

УДК 534.08, 534.113, 681.586.5

И.Л. Никулин, А.Р. Сагирова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТОМЕХАНИКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АМПЛИТУДНОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ

Предложена аналитическая оптомеханическая математическая модель амплитудного волоконно-оптического датчика вибрации, учитывающая геометрические, упругие и оптические параметры чувствительного элемента, который представляет собой сейсмическую массу, закреплённую на двух оптических волокнах. Излучение из волокна в волокно передается через обратную призму, в которой имеет место полное внутреннее отражение. Четверть поверхности призмы сделана непрозрачной для настройки интенсивности проходящего излучения при колебаниях. В рамках геометрической оптики и линейной теории света представлена методика расчета хода лучей в оптическом тракте чувствительного элемента датчика, а также их интенсивности. Принимая распределение мощности волокна-источника гауссовым, рассчитаны распределения мощности на торце волокна приёмника при различных углах наклона сейсмической массы. В рамках теории упругости рассматриваются колебания сейсмической массы на оптических волокнах, проведена оценка собственных частот, получены выражения для угла наклона при различных воздействиях на датчик. Показаны связи между изменением мощности проходящего сигнала, интенсивностью воздействия и виброускорением.

Ключевые слова: математическое моделирование датчика, волоконно-оптический датчик вибрации, амплитудная модуляция, полное внутреннее отражение, упругая деформация, изгибная жёсткость, резонансная частота.

I.L. Nikulin, A.R. Sagirova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ANALYTICAL MODEL OF OPTOMECHANICS OF A FIBER-OPTIC AMPLITUDE VIBRATION SENSOR

An analytical optomechanical mathematical model of the amplitude fiber-optic vibration sensor taking into account the geometric, elastic and optical parameters of the sensing element is proposed. which is a seismic mass, mounted on two optical fibers, the radiation from fiber to fiber is transmitted through a reverse prism, in which there is a total internal reflection. A quarter of the surface of the prism is made opaque to adjust the intensity of the transmitted radiation during oscillations. Within the framework of geometric optics and the linear theory of light, a methodology for calculating the path of rays in the optical path of a sensor element of a sensor, as well as their intensity, is presented. Assuming the power distribution of the source fiber to be Gaussian, the power distributions at the end of

the receiver fiber at different angles of inclination of the seismic mass are calculated. In the framework of the theory of elasticity, oscillations of seismic mass on optical fibers are considered, natural frequencies are estimated, expressions for the tilt angle are obtained for various effects on the sensor. The connections of changing the power of the transmitted signal, the intensity of the impact and vibration acceleration are shown.

Keywords: mathematical modeling of the sensor, fiber-optic vibration sensor, amplitude modulation, total internal reflection, elastic deformation, bending stiffness, resonant frequency.

Введение

Волоконно-оптические датчики представляют перспективное направление развития техники [1], поскольку обладают следующими преимуществами: коррозионной стойкостью, что обеспечивает долгосрочную работу в жидкости; нечувствительностью к электромагнитным полям; малым размером и весом чувствительного элемента; высокой чувствительностью и пожаробезопасностью. Современные волоконно-оптические датчики могут измерять давление, температуру, деформацию, уровень жидкости, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и многое другое.

Вибродиагностика дает возможность следить за состоянием оборудования, не прерывая производственный процесс, решает задачи обнаружения неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта. С её помощью можно находить скрытые дефекты оборудования, что позволяет предотвратить поломку объекта, которая влечет за собой приостановку всего технологического процесса и является причиной убытков компании. Современные вибродиагностические системы доказали свою востребованность в различных отраслях промышленности [2]. Общая стоимость более 200 млн рублей (рис. 1).



Рис. 1. Отраслевой рынок вибродиагностики (2018 г.)

Датчики, работающие на основе дифракционных решеток, являются дисперсионными чувствительными элементами, позволяющими модифицировать спектр оптического сигнала. Такие оптические элементы, лежащие в их основе, применяются в качестве чувствительного элемента многих современных волоконно-оптических устройств, используемых в линиях связи (фильтрах, уплотнителях частотных каналов связи), являются важнейшим элементом лазерных резонаторов, в частности, при использовании в полупроводниковых миниатюрных лазерах решетка сужает спектр и улучшает угловую направленность излучения, т.е. они используются для решения наиболее актуальных задач формирования выходного сигнала.

Известен волоконно-оптический датчик по измерению поперечного давления на основе двухчастотного оптоэлектронного СВЧ-генератора, включающего волоконную брэгговскую решётку с фазовым π -сдвигом. Данный датчик работает на принципе поляризационного модулятора и свойств волоконной брэгговской решётки. Для наглядного примера работы датчика разработана компьютерная модель, с помощью которой можно видеть спектры сигналов при различных нагрузках [3]. Изменение температуры влияет на работу датчика, чувствительным элементом которого является волоконная брэгговская решетка. При повышении температуры период дифракционной решетки увеличивается, соответственно спектр сигнала на выходе изменяется. Такие датчики требуют термокомпенсации [4].

Оптические интерферометры Фабри–Перо, Ллойда, Майкельсона и Маха–Зандера часто встречаются как основной элемент в оптических датчиках. Данные интерферометры основаны на отражении от зеркал различной пропускной способности [5]. Возможна комбинация интерферометра и брэгговских решёток [6]. В устройствах этого типа воздействие определяется по сдвигу спектра и относительному смещению пиков амплитуды. Результаты показали, что комбинированный датчик является более чувствительным к малым воздействиям.

Альтернативой интерференционным датчикам служат амплитудные датчики, в которых происходит изменение амплитуды выходного сигнала. Амплитудные датчики значительно дешевле по стоимости, чем датчики на волоконных брэгговских решетках, поэтому идёт активная разработка таких датчиков. В работе [7] представлен волоконно-оптический датчик вибрации, принцип его работы основан на отра-

жении от зеркал различной отражательной способности. Обратный сигнал зависит от того, на полосу с какой отражательной способностью попал исходный сигнал. По амплитуде выходного сигнала определяется перемещение чувствительного элемента. Аналогичный амплитудный датчик вибрации представлен в работе [8]. Принцип работы основан на отражении от зеркал, расположенных под прямым углом друг к другу. Чувствительный элемент находится в подвешенном состоянии, при внешнем воздействии чувствительный элемент начинает колебаться, отражённый сигнал поступает в оптическое волокно в зависимости от угла отклонения чувствительного элемента. Сигналы, в перпендикулярной плоскости зеркалам, идут параллельно друг другу, так как изначально оптические волокна закреплены так же. Нелинейными эффектами в распространении света можно пренебречь, потому что эта часть незначительна. Нелинейное распространение света в волокне рассмотрено в работах [9, 10].

Целями настоящей работы являются:

- 1) разработка математической модели, связывающей интенсивностью проходящего через чувствительный элемент излучения с внешним вибрационным воздействием;
- 2) проведение вычислительных экспериментов;
- 3) определение параметров чувствительного элемента волоконно-оптического датчика вибрации.

Описание датчика

Предлагаемая модель описывает волоконно-оптический амплитудный датчик вибрации, аналогичный [8], но вместо зеркал применяется обратная призма из ниобата лития, его принципиальная схема представлена на рис. 2. Излучение от источника передается по оптическому волокну к чувствительному элементу и от него к фотоприёмнику. В чувствительном элементе оптические волокна зафиксированы параллельно на основании 1, которое жестко закреплено на измеряемом объекте. Сейсмическая масса 2 удерживается теми же оптическими волокнами. Поскольку расстояние между основанием и сейсмической массой мало, изгибом волокна в отсутствие вибрации пренебрегаем. Излучение от источника выходит через отполированный торец волокна-источника 5, преломляется в обратной призме 4 и попадает во второе волокно-приёмник 6, по которому идёт к фотоприёмнику.

Внутри призмы на гранях имеет место полное внутренне отражение. Четверть торца призмы непрозрачна, что предназначено для смещения максимума интенсивности прошедшего через призму излучения при колебаниях.

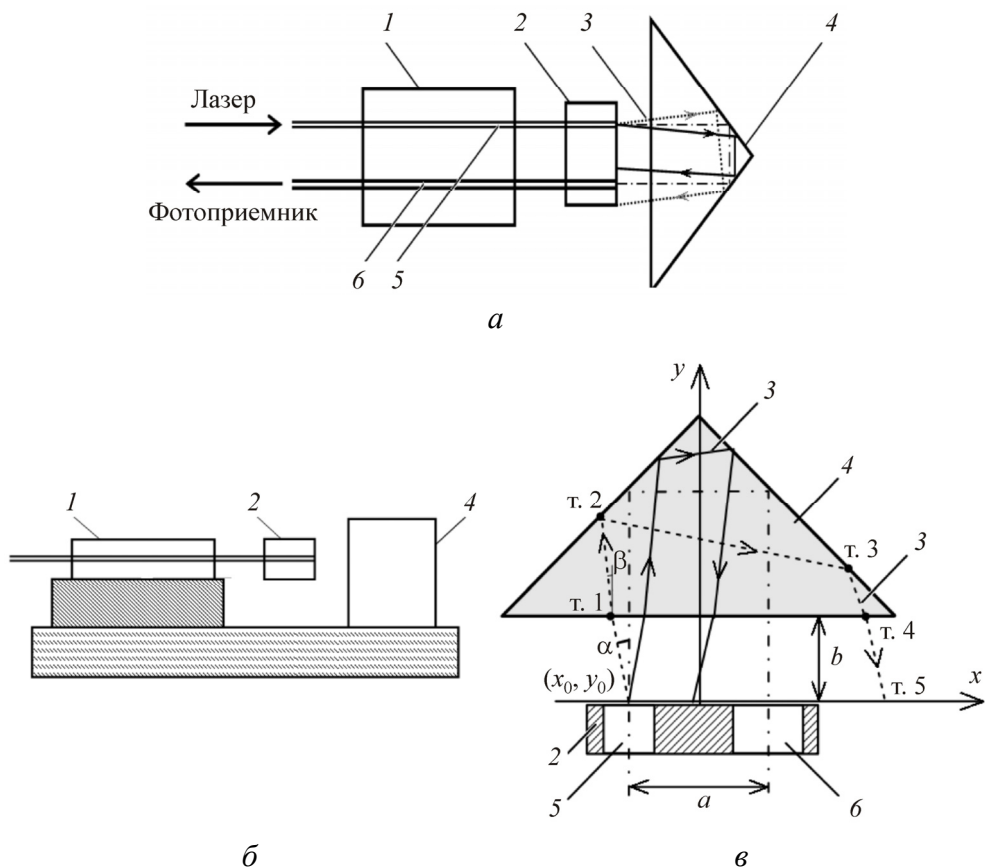


Рис. 2. Схема датчика вибрации: *a* – вид сверху, *б* – вид сбоку, *в* – схема оптического тракта: 1 – основание; 2 – сейсмическая масса; 3 – вышедшее из волокна излучение; 4 – оборотная призма; 5 – волокно-источник; 6 – волокно-приемник

Математическая модель оптического тракта

Для предложенного датчика разработана математическая модель, позволяющая оценить конструктивные параметры чувствительного элемента. Схема оптического тракта приведена на рис. 2, *в*. В модели приняты следующие допущения. Распределение мощности на выходе из волокна-источника принято гауссовым в пределах числовой апертуры NA_1 с дифференциальной функцией распределения по углу ϑ (рис. 3):

$$f(\vartheta) = \frac{3}{NA_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{9\vartheta^2}{2NA_1^2}\right\}, \quad (1)$$

тогда мощность излучения может быть рассчитана как

$$P(\vartheta, \varphi) = f(\vartheta) \cdot \text{tg}(\vartheta) d\vartheta d\varphi, \quad (2)$$

где φ – азимутальный угол относительно оси волокна.

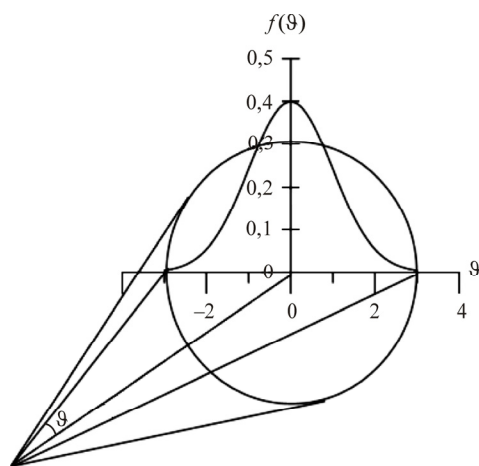


Рис. 3. Гауссово распределение мощности на выходе из волокна-источника

Излучаемый свет принят как естественный, следовательно, интенсивности излучения, поляризованного в плоскости падения и перпендикулярно ей, одинаковы. Интенсивность света невелика, поэтому в рамках линейной оптики коэффициенты отражения на призме и на торцах волокон могут рассчитываться по формулам:

$$r_{\parallel} = -\frac{\text{tg}(\alpha-\beta)}{\text{tg}(\alpha+\beta)}, \quad r_{\perp} = -\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}, \quad (3)$$

где α и β – углы падения и преломления. Отражение и преломление излучения описываются в рамках линейной оптики. Координаты точек преломления и отражения луча (см. рис. 2) описываются следующими соотношениями:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = n_2, \quad x_1 = x_0 + b \cdot \text{tg}(\alpha), \quad x_2 = \frac{x_1 - \frac{h \cdot \text{tg}(\beta)}{2}}{1 + \text{tg}(\beta)}, \quad y_2 = x_2 + \frac{h}{2},$$

$$x_3 = \frac{\frac{h}{2} + x_1 \cdot \text{tg}(\beta) - y_2}{1 + \text{tg}(\beta)}, \quad y_3 = -x_3 + \frac{h}{2}, \quad x_4 = x_3 - y_3 \cdot \text{tg}(\beta), \quad x_5 = x_4 - b \cdot \text{tg}(\alpha), \quad (4)$$

$$z_5 = z_0 + 2b \cdot \text{tg}(\alpha_z) + h \cdot \text{tg}(\beta_z),$$

где (x_0, y_0, z_0) и (x_5, y_5, z_5) – координаты входа и выхода луча, α_z и β_z – углы падения и преломления в плоскости YOZ, b – расстояние между волокном и призмой.

Для призмы из ниобата лития показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей равны $n_o = 2,21$ и $n_e = 2,13$ соответственно, предельные углы в этом случае 27° и 28° . Углы падения на грань призмы (см. рис. 2, *з*) лежат в пределах $(45 \pm \beta)^\circ$ при $\beta \leq 3,89^\circ$ для углов падения в пределах числовой апертуры. Следовательно, на внутренних гранях призмы происходит полное внутреннее отражение.

Улавливается только излучение, попадающее на сердцевину волокна-приемника, не попавшее на непрозрачную область призмы и в пределах числовой апертуры волокна-приёмника:

$$P = \int_S P(\vartheta, \varphi) \prod_{i=1}^4 (1 - r_i) dS, \quad (5)$$

где r_i – коэффициент отражения для i -й поверхности, 1 – торец волокна-источника; 2 и 3 – внешние границы призмы в точках т.1 и т.4; 4 – торец волокна-приемника, интегрирование ведётся по поверхности волокна-приёмника.

Математическая модель упругой части

При малых поперечных колебаниях уравнение движение волокна с грузом имеет вид [11]:

$$\ddot{u} + \frac{EJ}{\rho S} \cdot \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = q(x) \cos(\omega t), \quad (6)$$

где u – $u(x, t)$ локальное поперечное смещение волокна в направлении, перпендикулярном оси волокна, t – время, E – модуль Юнга, J – момент инерции поперечного сечения, $J = \pi r^4/4$, r – радиус оптического волокна, ρ – плотность, S – площадь поперечного сечения волокна, $S = \pi r^2$, $q(x)$ и ω – интенсивность и циклическая частота воздействующей силы.

В установившемся режиме колебания волокна с сейсмической массой происходят с частотой вынуждающей силы, и решение можно представить как произведение амплитудной части смещения $u(x)$ и гармонической функции:

$$u(x, t) = u(x) \cos \omega t. \quad (7)$$

Граничные условия для уравнения (6) записываются из следующих допущений. Для закреплённой части (см. рис. 2) смещение волокна относительно основания отсутствует:

$$u(0) = 0, \quad (8)$$

и угол поворота поперечного сечения α волокна равен нулю:

$$\alpha(0) = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (9)$$

Сейсмическую массу на незакреплённом конце волокна $x = l$ в качестве первого приближения примем сосредоточенной массой, пренебрегая инерцией его поворота вокруг оси, проходящей через точки закрепления волокон в основании. В этом случае на свободном конце изгибающий момент M отсутствует:

$$M(l) = \eta^2 EJ \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{x=l} = 0, \quad (10)$$

а перерезывающая сила F равна силе инерции, действующей на волокно со стороны сейсмической массы:

$$F(l) = \eta^3 EJ \left. \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right|_{x=l} = m\ddot{u}(l). \quad (11)$$

Уравнение смещения (6) с учётом решения (7) приводит к уравнению для амплитуды:

$$u^{(IV)} - \eta^4 u = \frac{q}{EJ}, \quad (12)$$

где

$$\eta^4 = \omega^2 \frac{\rho S l^4}{EJ}. \quad (13)$$

Решение уравнения (12) ищется в виде суперпозиции [11]:

$$u(\eta\zeta) = \sum_{i=1}^4 C_i K_i(\eta\zeta) - Q, \quad (14)$$

где $\zeta = \frac{x}{l}$ – безразмерная координата, K_i – функции Крылова:

$$K_1 = \frac{1}{2}(\operatorname{ch} x + \cos x), \quad K_2 = \frac{1}{2}(\operatorname{sh} x + \sin x), \quad K_3 = \frac{1}{2}(\operatorname{ch} x - \cos x),$$

$$K_4 = \frac{1}{2}(\operatorname{sh} x - \sin x), \quad C_i - \text{коэффициенты, определяемые из граничных}$$

условий (7)–(10), $Q = \frac{ql^4}{EJ}$. Уравнение (13) при $q = 0$ даёт характеристическое уравнение, из которого находятся значения параметра η_i :

$$\cos \eta_i = \kappa \eta_i (\sin \eta_i - \operatorname{th} \eta_i \cos \eta_i) - \frac{1}{\operatorname{ch} \eta_i}, \quad (15)$$

где κ – отношение масс сейсмической и волокон, $\kappa = \frac{m}{2\rho Sl}$. Двойка в знаменателе учитывает тот факт, что сейсмическая масса удерживается парой волокон. Собственные частоты колебательной системы, которые являются резонансными, определяются выражением:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{4\pi} \frac{\eta^2 r}{l^2} \sqrt{\frac{2E}{\rho}}. \quad (16)$$

Подстановка граничных условий (7)–(10) в уравнение (13) даёт следующие выражения для коэффициентов C_i :

$$\begin{aligned} C_1 &= Q, \quad C_2 = 0, \\ C_3 &= Q \frac{\sin \eta \operatorname{sh} \eta + \mu (\sin \eta \operatorname{ch} \eta + \cos \eta \operatorname{sh} \eta)}{1 + \cos \eta \operatorname{ch} \eta + \mu (\cos \eta \operatorname{sh} \eta - \sin \eta \operatorname{ch} \eta)}, \\ C_4 &= -Q \frac{\sin \eta \operatorname{ch} \eta + \cos \eta \operatorname{sh} \eta + 2\mu \cos \eta \operatorname{ch} \eta}{1 + \cos \eta \operatorname{ch} \eta + \mu (\cos \eta \operatorname{sh} \eta - \sin \eta \operatorname{ch} \eta)}, \end{aligned} \quad (17)$$

здесь $\mu = \frac{m\omega^2}{\eta^3 EJ}$. Коэффициенты в выражениях (17) при $\mu = 0$ совпадают с известными выражениями, полученными для колеблющейся консоли без груза на конце.

Таким образом, смещение конца волокна с сейсмической массой определяется уравнением (14) с коэффициентами (16), а угол наклона излучающего и принимающего волокна α – выражением

$$\alpha = \left. \frac{\partial u(\eta)}{\partial x} \right|_{\xi=1}. \quad (18)$$

Результаты моделирования и их обсуждение

Расчёты проводились для следующих параметров: тип волокна SMF-28, радиус оболочки $r = 62,5$ мкм, модуль Юнга $E = 16,56$ ГПа [12], плотность кварцевого волокна $\rho = 2650$ кг/м³, плотность ниобата лития,

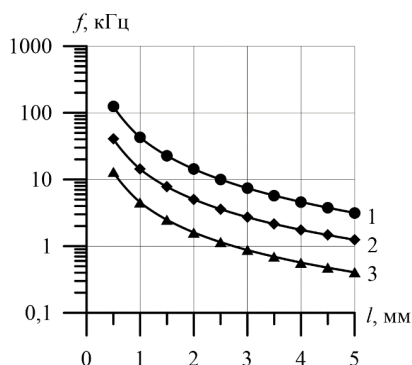


Рис. 4. Зависимость собственных частот от длины волокна при различных сейсмических массах, представленных произведениями плотности материала сейсмической массы $\rho_m = 4650 \text{ кг/м}^3$ на размеры в мм (д \times ш \times в): 1 – $\rho_m \cdot 1 \times 1 \times 0,1$; 2 – $\rho_m \cdot 1 \times 1 \times 1$; 3 – $\rho_m \cdot 5 \times 2 \times 1$

зависимости для смещения конца волокна и угла его наклона как функции вынуждающей нагрузки, определяемые уравнениями (13) и (17), имеют вид:

$$\begin{aligned} u|_{x=l} &= 1,0000 \cdot Q, \\ \alpha|_{x=l} &= 2,3541 \cdot Q. \end{aligned} \quad (19)$$

Геометрические параметры расчёта оптической части датчика (см. рис. 1, в): $a = 0,25$ мм, $b = 0,1$ мм, диагональ призмы $h = 1,6$ мм. На рис. 5 представлены результаты моделирования: на рис 5, а – зависимость относительной мощности излучения P/P_0 от угла наклона α волокна с сейсмической массой, здесь P_0 – излучаемая мощность, P – регистрируемая мощность, которая попадает на торец сердцевинки волокна-приёмника в пределах числовой апертуры. Положение равновесия $\alpha = 0$ дополнительно отмечено вертикальной чертой. На рис. 5, б–г показаны распределения интенсивности по поверхности сердцевинки торца волокна-приёмника (ограничивающий круг) при различных углах наклона α . На рис. 5, а максимум интенсивности смещён относительно положения равновесия, это достигается отсечением части излучения непрозрачным участком на торце оборотной призмы (см. рис. 5, б тёмно-серая область, ограничивающая снизу проходящее излучение). Этот

из которого выполняется сейсмическая масса, $\rho_m = 4650 \text{ кг/м}^3$. Результаты расчётов собственной частоты колебательной системы при различных длинах волокна приведены на рис. 4. Собственная частота убывает как с увеличением сейсмической массы, так и с длиной волокна.

Для чувствительного элемента с рабочей длиной волокон $l = 1$ мм, сейсмической массой с размерами $1 \times 1 \times 1$ мм и частотой 100 Гц, которая далека от резонансной 14,3 кГц, получены следующие значения коэффициентов: $\kappa = 17,87$, $\eta = 0,6380$, $\mu = 2,226 \cdot 10^6$: $C_1 = Q$, $C_2 = 0$, $C_3 = -7,3359 \cdot Q$, $C_4 = 11,243 \cdot Q$. За-

непрозрачный участок также помогает идентифицировать смещение и отклонение волокна при колебаниях вверх или вниз по усилению или ослаблению сигнала соответственно. Так, при отклонении на угол $\alpha = 0,03$ рад регистрируется пик интенсивности, который обусловлен попаданием на волокно-приёмник центральной части излучаемого гауссового пучка (см. рис. 3, в). При значительных отклонениях от положения равновесия на волокно-приёмник попадает периферийная часть гауссового пучка (см. рис. 5, з), переносящая незначительную часть излучаемой энергии, при этом регистрируется низкая мощность.

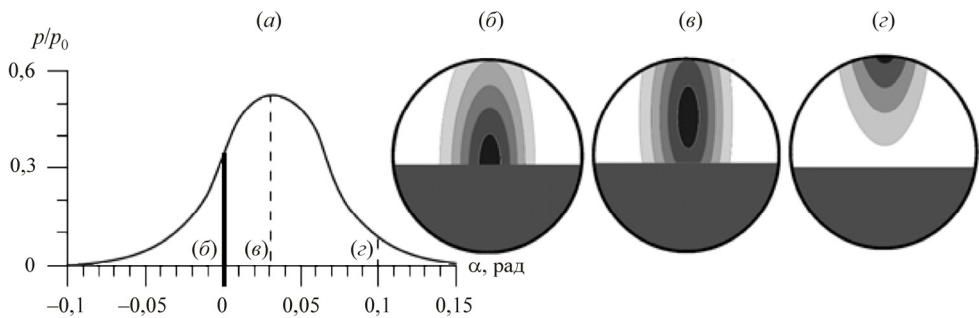


Рис. 5. Результаты моделирования сигнала с чувствительного элемента: зависимость относительной мощности P/P_0 от угла наклона головки α (а) и распределение интенсивности на принимающем торце волокна-приёмника при $\alpha = 0$ рад (б), $\alpha = 0,03$ (в) $\alpha = 0,1$ (г) (серая область внизу торца волокна-приёмника обозначает непрозрачную область на поверхности призмы)

Полный расчёт упругой и оптической частей чувствительного элемента позволяет оценить параметры системы ввода и регистрации излучения. Так, при действии на чувствительный элемент периодической вынуждающей силы $F = 0,38$ Н и частотой $f = 100$ Гц угол α отклонения волокна с сейсмической массой от положения равновесия составляет $0,001$ рад. При мощности излучения источника 1 мВт изменения при отклонении $\alpha = 0,001$ приводят к изменению мощности на 4 мкВт, что измеримо современными техническими средствами. Обратный расчёт от изменения мощности к углу отклонения позволяет определить виброускорение: исключая из соотношений (18) величину Q , получаем зависимость амплитуды смещения от максимального угла наклона $u_{\max} = \alpha_{\max}/2,3541$. Далее по соотношению определяется виброускорение:

$$a = u_{\max} \omega^2 . \quad (20)$$

В приведённом примере оно составляет 17,1g, где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Заключение

Предложена аналитическая оптомеханическая модель волоконно-оптического амплитудного датчика вибрации, учитывающая геометрические, упругие и оптические параметры чувствительного элемента и связывающая интенсивность внешнего вибрационного воздействия с мощностью проходящего излучения.

В рамках геометрической оптики и линейной теории света построена аналитическая модель оптического тракта чувствительного элемента. Получена аналитическая формула, связывающая интенсивность внешнего воздействия с отклонением и углом наклона свободного конца волокна.

Для набора параметров определена зависимость собственной частоты колебаний чувствительного элемента от длины рабочей части волокна. Показано, что при указанных параметрах собственная частота зависит от сейсмической массы и длины волокна. Рассчитаны распределения мощности на торце волокна приёмника при различных углах наклона сейсмической массы. Проведена оценка отклика системы регистрации вибрации, содержащей описанный элемент на воздействие.

Представленная аналитическая модель может быть полезна для прогнозирования параметров чувствительных элементов датчиков вибрации, систем ввода и регистрации излучения для этих датчиков, а также для отладки алгоритмов, использующих численные методы.

Список литературы

1. Точечные волоконно-оптические датчики вибрации. – URL: <https://i-sensor.ru/index.php/technology/tochechnye-volonno-opticheskie-datchiki>
2. Ростендер [Электронный ресурс]. – URL: <http://rostender.info> (дата обращения: 15.11.2018).
3. Магдеев Б.И., Формакидов Н.А., Денисенко Е.П. Компьютерная модель волоконно-оптического датчика для измерения поперечного давления на основе двухчастотного оптоэлектронного генератора // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3.

4. Шардаков И.Н., Кошелева Н.А., Цветков Р.В. Экспериментальный и теоретический варианты термокомпенсации волоконно-оптических датчиков деформации // Прикладная фотоника. – 2017. – № 4. – С. 324–335.

5. Герентьев В.С., Симонов В.А. Метод моделирования асимметричного зеркала для дифракционного отражательного интерферометра в одномодовом волокне // Прикладная фотоника. – 2017. – № 2. – С. 107–120.

6. Абдуллина С.Р., Скворцов М.И., Немов И.Н. Исследование возможностей датчика деформации на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо из двух брэгговских решёток // Прикладная фотоника. – 2015. – № 3. – С. 276–286.

7. Paritsky A., Modiin (IL); Alexander Kots, Ashdod (IL); YuiKahana, Rinatya (IL) Fiber Optic Accelerometer. Patent No.: US8,770,024 B1.

8. Mathieu Cloutier, Richelieu (CA); Jean Pronovost, St-Mathieu de Beloeil (CA); Marius Cloutier, Longueuil (CA). Patent Application Publication, 2007.

9. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Результаты моделирования нелинейного маломодового распространения оптического импульса в волоконном световоде // Прикладная фотоника. – 2016. – № 3. – С. 309–320.

10. Математическое моделирование волоконных световодов типа «панда» / А.Г. Андреев [и др.] // Прикладная фотоника. – 2017. – № 3. – С. 208–211.

11. Филиппов А.Р. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 733 с.

12. Measured and calculated bending stiffness of individual fibers / W.J. Fischer [et al.] // Conference Paper. – 2014. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/267909744>.

References

1. Tochechnye volokonno-opticheskie datchiki vibratsii [Point fiber-optic vibration sensors], available at: <https://i-sensor.ru/index.php/technology/tochechnye-volokonno-opticheskie-datchiki> (accessed 15 November 2018).

2. Rostender [Rostender], available at: <http://rostender.info> (accessed 15 November 2018).

3. Magdeev B.I., Formakidov N.A., Denisenko E.P. Kompiuternaia model volokonno-opticheskogo datchika dlia izmereniia poperechnogo davleniia na osnove dvukhchastotnogo optoelektronnogo generatora [A computer model of a fiber-optic sensor for measuring transverse pressure based on a two-frequency optoelectronic generator]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2018, no. 3.

4. Shardakov I.N., Kosheleva N.A., Tsvetkov R.V. Eksperimentalnyi i teoreticheskii varianty termokompensatsii volokonno-opticheskikh datchikov deformatsii [Experimental and theoretical options for thermal compensation of fiber-optic strain gauges]. *Applied photonics*, 2017, no. 4, pp. 324-335.

5. Terentev V.S., Simonov V.A. Metod modelirovaniia asimmetrichnogo zerkala dlia difraktsionnogo otrazhatelnogo interferometra v odnomodovom volokne [A method of modeling an asymmetric mirror for a diffraction reflective interferometer in a single-mode fiber]. *Applied photonics*, 2017, no. 2, pp. 107-120.

6. Abdullina S.R., Skvortsov M.I., Nemov I.N. Issledovanie vozmozhnostei datchika deformatsii na osnove volokonno interferometra Fabri-Pero iz dvukh breggovskikh reshetok [A strain gauge capabilities investigation based on a Fabry-Perot fiber interferometer from two Bragg gratings]. *Applied photonics*, 2015, no. 3, pp. 276-286.

7. Paritsky A., Modiin (IL); Alexander Kots, Ashdod (IL); YuiKahana, Rinatya (IL) Fiber optic accelerometer. Patent no.: US8,770,024 B1.

8. Cloutier M., Pronovost J., Cloutier M. Patent Application Publication, 2007.

9. Burdin V.A., Burdin A.V. Rezultaty modelirovaniia nelineinogo malomodovogo rasprostraneniia opticheskogo impulsa v volokonnom svetovode [Simulation results of an optical pulse nonlinear low-mode propagation in a fiber]. *Applied photonics*, 2016, no. 3, pp. 309-320.

10. Andreev A.G. et al. Matematicheskoe modelirovanie volokonnykh svetovodov tipa «panda» [Mathematical modeling of the "panda" fiber optics]. *Applied photonics*, 2017, no. 3, pp. 208-211.

11. Filippov A.R. Kolebaniia deformiruemykh sistem [Oscillations of deformable systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1970, 733 p.

12. Fischer W.J. et al. Measured and calculated bending stiffness of individual fibers. Conference Paper, 2014, available at: <https://www.researchgate.net/publication/267909744> (accessed 15 November 2018).