

УДК 681.586.5

**К.А. Сафарян, А.А. Голдобин, А.М. Минкин,  
Л.А. Жикина, Е.В. Останина, М.М. Гончаров**

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный  
исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация

<sup>2</sup>ПАО «Пермская научно-производственная  
приборостроительная компания», Пермь, Российская Федерация

<sup>3</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Российская Федерация

<sup>4</sup>ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, Российская Федерация

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ**

Представлен численный анализ возможности создания диэлектрического датчика амплитудных колебаний и выбора его оптимальных параметров. Датчик состоит из кварцевого чувствительного элемента с прикрепленным к нему зеркалом, которое крепится к корпусу с помощью упругого подвеса, и двух оптических волокон. Исследование разделено на два основных этапа: моделирование механической части датчика и определение ее оптимальной геометрии и разработка модели оптического компонента датчика. Было проведено механическое исследование датчика вибрации с целью определения его резонансной частоты и определения оптимальной длины эластичной перемычки. Оптическая часть исследования была сосредоточена на выборе оптимальных параметров для конфигурации расположения оптических волокон. Результаты показали, что датчик имеет собственную частоту колебаний выше 2000 Гц, наблюдается слабая зависимость чувствительности датчика от частоты колебаний при длине перемычки 1 мм. В исследовании представлено аналитическое решение для выбора оптимальных параметров оптического компонента датчика. Исследование вносит вклад в разработку волоконно-оптических акселерометров для измерения и анализа вибрации в различных областях применения.

**Ключевые слова:** акселерометр, вибродатчик, оптика, амплитудно-частотная характеристика.

**K.A. Safaryan, A.A. Goldobin, A.M. Minkin,  
L.A. Zhikina, E.V. Ostanina, M.M. Goncharov**

<sup>1</sup>Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm Research and Production instrument-making company,  
Perm, Russian Federation

<sup>3</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>4</sup>"Inversion-Sensor", Perm, Russian Federation

## **MODELING OF A DIELECTRIC VIBRATION SENSOR**

The article presents a numerical analysis of the possibility of creating a dielectric amplitude oscillation sensor and selecting its optimal parameters. The sensor consists of a quartz sensing element with a mirror attached to it, which is attached to the body with an elastic suspension, and two optical fibers. The study is divided into two main stages: modeling the mechanical part of the sensor and determining its optimal geometry and developing a model of the optical component of the sensor. A mechanical study of the vibration sensor was carried out in order to determine its resonant frequency and determine the optimal length of the elastic jumper. The optical part of the study focused on the selection of optimal parameters for the configuration of the location of optical fibers. The results showed that the sensor has a natural oscillation frequency above 2000 Hz, and there is a weak dependence of the sensor sensitivity on the oscillation frequency with a jumper length of 1 mm. The study presents an analytical solution for choosing the optimal parameters of the optical component of the sensor. The research contributes to the development of fiber-optic accelerometers for measuring and analyzing vibration in various applications.

**Keywords:** accelerometer, vibration sensor, optics, amplitude-frequency response.

### **Введение**

Датчики вибрации являются незаменимыми инструментами для измерения и анализа движения, вибрации и ударов в широком спектре отраслей промышленности и областей применения, включая мониторинг состояния конструкций, обнаружение сейсмической активности и человеческой деятельности [1, 2]. Также они имеют широкую область применения в аэрокосмической области и позволяют обеспечить безопасность и надежность воздушных судов, а также оптимизировать их эксплуатационные характеристики [3]. Датчики вибрации используются для контроля вибрации вращающихся механизмов, таких как турбины, двигатели и насосы. Но существуют условия, при которых применение электрических датчиков невозможно, например, какие-либо взрывоопасные системы или системы, работающие при высоких температурах. Эту проблему решают датчики из диэлектрических

материалов с неэлектрической природой сигнала, например, диэлектрические оптические датчики вибрации. Такие датчики обладают высокой чувствительностью, точностью и устойчивостью к электромагнитным помехам, что делает их пригодными для использования в условиях, где не применимы электрические датчики.

В исследовании [4] описана разработка волоконно-оптического акселерометра на основе диэлектрического эластомера, который продемонстрировал высокую чувствительность, линейность и низкую чувствительность по поперечной оси. Устройство было протестировано в различных условиях, включая различные ускорения и температуры, и продемонстрировало стабильную и надежную работу.

В работе приведены результаты численного моделирования оптического датчика вибраций, работающего по схожему принципу. Основной задачей этой работы является подбор оптимальной конфигурации параметров датчика для корректной работы в области частот от 1 до 1000 Гц.

Цели этой работы – численный анализ возможности создания диэлектрического амплитудного датчика вибрации и подбор его оптимальных параметров.

### **Постановка задачи**

Принципиальная схема и трехмерная модель датчика вибрации, рассматриваемого в этой работе, представлены на рис. 1. Датчик представляет собой конструкцию, выполненную из кварца. Он содержит в себе чувствительный элемент (ЧЭ) 1 с закрепленным на нем зеркалом, который крепится к корпусу 3 с помощью подвеса 2. Упругая перемычка передает колебания от корпуса к чувствительному элементу. Также в конструкции есть два оптических волокна 4: источник и приемник. Принцип работы датчика основан на изменении мощности сигнала, попадающего в приемник после отражения от зеркала на чувствительном элементе. В зависимости от амплитуды и частоты колебаний мощность на приемнике будет меняться.

Работу по моделированию диэлектрического амплитудного датчика вибрации можно разделить на два основных этапа:

1. Первая часть работы посвящена моделированию механической части датчика и определению его оптимальной геометрии.

2. Вторая часть посвящена разработке модели оптической составляющей датчика.

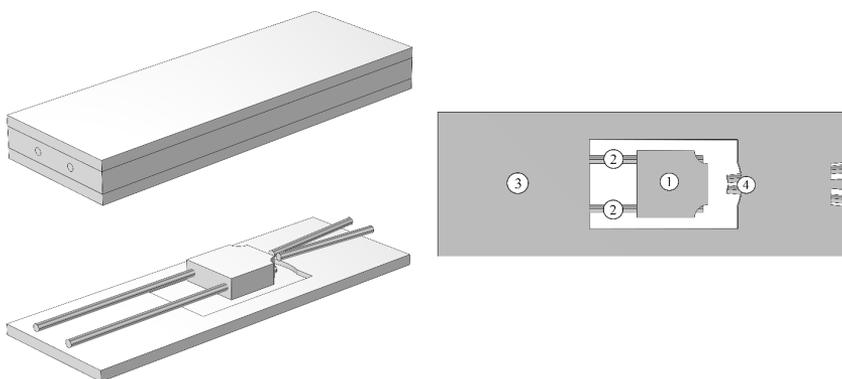


Рис. 1. Геометрия датчика: 1 – корпус; 2 – подвес; 3 – чувствительный элемент; 4 – оптические волокна

### Механический расчет

Первостепенной задачей механического исследования вибрационного датчика является определение собственной резонансной частоты, которая должна находиться вне диапазона рабочих частот.

Исследуемая геометрия датчика представлена на рис. 2, а. Для уменьшения расчетного времени она была упрощена и сведена к конструкции, состоящей из трех блоков: ЧЭ 1, подвес 2, корпус 3.

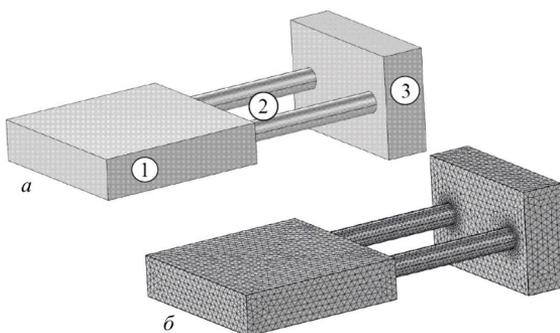


Рис. 2. Упрощенная исследуемая геометрия (а): 1 – чувствительный элемент; 2 – подвес; 3 – корпус; (б) – расчетная сетка

Расчетная область дискретизировалась сеткой, представленной на рис. 2, б. Для наилучшего разрешения деформаций на подвесе сетка уплотнена.

Для обнаружения резонансной частоты проведено численное исследование нагружения вибрационного датчика методом конечных элементов. В качестве граничных условий на основании датчика установлены гармонические колебания с разными частотами (рис. 3):

$$u_z = A \sin(\omega t),$$

где  $u_z$  – смещение основания датчика по координате  $z$ ,  $A$  – амплитуда смещения,  $\omega$  – циклическая частота колебаний,  $\omega = 2\pi\nu$ ;  $\nu$  – частота колебаний. Перемещения в плоскости  $XU$  отсутствуют.

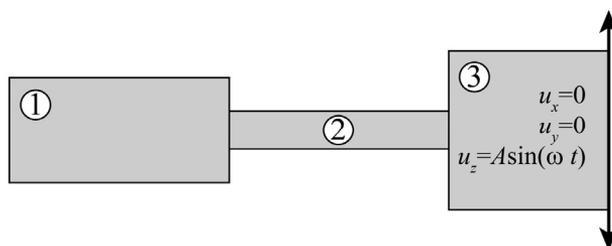


Рис. 3. Граничные условия: 1 – чувствительный элемент; 2 – подвес; 3 – корпус

В качестве материалов для датчика выбран кварц со свойствами:  $E = 73$  ГПа – модуль Юнга,  $\nu = 0,17$  – коэффициент Пуассона и  $\rho = 2210$  кг/м<sup>3</sup> – плотность.

Результат деформации датчика под действием вибраций представлен на рис. 4.

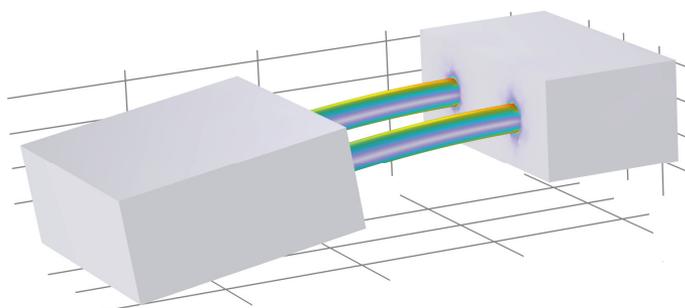


Рис. 4. Пример расчета

Для выявления наиболее выгодной конфигурации параметров варьировалась длина подвеса, это напрямую влияло на амплитудно-частотную характеристику. Результаты исследования представлены на

рис. 5. На рис. 5, *a* показана АЧХ при различных длинах подвеса: все рассмотренные длины дают собственную частоту датчика более 2000 Гц. Помимо этого на рис. 5, *б* показана слабая зависимость чувствительности датчика от частоты колебаний при  $L = 1$  мм.

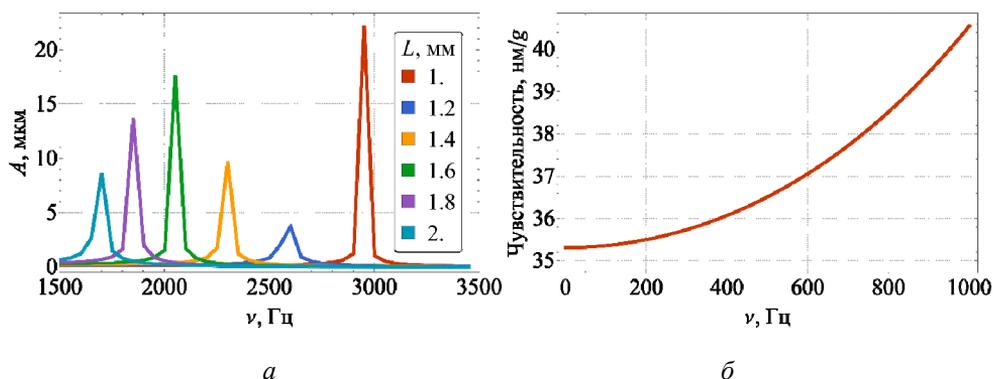


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика датчика (*a*) при разных длинах упругой перемычки; чувствительность датчика (*б*) при  $L = 1$  мм

### Оптическая часть

Для решения оптической задачи часть с оптическими волокнами рассматривается вне общей геометрии. Рассматриваемая оптическая схема представлена на рис. 6. Она состоит из двух оптических волокон – источника 1 и приемника 2, а также зеркала 3. Работа датчика заключается в том, что зеркало, закреплённое на ЧЭ, под воздействием вибраций изменяет свое положение, тем самым изменяется количество света, попавшего на приемник.

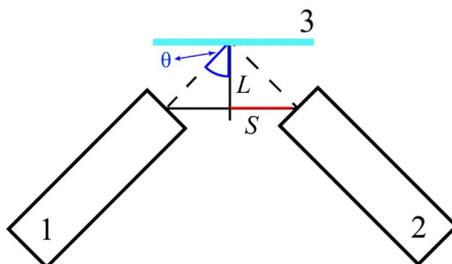


Рис. 6. Схема расположения волокон

Проще всего такую задачу рассмотреть, преобразовав в ней зеркало в шторку, которая перекрывает путь оптическому сигналу, и симметрично относительно шторки (зеркала) отразить оптическое

волокно. В результате задача сводится к схеме, изображенной на рис. 7, где  $\theta$  – угол между волокном и нормалью к зеркалу,  $s$  – половина расстояния между центрами волокон,  $L$  – расстояние от центра волокна до зеркала,  $Z$  – половина оптического пути. Такая система позволяет имитировать неполное отражение от зеркала

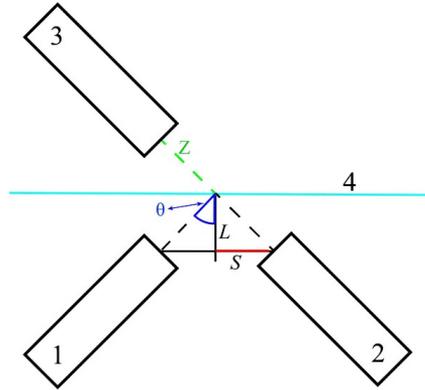


Рис. 7. Схема расположения волокон: 1 – волокно-приемник; 2 – волокно-источник; 3 – мнимое изображение волокна-приемника; 4 – шторка (зеркало)

Оптический сигнал задается как пучок Гаусса:

$$I = \frac{2I_0}{\pi w(z)^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{wz^2}\right),$$

где  $I_0$  – пиковая интенсивность в центре пучка,  $r$  – радиальное расстояние от оси;  $w(z)$  – радиус лазерного пучка по уровню интенсивности  $1/e^2$  (13,5 %) от  $I_0$ ;  $z$  – расстояние от плоскости, на котором фронт волны можно считать плоским;  $P$  – полная мощность излучения.

Шторка в данной модели имитируется умножением функции гауссова пучка на функцию Хевисайда:

$$f = \frac{1}{1 - \exp(-2ky)},$$

где  $f$  – функция Хевисайда,  $k$  – параметр крутизны подъема функции, который оценивается как  $\frac{10}{\Delta x}$ ,  $y$  – вертикальная координата шторки (зеркала).

В результате на языке программирования Python была написана численная модель, имитирующая работу оптической составляющей датчика. Модель позволяет варьировать в системе следующие параметры: положение зеркала, угол наклона зеркала, перекрытие волокон друг другом (соосность), расстояние от волокна до зеркала, расстояние между волокнами и угол между оптическими волокнами.

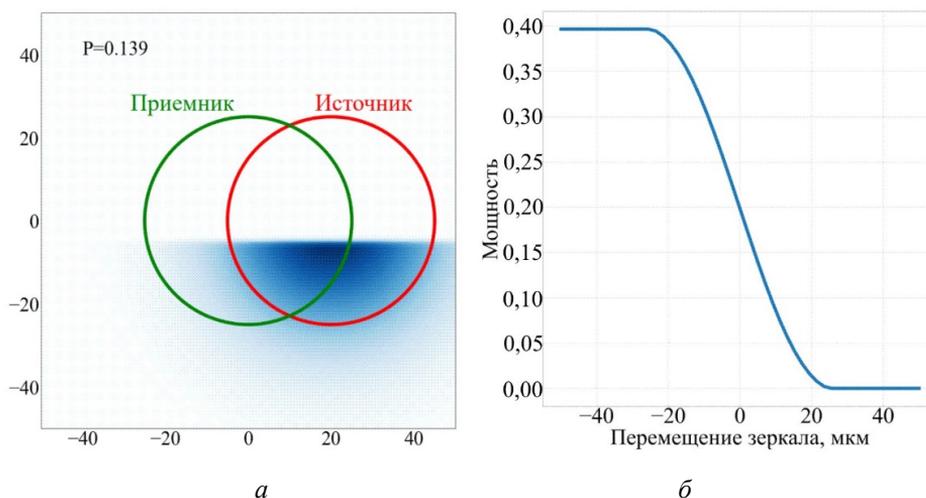


Рис. 8. Распределение оптического сигнала (*a*) относительно волокон: красное – волокно-источник, зеленое – волокно-приемник; *б* – зависимость мощности на приемнике от перемещения зеркала

### Заключение

В работе проведено численное исследование оптического амплитудного датчика вибраций. Определены основные механические параметры датчика: габариты, собственная частота и механическая чувствительность. Создана математическая модель оптической составляющей датчика, параметрами которой выступают мощность сигнала на приемнике, расстояние между центрами оптических волокон, угол между оптическими волокнами, расстояние от оптических волокон до чувствительного элемента, несоосность волокон, а также угол наклона зеркала.

В результате работы продемонстрирована принципиальная возможность создания диэлектрического датчика вибрации.

### Список литературы

1. Development and studies on FBG temperature sensor for applications in nuclear fuel cycle facilities / J. Kumar [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 21, № 6. – P. 7613–7619.
2. Initial and residual trapping of hydrogen and nitrogen in Fontainebleau sandstone using nuclear magnetic resonance core flooding / A. Al-Yaseri [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47, № 53. – P. 22482–22494.
3. Minakuchi S., Takeda N. Recent advancement in optical fiber sensing for aerospace composite structures // *Photonic Sensors*. – 2013. – Vol. 3. – P. 345–354.
4. Yan B., Liang L. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges // *IEEE Sensors Journal*. – 2019. – Vol. 20, № 9. – P. 4713–4718.

### References

1. Kumar J. et al. Development and studies on FBG temperature sensor for applications in nuclear fuel cycle facilities. *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 7613-7619.
2. Al-Yaseri A. et al. Initial and residual trapping of hydrogen and nitrogen in Fontainebleau sandstone using nuclear magnetic resonance core flooding. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47, no. 53, pp. 22482-22494.
3. Minakuchi S., Takeda N. Recent advancement in optical fiber sensing for aerospace composite structures. *Photonic Sensors*, 2013, vol. 3, pp. 345-354.
4. Yan B., Liang L. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges. *IEEE Sensors Journal*, 2019, vol. 20, no. 9, pp. 4713-4718.

## Сведения об авторах

### **Сафарян К.А.**

e-mail: safaryank@icloud.com

Инженер кафедры «Общая физика», Пермский государственный научный исследовательский университет, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь.

### **Голдобин А.А.**

e-mail: arseniy34259@gmail.com

Студент кафедры «Общая физика», Пермский государственный научный исследовательский университет, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь.

### **Минкин А.М.**

e-mail: minkin.90@gmail.com

Старший преподаватель кафедры «Физическая химия», Пермский государственный научный исследовательский университет, начальник отдела ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия.

### **Жикина Л.А.**

e-mail: lusyzh@gmail.com

Аспирантка кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, начальник лаборатории ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия.

## About the authors

### **Safaryan K.A.**

e-mail: safaryank@icloud.com

Engineer of the Department of "General Physics" Perm state university, laboratory assistant at the research laboratory of sensorics and advanced measuring Instruments, Perm.

### **Goldobin A.A.**

e-mail: arseniy34259@gmail.com

Student of the Department of "General Physics" Perm state university, laboratory assistant at the research laboratory of sensorics and advanced measuring Instruments, Perm.

### **Minkin A.M.**

e-mail: minkin.90@gmail.com

Senior Lecturer of the Physical Chemistry Department, PSNRU, Head of Department, PJSC PNPPC, Perm, Russian Federation.

### **Zhikina L.A.**

e-mail: lusyzh@gmail.com

Graduate student of Department of «Environmental Protection» at Perm National Research Polytechnic University, Head of Laboratory at Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russian Federation.

**Останина Е.В.**

e-mail: ostanina@i-sensor.ru

Магистрант кафедры «Общая физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, инженер-исследователь ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь.

**Ostanina E.V.**

e-mail: ostanina@i-sensor.ru

Master student of the Department of "General Physics" Perm National Research Polytechnic University, research engineer of Inversion Sensor Co., Ltd., Perm.

**Гончаров М.М.**

e-mail: goncharov.m.m@mail.ru

Ассистент кафедры «Общая физика», Пермский государственный научный исследовательский университет, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь.

**Goncharov M.M.**

e-mail: goncharov.m.m@mail.ru

Assistant of the department of "General Physics" PSU, laboratory assistant of the Research Laboratory of Sensors and Advanced Measuring Instruments, Perm.

**Финансирование:**

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 14.06.2023

**Одобрена:** 17.06.2023

**Принята к публикации:** 22.06.2023

**Funding:**

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 14/06/2023

**Approved:** 17/06/2023

**Accepted for publication:** 22/06/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Моделирование диэлектрического датчика вибрации / К.А. Сафарян, А.А. Голдобин, А.М. Минкин, Л.А. Жикина, Е.В. Останина, М.М. Гончаров // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 40–50.

Please cite this article in English as: Safaryan K.A., Goldobin A.A., Minkin A.M., Zhikina L.A., Ostanina E.V., Goncharov M.M. Modeling of a dielectric vibration sensor // Applied photonics, 2023, no. 4, pp. 40-50.