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.59.8.008](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.59.8.008)

Моделирование оптоэлектронного осциллятора с участком оптического волокна в качестве линии задержки в его петле обратной связи

И.В. Степанов✉, А.Х. Султанов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

Резюме. Актуальность исследования обусловлена необходимостью мониторинга в режиме реального времени продольных и поперечных деформаций и вибраций в распределённых металлических и бетонных конструкциях для определения их состояния. Для этого уже применяются оптические системы опроса датчиков. Однако существует необходимость разработки новых подходов, обеспечивающих высокую скорость опроса для определения деформаций материалов, сопровождающихся высокочастотными (зачастую ультразвуковыми) колебаниями. Поэтому в статье предлагается применение оптоэлектронного осциллятора с интегральной оптической частью, подключенного к участку оптического волокна, выполняющего роль датчика. При его деформации происходит изменение частоты электрического сигнала на выходе оптоэлектронного осциллятора. Соответственно, становится возможным определение степени деформации оптического волокна с соответствующим ей воздействием на конструкцию. Для подтверждения концепции было проведено численное моделирование системы в программном обеспечении Ansys Lumerical. Результаты численного моделирования подтверждают возможность применения и эффективность предложенного метода в системах распределённого мониторинга. При этом выявлено ограничение по максимальной длине опрашиваемого участка оптического волокна – 18 км для оптического волокна, выполненного по стандарту G.652d. В свою очередь, чувствительность системы для участка волокна длиной 2 км составила 1 МГц/м по длине или 102,2 кГц/нс по времени задержки оптического сигнала в петле обратной связи оптоэлектронного осциллятора.

Ключевые слова: опрос датчиков, оптические датчики, рефлектометрия, фотонная интегральная схема, распределённый мониторинг, оптоэлектронный осциллятор.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНиТ (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодёжной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

Для цитирования: Степанов И.В., Султанов А.Х. Моделирование оптоэлектронного осциллятора с участком оптического волокна в качестве линии задержки в его петле обратной связи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(8). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2557> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.59.8.008

Optoelectronic oscillator simulation with a section of optical fiber as a delay line in its feedback loop

I.V. Stepanov✉, A.Kh. Sultanov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is conditioned by the need for real-time monitoring of longitudinal and transverse deformations and vibrations in distributed metal and concrete structures to determine their condition. For this purpose, optical sensor interrogation systems are applied. However, there is a need to develop new approaches that provide high interrogation speed for determining material

deformations accompanied by high-frequency (often ultrasonic) vibrations. Therefore, we propose the use of an optoelectronic oscillator based on a photonic integrated circuit that connected to a section of optical fiber that acts as a sensor. At fiber deformation optoelectronic oscillator output frequency changes. Accordingly, it becomes possible to determine the degree of deformation of the optical fiber with the corresponding impact on the structure. For the concept validation and numerical simulation, we used Ansys Lumerical software. The results of numerical simulation confirm the applicability and effectiveness of the proposed method in distributed monitoring systems. The maximum interrogated optical fiber (G.652d standard) section length is 18 km. System sensitivity for 2 km long optical fiber is 1 MHz/m in length change and 102.2 kHz/ns in delay time in the feedback loop of the optoelectronic oscillator.

Keywords: interrogation, optical sensors, reflectometry, photonic integrated circuit, distributed monitoring, optoelectronic oscillator.

Acknowledgements: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment for UUST (agreement No. 075-03-2024-123/1 dated February 15, 2024) and conducted at the Youth Research Laboratory "Sensor Systems Based on Integrated Photonic Devices" of the Eurasian Research and Education Center.

For citation: Stepanov I.V., Sultanov A.Kh. Optoelectronic oscillator simulation with a section of optical fiber as a delay line in its feedback loop. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(8). (In Russ.). 2026;14(8). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2557> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.59.8.008

Введение

В различных областях промышленности, в частности, в добыче и перевозке минералов критически важным является пространственно-распределённый мониторинг состояния металлических, железобетонных и кабельных конструкций. Примерами таких конструкций являются трубопроводы, опоры, пролёты мостов и путепроводов, несущие конструкции шахт и волоконно-оптические линии связи. Мониторинг включает в себя оценку продольных и поперечных деформаций и вибраций этих конструкций в режиме реального времени.

Эффективный пространственно-распределённый мониторинг может быть обеспечен одновременным анализом данных с большого количества датчиков (т. н. квазираспределённый мониторинг) или использованием оптических волокон. Соответственно, система мониторинга в идеальном случае должна быть многоканальной, то есть должно обеспечиваться мультиплексирование сигналов от различных датчиков (например, по частоте).

Помимо этого, система мониторинга должна быть масштабируемой: система опроса для каждой мультиплексированной группы датчиков должна быть компактной, энергоэффективной и технологичной (то есть подходить для массового производства) для обеспечения экономической эффективности. Более того, система мониторинга должна обеспечивать высокую скорость опроса и достаточную полосу пропускания для точного определения параметров вибраций конструкции [1].

Волоконно-оптические системы мониторинга – широко распространённое решение для этого типа задач. В качестве датчика в них используются волоконные брэгговские решётки и оптические волокна. Более того эти системы обладают высокими чувствительностью, надёжностью и пожаробезопасностью [2].

Современные оптические системы опроса датчиков основаны на дискретных оптических компонентах и обычно включают в себя широкополосный источник излучения в сочетании с оптическим анализатором спектра или лазер непрерывного излучения с фотодетектором [3]. Однако, в обоих случаях требуются дорогие дискретные оптические и оптомеханические компоненты, что ограничивает

возможности распространения систем опроса на их основе. Для повышения эффективности и экономичности распределённых оптических систем опроса необходима разработка новых подходов.

Соответственно предполагается решение следующих задач:

1) переход от дискретных оптических компонентов к реализации на основе фотонных интегральных схем (ФИС);

2) поиск технических решений, позволяющих исключить из системы опроса необходимость в дорогостоящих и сложных устройствах, использующих дискретные оптические и оптомеханические компоненты.

В последнее время особенное внимание уделяется оптоэлектронным осцилляторам (ОЭО), способным выполнять как функции генераторов сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний, так и частотных систем опроса оптических датчиков [4]. Особенно актуальным является применение систем на основе ОЭО в областях, где необходимы высокая скорость и точность опроса [5]. Таким образом, в предложенной статье рассматривается система опроса на основе ОЭО, способная решить представленные выше задачи [5].

В большинстве исследований, где ОЭО используется для опроса датчиков, в качестве последних используются высокодобротные оптические резонансные структуры, такие как: брэгговские решётки (в отдельных случаях с фазовым сдвигом), микрокольцевые и микродисковые резонаторы [6]. В этом случае изменение амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик резонатора приводит к изменению частоты СВЧ-сигнала на выходе ОЭО. Стоит отметить, что для таких систем резонансная структура зачастую выполняет роль режекторного фильтра, однако в предыдущих исследованиях было показано, что время распространения сигнала в контуре ОЭО тоже влияет на частоту СВЧ-колебания на его выходе [7]. Поэтому в статье предлагается применение оптического волокна в качестве чувствительного элемента системы, так как изменение его длины будет влиять на время распространения сигнала в контуре ОЭО, что, в свою очередь, приведёт к изменению частоты СВЧ-колебания на его выходе. Целью предлагаемого подхода является достижение высоких разрешения и скорости опроса [8] датчика. Также предлагаемый подход позволяет обеспечить высокий уровень интеграции компонентов на ФИС, что может привести к повышению чувствительности, скорости, стабильности, компактности, энергоэффективности и экономичности при массовом производстве [9].

Материалы и методы

Ранее было представлено подробное описание работы ОЭО в рамках системы опроса датчиков [10]. В общем случае ОЭО работает следующим образом. Узкополосный сигнал с источника лазерного излучения поступает в ФИС, где попадает на фазовый модулятор (ФМ). Оптический сигнал на ФМ модулируется сигналом с выхода ОЭО. Особенность спектра сигнала на выходе ФМ – его спектральные компоненты симметричны относительно центральной несущей и находятся в противофазе, поэтому при подаче такого сигнала на фотодетектор без фильтрации частота сигнала на его выходе будет равна нулю. Но в схеме ОЭО модулированный сигнал поступает на режекторный фильтр (например, микрокольцевой резонатор) из-за чего возникает не компенсированная по фазе частотная составляющая, что приводит к появлению сигнала биения на выходе фотодетектора. Его частота f_0 определяется разностью центральных частот источника лазерного излучения f_{CW} и режекторного фильтра $f_{РФ}$:

$$f_0 = |f_{CW} - f_{PФ}| \approx c \cdot \left| \frac{\lambda_{PФ} - \lambda_{CW}}{\lambda_{CW}^2} \right|, \quad (1)$$

где c – скорость света, λ_{CW} и $\lambda_{PФ}$ – центральные длины волн источника лазерного излучения и режекторного фильтра, соответственно.

После этого сигнал с выхода фотодетектора усиливается и его часть подаётся на ФМ, формируя тем самым цепь положительной обратной связи [11]. В предлагаемой структуре системы опроса на основе ОЭО в его оптическую часть петли обратной связи добавлено оптическое волокно (Рисунок 1).

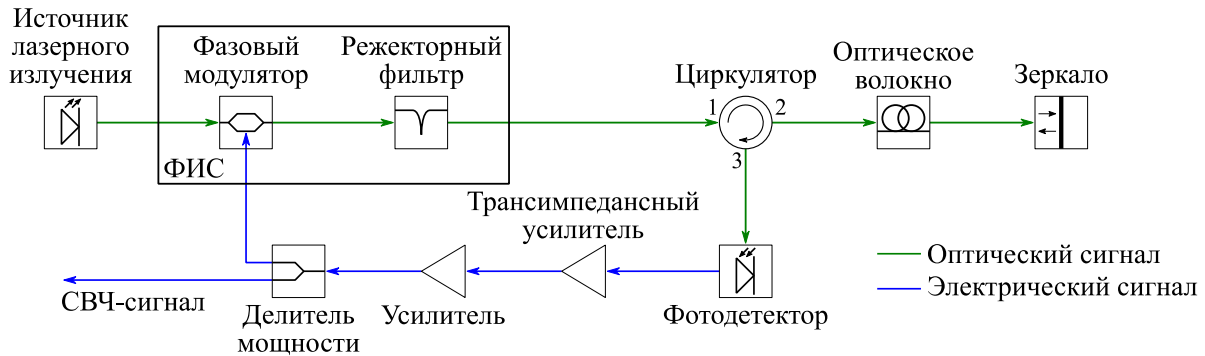


Рисунок 1 – Система опроса на основе ОЭО
Figure 1 – OEO-based interrogation system

Изменение времени задержки сигнала в петле обратной связи ОЭО $\Delta\tau$ приводит к изменению его фазового набегу $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = 2\pi f_0 \Delta\tau. \quad (2)$$

При этом изменение фазового набегу сигнала приводит к изменению частоты на выходе ОЭО Δf , описываемому как:

$$\Delta f = -\frac{\Delta\phi}{2\pi T}, \quad (3)$$

где T – время задержки сигнала в оптической части петли обратной связи ОЭО. Соответственно, перестраиваемая линия задержки (в представленном случае оптическое волокно) в петле обратной связи ОЭО может быть использована как чувствительный элемент.

В итоге изменение оптической длины оптического волокна через величину изменения временной задержки может быть выражено следующим образом:

$$\Delta\tau = n\Delta L + L\Delta n, \quad (4)$$

где n и Δn – эффективный показатель преломления волокна и его изменение, L и ΔL – физическая длина волокна и её изменение, соответственно [4]. В результате любое воздействие, приводящее к изменению физической и оптической длины петли обратной связи, может быть измерено. Примерами таких эффектов являются изменение длины, положения и температуры оптического волокна, а также его деформация и вибрация.

Результаты

Структура численной модели, разработанной для верификации предложенного подхода, показана на Рисунке 1. Для моделирования было использовано программное обеспечение Ansys Lumerical INTERCONNECT, использующее в своей основе аппарат матриц рассеяния. В численной модели были использованы следующие параметры:

- центральная длина волны источника лазерного излучения – 1554,1 нм;
- ширина полосы излучения источника лазерного излучения – 1 МГц;
- мощность на выходе источника лазерного излучения – 3 дБм;
- центральная длина волны режекторного фильтра – 1554,23 нм.

В качестве режекторного фильтра был использован микрокольцевой резонатор. Длина волны источника лазерного излучения была выбрана таким образом, чтобы обеспечить частоту СВЧ-сигнала на выходе ОЭО около 11,7 ГГц. В качестве чувствительного элемента было использовано одномодовое оптическое волокно, соответствующее стандарту G.652d. Значения характеристик оптического волокна соответствуют волокну SMF-28 производителя Corning. На выходе участка волокна установлено зеркало с коэффициентом отражения 100 %.

На первом этапе моделирования была определена максимально допустимая длина участка оптического волокна, при которой возможна работа ОЭО. Для этого длина волокна изменялась от 0 до 19 км, при этом коэффициент усиления менялся в диапазоне от 13 до 23 дБ, чтобы обеспечить генерацию СВЧ-колебания, то есть производилась подстройка системы под изменяющуюся длину волокна, чтобы соблюдалось условие баланса амплитуд. Результат моделирования – зависимость отношения сигнал-шум на выходе ОЭО от длины оптического волокна, для интерполяции использован полином 6-й степени (Рисунок 2).

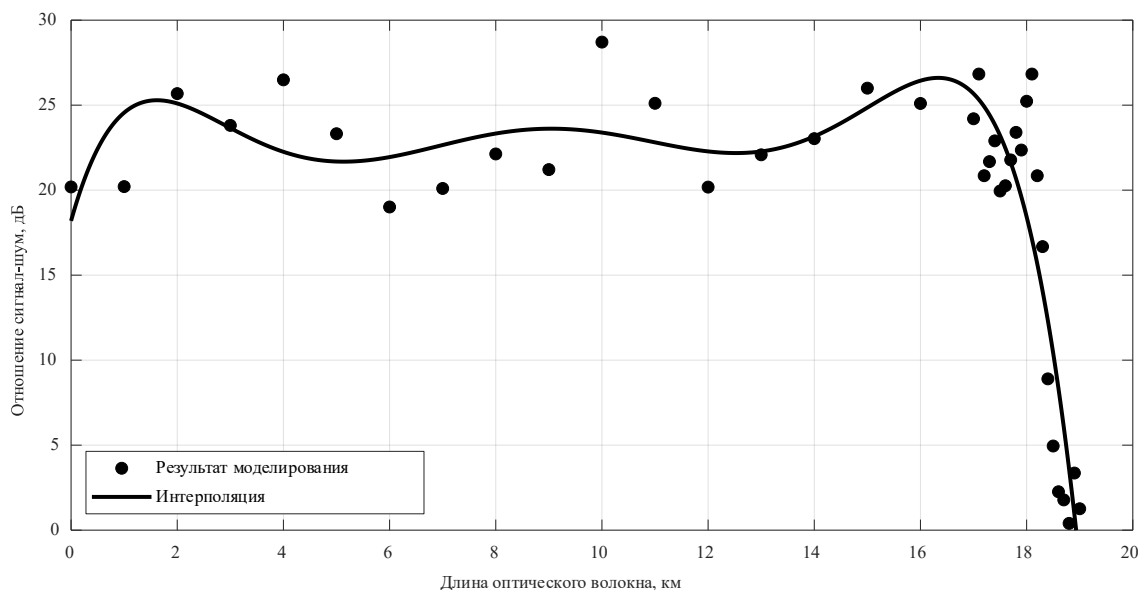


Рисунок 2 – Зависимость отношения сигнал-шум на выходе ОЭО от длины оптического волокна

Figure 2 – Signal-to-noise ratio by optical fiber length dependence

Исходя из полученной зависимости, можно сделать вывод о том, что максимально допустимая длина оптического волокна для представленной системы составляет 18 км. При превышении этой длины возможность работы системы ограничивается поляризационно-модовой дисперсией волокна, затуханием в петле обратной связи ОЭО и значительным изменением фазового сдвига в волокне. Однако эти эффекты можно компенсировать с помощью большего коэффициента усиления СВЧ-усилителей и использования оптических волокон с компенсацией дисперсии.

После этого для оптического волокна длиной 2 км было исследовано влияние изменения его длины на частоту сигнала на выходе ОЭО. Для этого длина изменялась в

сторону увеличения до 0,3 % (от 0 до 6 м с шагом 1 м). Данный диапазон характерен для максимального значения растяжения оптического волокна в распределённых системах мониторинга [12]. В свою очередь, относительно малое значение длины волокна обусловлено снижением влияния поляризационно-модовой дисперсии на работу ОЭО. На Рисунке 3 приведена зависимость частоты ОЭО от изменения длины оптического волокна, а на Рисунке 4 – от соответствующего изменению длины изменения временной задержки в контуре.

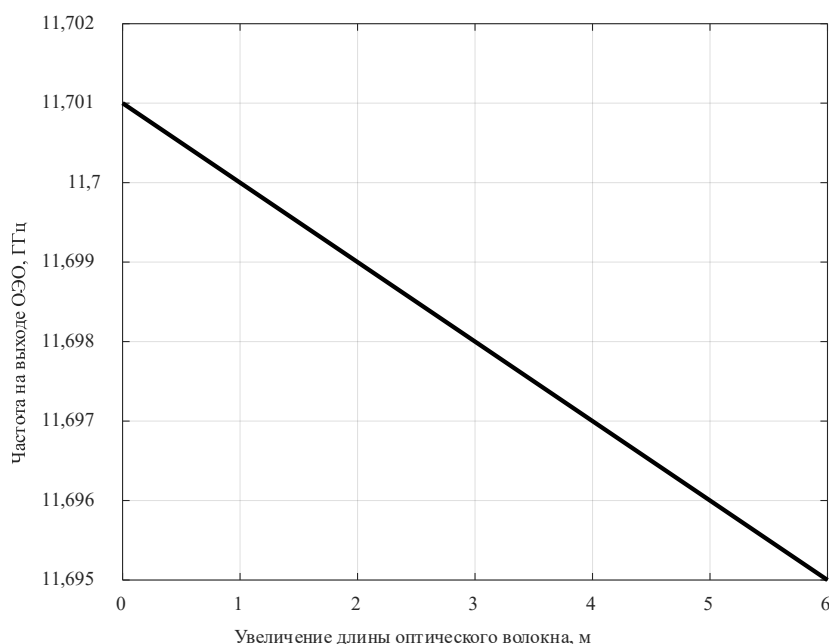


Рисунок 3 – Зависимость частоты сигнала на выходе ОЭО от увеличения длины оптического волокна

Figure 3 – OEO signal frequency dependence by optical fiber length increase

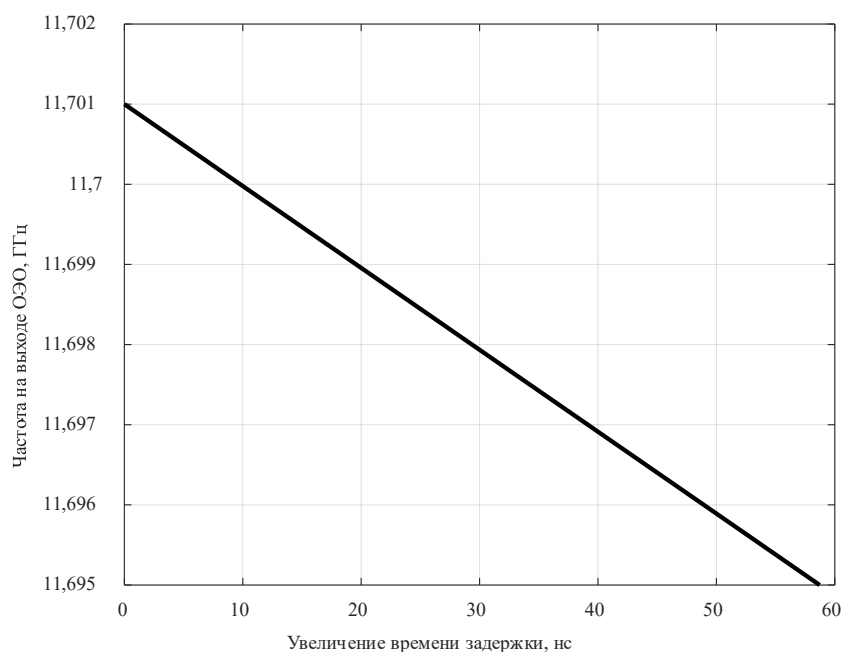


Рисунок 4 – Зависимость частоты сигнала на выходе ОЭО от увеличения времени задержки в петле обратной связи

Figure 4 – OEO signal frequency dependence by feedback loop time delay increase

Из зависимостей на Рисунке 3 можно вычислить чувствительность системы по длине S_L и времени задержки S_T :

$$S_L = \frac{\Delta f}{\Delta L} = \frac{6}{6} = 1 \text{ МГц/м}, \quad (5)$$

$$S_T = \frac{\Delta f}{\Delta T} = \frac{6}{58,72} = 102,2 \text{ кГц/нс}. \quad (6)$$

Обсуждение

Применение представленной в статье системы опроса на основе ОЭО имеет ограничения. Во-первых, диапазон опрашиваемых длин волн ограничивается частотными характеристиками модулятора, усилительного каскада и фотодетектора. Во-вторых, с практической точки зрения требуется не только определение факта произошедшей деформации, но и её расположения, которое может быть определено только косвенными методами (например, по времени изменения частоты сигнала на выходе ОЭО). В-третьих, применение системы ограничено для больших длин оптического волокна, однако данный недостаток может быть преодолен за счёт увеличения коэффициента усиления в схеме ОЭО и применения оптических волокон с компенсацией дисперсии.

Чувствительность системы составила 1 МГц/м или 102,2 кГц/нс. Для систем опроса на основе ОЭО минимально различимое значение частоты составляет около 10 кГц [13], что ограничивает чувствительность системы до 1 см по длине и до 10 пс по времени. Однако чувствительность системы может быть улучшена за счёт уменьшения уровня фазового шума ОЭО, при этом ограничивающими факторами являются уровень фазового шума источника лазерного излучения, из-за которого происходит изменение его частоты во времени, и долговременная нестабильность частоты ОЭО [6].

Заключение

В статье приведено описание и результаты численного моделирования оптической системы опроса на основе ОЭО. Показана возможность определения изменения длины оптического волокна, что позволяет оценить деформацию различных структур. Результаты моделирования показали возможность работы с оптическими волокнами длиной до 18 км.

Предложенная схема опроса потенциально обеспечивает высокое разрешение и скорость сканирования [8], что позволяет обнаруживать воздействия с частотой порядка единиц мегагерц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Yang D., Liu Y., Wang Y., et al. Integrated optic-fiber sensor based on enclosed EFPI and structural phase-shift for discriminating measurement of temperature, pressure and RI. *Optics & Laser Technology*. 2020;126(6):106112. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106112>
2. Wu Q., Wang R., Yu F.-M., et al. Application of an Optical Fiber Sensor for Nonlinear Ultrasonic Evaluation of Fatigue Crack. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(13):4992–4999. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2903323>
3. Wu Q., Okabe Y., Yu F. Ultrasonic Structural Health Monitoring Using Fiber Bragg Grating. *Sensors*. 2018;18(10):3395. <https://doi.org/10.3390/s18103395>
4. Zou X., Liu X., Li W., et al. Optoelectronic Oscillators (OEOs) to Sensing, Measurement, and Detection. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2016;52(1):0601116. <https://doi.org/10.1109/JQE.2015.2504088>

5. Ivanov V., Voronkov G., Golubchikov A., et al. PIC-based opto-electronic oscillator for communication and sensing applications. *Journal of Optical Technology*. 2023;90(12):719–724. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000719>
6. Hao T., Liu Y., Tang J., et al. Recent advances in optoelectronic oscillators. *Advanced Photonics*. 2020;2(4):044001. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.4.044001>
7. Ivanov V., Stepanov I., Voronkov G., et al. An Approach to Reduce Tuning Sensitivity in the PIC-Based Optoelectronic Oscillator by Controlling the Phase Shift in Its Feedback Loop. *Micromachines*. 2025;16(1):32. <https://doi.org/10.3390/mi16010032>
8. Yao J. Microwave Photonics for High-Resolution and High-Speed Interrogation of Fiber Bragg Grating Sensors. *Fiber and Integrated Optics*. 2015;34(4):204–216. <https://doi.org/10.1080/01468030.2015.1061622>
9. Chrostowski L., Hochberg M. *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge University Press; 2015. 418 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316084168>
10. Yang Y., Wang M., Shen Y., et al. Refractive Index and Temperature Sensing Based on an Optoelectronic Oscillator Incorporating a Fabry–Perot Fiber Bragg Grating. *IEEE Photonics Journal*. 2018;10(1):6800309. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2778224>
11. Zhang W., Yao J. A silicon photonic integrated frequency-tunable microwave photonic bandpass filter. In: *2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 23–26 October 2017, Beijing, China*. IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/MWP.2017.8168635>
12. Bertholds A., Dandliker R. Deformation of single-mode optical fibers under static longitudinal stress. *Journal of Lightwave Technology*. 1987;5(7):895–900. <https://doi.org/10.1109/JLT.1987.1075583>
13. Hao T., Li W., Zhu N., et al. Perspectives on optoelectronic oscillators. *APL Photonics*. 2023;8(2):020901. <https://doi.org/10.1063/5.0134289>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Степанов Иван Васильевич, младший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация. **Ivan V. Stepanov**, Research Assistant, Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation.
e-mail: stepanoviv@uust.ru
ORCID: [0000-0003-4677-5808](https://orcid.org/0000-0003-4677-5808)

Султанов Альберт Ханович, доктор технических наук, профессор, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация. **Albert Kh. Sultanov**, Doctor of Engineering Science, Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation.
e-mail: sultanov.ah@mail.ru
ORCID: [0000-0002-2830-3498](https://orcid.org/0000-0002-2830-3498)

Статья поступила в редакцию 02.07.2026; одобрена после рецензирования 18.08.2026; принята к публикации 25.08.2026.

The article was submitted 02.07.2026; approved after reviewing 18.08.2026; accepted for publication 25.08.2026.