

УДК 681.7.068

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗГИБНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

И.В. Шилова¹, О.А. Бельская², А.Б. Сотский²

¹Белорусско-Российский университет, Могилев

²Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова, Могилев

ELECTRODYNAMIC MODEL OF THE BENDING FIBER-OPTIC SENSOR

I.V. Shilova¹, O.A. Belskaya², A.B. Sotsky²

¹Belarusian-Russian University, Mogilev

²A.A. Kuleshov Mogilev State University, Mogilev

На основании модели петлевой волоконно-оптической антенны исследованы изгибные потери излучения, вызванные эллиптической деформацией чувствительного элемента волоконно-оптического датчика давления.

Ключевые слова: оптическое волокно, волоконно-оптический датчик давления.

Bending radiation loss caused by elliptical deformation in the sensitive element of the fiber-optic pressure sensor was investigated on the basis of the fiber-optic loop antenna model.

Keywords: optical fiber, fiber optical sensor of pressure.

Введение

В некоторых областях промышленности, например в энергетике, высокий уровень электромагнитных полей создает помехи и наводки в традиционных датчиках давления с электрическим выходным сигналом: тензометрических, ёмкостных, пьезоэлектрических и т. д. Это затрудняет их практическое применение. Такая ситуация возникает, например, при измерении давления в маломасляных выключателях на электростанциях. Для ряда приложений необходим также контроль давления в горючих и взрывоопасных средах. В указанных ситуациях могут быть использованы волоконно-оптические датчики давления.

В настоящее время разработано большое количество волоконно-оптических первичных преобразователей различных физических величин [1]–[4]. Из этого числа наиболее простыми и надежными являются амплитудные датчики, использующие модуляцию потерь в изогнутых оптических волокнах. Главным недостатком таких датчиков является их низкая чувствительность по сравнению с интерференционными и поляризационными волоконно-оптическими датчиками. Поэтому не прекращаются поиски возможностей повышения чувствительности изгибных датчиков. Исследования идут в направлениях использования многоэлементных конструкций, содержащих в одном датчике различные типы оптических волокон [5], применения микроструктурных волокон [6] и регистрации изменения спектральных характеристик излучения при механическом воздействии на изогнутое оптическое волокно [7].

Решение оптимизационных задач по максимизации чувствительности волоконно-оптических датчиков изгибного типа требует разработки адекватных теоретических моделей сенсорных эффектов. В настоящей работе представлена такого рода модель для датчика давления, в котором чувствительным элементом служит эллиптически деформируемая петля, состоящая из нескольких витков жгута многомодовых оптических волокон.

1 Постановка задачи

При использовании оптических волокон в датчиках возникает проблема ввода излучения в волокно. С целью облегчения указанного ввода нами разработан датчик давления, содержащий волоконно-оптическую светопередающую часть в виде волоконно-оптического жгута, состоящего из нескольких многомодовых оптических волокон. Жгут имеет круговое сечение на его концах и плоское сечение в середине. В этом случае ввод излучения в оптические волокна не требует применения прецизионных фокусирующих оптических систем [8], [9].

Схема преобразования прогиба мембраны датчика давления в величину изменения кривизны колец оптических волокон приведена на рисунке 1.1.

Конструкция первичного преобразователя волоконно-оптического датчика давления содержит корпус 1, прикрепляемый с помощью штуцера к объекту, в котором измеряется давление жидкости или газа. В корпусе 1 закреплена мембрана 2, которая при изменении давления прогибается и

смещает шток 3, который, в свою очередь, с помощью поворотного механизма 4 деформирует кольца жгута оптических волокон 5. При этом локальная кривизна витков волокон внутри жгута изменяется, что приводит к модуляции выходного сигнала вследствие изменения условий выхода энергии мод изогнутых оптических волокон в защитную полимерную оболочку. В качестве источника излучения используется светодиод с длиной волны 630–640 нм, а в качестве приемника излучения – фотодиод ФД-256.

Светопередающая часть 5 в виде волоконно-оптического жгута содержит несколько отрезков многомодового кварц-кварцевого волокна с диаметром сердцевины 50 мкм и диаметром кварцевой оболочки 125 мкм. Последняя покрыта полимерной защитной оболочкой. Полный диаметр волокна в защитной оболочке составляет 300 мкм. При разработке конструкции датчика были выбраны многомодовые оптические волокна, поскольку они имеют невысокую стоимость и большой радиус сердцевины, что облегчает ввод излучения в жгут. На концах жгута волокна собраны и склеены вместе в виде цилиндров.

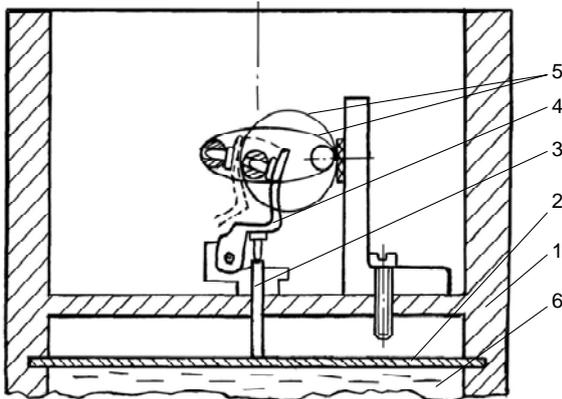


Рисунок 1.1 – Схема преобразования прогиба мембраны под действием давления в величину изменения кривизны колец оптических волокон (1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – шток; 4 – поворотный механизм; 5 – светопередающая часть; 6 – измеряемая среда (жидкость или газ))

Поскольку работа датчика объясняется излучением света из сердцевины каждого из волокон жгута при изгибе жгута и поглощением этого света защитной полимерной оболочкой волокна, исследование светопропускания чувствительного элемента датчика сводится к расчету потерь излучения, вызванных изгибом одного многомодового оптического волокна.

При деформации петли волокна в датчике (рисунок 1.1) будут изменяться радиусы локальных изгибов волокна в пределах петли. Поскольку свет распространяется вдоль волокна в виде его собственных мод, а затухание каждой из этих мод существенно зависит от радиуса изгиба

волокна [10], деформация петли волокна в датчике вызовет модуляцию пропускания волокна, представляющую собой сенсорный эффект.

Для описания данного эффекта воспользуемся известной скалярной теорией излучения кольцевой волоконно-оптической антенны [10], [11].

Предположим, что возбуждение волокна в датчике осуществляется широким световым пучком амплитуды A , падающим перпендикулярно входному торцу волокна. В этом случае оптическое поле внутри волокна, записанное в цилиндрических координатах, не зависит от угловой переменной. В результате в волокне будут возбуждаться только те моды, которые не имеют угловой структуры поля. Радиальная зависимость поля ν -й собственной моды такого типа описывается цилиндрическими функциями:

$$u_\nu = J_0(\chi_{co}r) \text{ при } r \leq r_0, \\ u_\nu = \frac{J_0(\chi_{co}r_0)H_0^{(2)}(\chi_{cl}r)}{H_0^{(2)}(\chi_{cl}r_0)} \text{ при } r > r_0,$$

где r_0 – радиус сердцевины волокна, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число вакуума, n_{co} , n_{cl} – показатели преломления сердцевины и оболочки волокна,

$$\chi_{co} = \sqrt{k_0^2 n_{co}^2 - \beta_\nu^2}, \quad \chi_{cl} = \sqrt{k_0^2 n_{cl}^2 - \beta_\nu^2},$$

β_ν – постоянная распространения моды, удовлетворяющая дисперсионному уравнению

$$\chi_{co} J_1(\chi_{co}) H_0^{(2)}(\chi_{cl}) = \chi_{cl} J_0(\chi_{co}) H_1^{(2)}(\chi_{cl}). \quad (1.1)$$

Амплитуда ν -й собственной моды указанного типа на входе в волокно может быть рассчитана по формуле [10]

$$C_\nu = AT \int_0^\infty u_\nu r dr \left(\int_0^\infty u_\nu^2 r dr \right)^{-1},$$

где T – френелевский коэффициент прохождения светом границы раздела воздух – материал волокна.

В рамках теории излучения кольцевой волоконно-оптической антенны затухание ν -й моды волокна, вызванное его круговым изгибом, характеризуется коэффициентом [10]

$$\gamma_\nu = \left(\frac{\pi V^8}{16 r_0 R_c W^3} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{4 R_c \Delta W^3}{3 r_0 V^2} \right) \times \\ \times \left(\int_0^{r_0} u_\nu I_0(WR) R dR \right)^2 \left(\int_0^\infty u_\nu^2 R dR \right)^{-1}, \quad (1.2)$$

где R_c – радиус изгиба волокна, $V = k_0 r_0 \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}$, $\Delta = 0.5(n_{co}^2 - n_{cl}^2)n_{co}^{-2}$, $W = k_0 r_0 \sqrt{\beta_\nu^2 - n_{cl}^2}$, $I_0(WR)$ – модифицированная функция Бесселя, $R = r/r_0$.

В рассматриваемом датчике давления происходит деформация изначально круговой петли оптического волокна, вследствие которой форма петли становится близкой к эллипсу. На основании этого мы аппроксимировали указанную петлю

четырьмя радиальными участками с длинами L_i и радиусами изгиба $R_c^{(i)}$, где i – номер участка (рисунок 1.2).

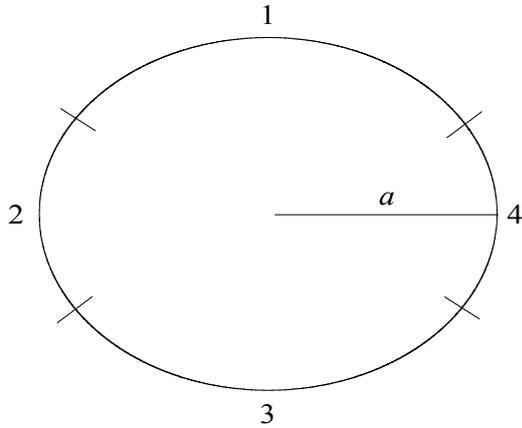


Рисунок 1.2 – Аппроксимация петли волокна четырьмя радиальными участками с номерами 1, 2, 3, 4

Этим участкам соответствуют параметры $R_c^{(1),(3)} = R_c^{(2),(4)} + (a - R_c)(2\varphi \pi^{-1} - 1 + \cos \varphi)$, (1.3)

$$L_{1,3} = (\pi - 2\varphi) R_c^{(1),(3)}, \quad (1.4)$$

$R_c^{(2),(4)} = a - (a - R_c)(2\varphi \pi^{-1} - 1 + \cos \varphi) \cos \varphi$, (1.5)

$$L_{2,4} = 2\varphi R_c^{(2),(4)}, \quad (1.6)$$

где a – большая полуось эллипса.

Значение параметра φ в (1.3)–(1.6) мы выбирали из соображений максимальной близости формы петли на рисунке 1.2 к эллипсу по критерию наименьших квадратов. Выражения (1.3)–(1.6) получены из условий сохранения неизменной длины петли волокна

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 2\pi R_c$$

(R_c – радиус исходной круговой петли) при вариациях a и сочленения радиальных участков петли без изломов.

Пренебрегая взаимной трансформацией мод в местах сочленения указанных радиальных участков, используя соотношения ортогональности мод и предполагая, что моды оболочки волокна эффективно фильтруются поглощающим полимерным покрытием, для мощности излучения на выходе волокна можем записать:

$$P = \sum_{\nu} P_{\nu},$$

где

$$P_{\nu} = \pi n_a \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} |C_{\nu}|^2 \exp\left(-m \sum_{i=1}^4 \gamma_{\nu}^{(i)} L_i\right) \int_0^{\infty} u_{\nu}^2 r dr,$$

P_{ν} – мощность ν -ой моды на выходе волокна, n_a – показатель преломления воздуха, ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, m – число петель волокна в чувствительном элементе датчика, $\gamma_{\nu}^{(i)}$ – коэффициент затухания

вида (1.2), отнесенный к i -му радиальному участку петли.

2 Результаты расчетов

Рисунки 2.1–2.4 иллюстрируют применение описанной модели к расчету пропускания чувствительного элемента датчика. Указанный элемент представляет собой кварцевое многомодовое волокно в полимерной оболочке. Радиус и показатель преломления сердцевинки равны $r_0 = 25$ мкм и $n_{co} = 1,472$, показатель преломления кварцевой оболочки $n_{cl} = 1,4584$. В качестве источника света использован He-Ne лазер ($\lambda_0 = 0,6328$ мкм).

В результате численного решения дисперсионного уравнения (1.1) мы нашли, что описанное волокно направляет 16 собственных мод. Значения их постоянных распространения представлены на рисунке 2.1.

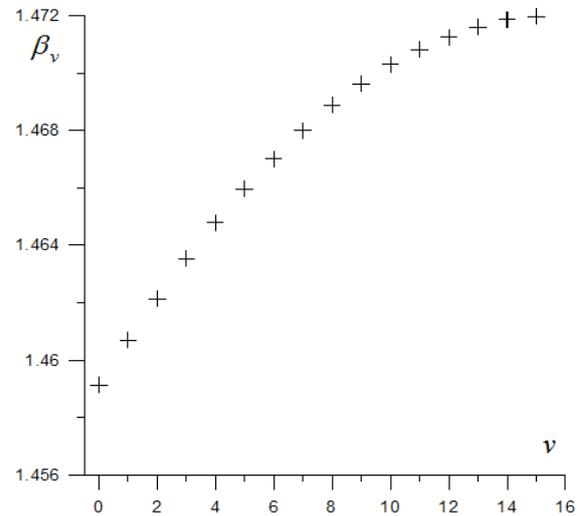


Рисунок 2.1 – Постоянные распространения мод волокна

Рисунок 2.2 иллюстрирует зависимость затухания нескольких мод низшего порядка от радиуса изгиба круговой петли волокна R_c при $m = 1$. Из рисунка 2.2 видно, что основная часть мощности излучения передается основной модой (кривая 0).

На рисунке 2.3 сопоставлены теоретическая и экспериментальная зависимости нормированной мощности излучения P/P_0 на выходе одной круговой петли волокна от радиуса петли R_c (под P_0 понимается максимальное значение мощности на выходе волокна).

В соответствии с рисунком 2.3, при $R_c < 4$ мм происходит резкое снижение пропускания волокна, называемое в литературе изгибной отсечкой (bend loss edge [11]). В целом принятая модель достаточно хорошо описывает эксперимент. Некоторое расхождение теоретической и экспериментальной зависимостей на рисунке 2.3 можно

объяснить неполной фильтрацией оболочечных мод экспериментального волокна, возбуждаемых при его изгибе, полимерным покрытием.

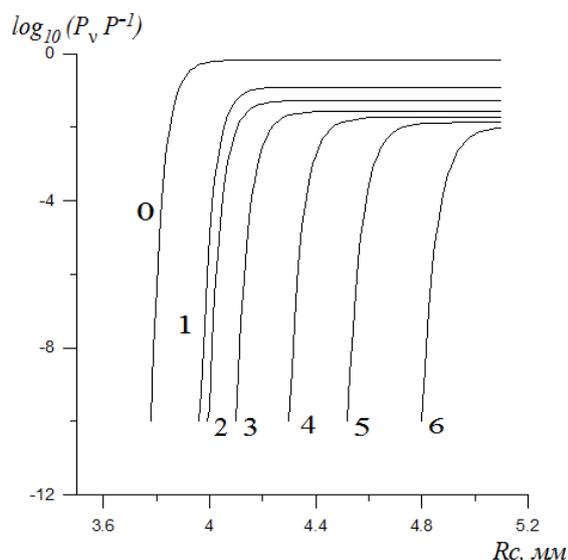


Рисунок 2.2 – Зависимость относительной мощности семи мод низшего порядка на выходе волокна от радиуса изгиба R_c круговой петли волокна. Номера кривых совпадают с номерами мод

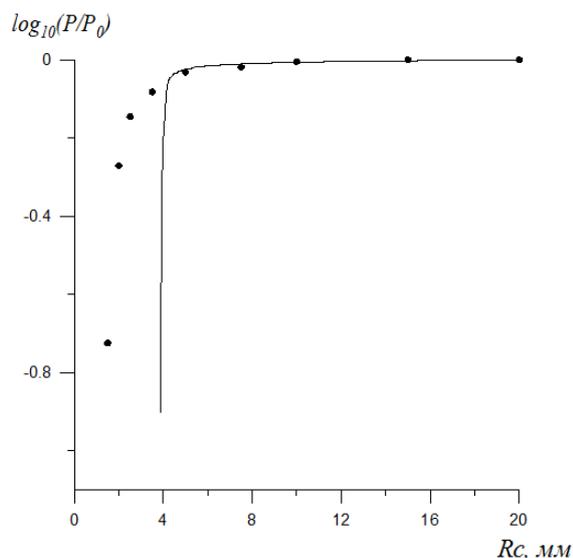


Рисунок 2.3 – Теоретическая (сплошная кривая) и экспериментальная (дискретные точки) зависимости пропускания волокна от радиуса его изгиба

На рисунке 2.4 сопоставлены расчетная и экспериментальная зависимости пропускания чувствительного элемента датчика в виде 10 деформируемых витков от большой полуоси эллипса a (рисунок 1.2).

Видимое из рисунка 2.4 расхождение теории и эксперимента можно связать как с указанной выше причиной, так и с возникновением спиральности в реальной системе витков жгута в

датчике, которая в рассмотренной модели не учитывалась.

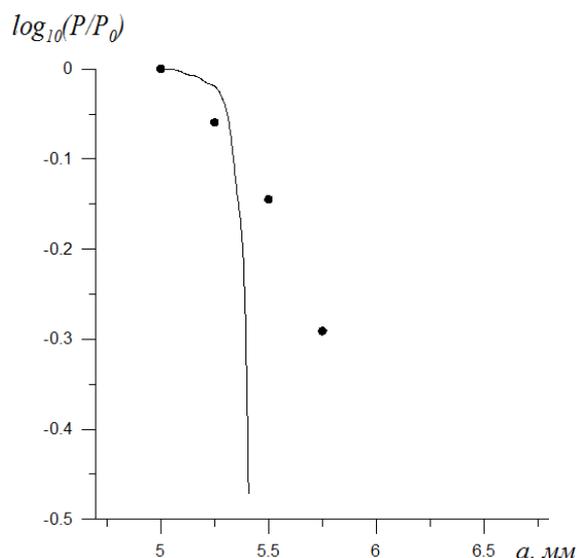


Рисунок 2.4 – Теоретическая (сплошная кривая) и экспериментальная (дискретные точки) зависимости пропускания чувствительного элемента датчика от большой полуоси a эллипса, аппроксимирующего деформируемые петли волокна

Заключение

Представленное сопоставление теории и эксперимента позволяет сделать вывод, что рассмотренная теоретическая модель в целом эффективна для оценки потерь излучения в изгибном волоконно-оптическом датчике давления. В частности, она позволяет корректно оценить параметры эллиптической петли чувствительного элемента датчика, при которых происходит изгибная отсечка пропускания устройства. В соответствии с теоретическим расчетом, рассматриваемый датчик может обладать более высокой чувствительностью пропускания к деформации эллиптической петли жгута волокон по сравнению с чувствительностью, полученной в работе экспериментально. Из представленного выше обсуждения следует, что чувствительность устройства может быть повышена за счет более эффективной фильтрации оболочечных мод волокон полимерной оболочкой и за счет дальнейшей оптимизации механической части чувствительного элемента датчика с целью устранения спиральности в системе витков жгута волокон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shizhuo, Yin. Fiber Optic Sensors / Yin Shizhuo, Paul B. Ruffin, T.S.Yu. Francis. – Boca Raton, London, New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
2. Волоконно-оптические датчики / Т. Око-си [и др.] ; под ред. Т. Окоси: пер. с япон. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1991 – 256 с.

3. *Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников* / под ред. Э. Удда; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
4. *Бусурин, В.И.* Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
5. *Donlagic, D.* Fiber-optic microbend sensor structure / D. Donlagic, M. Zavrsnik // *Opt. Lett.* – 1997. – Vol. 22. – № 11. – P. 837–839.
6. *Tunable fiber grating fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure* / J.H. Lim [et al.] // *Opt. Lett.* – 2004. – Vol. 29. – № 4. – P. 331–333.
7. *Ivanov O.V.* Wavelength shift and split of cladding mode resonances in microbend long-period fiber gratings under torsion / O.V. Ivanov // *Opt. Commun.* – 2004. – Vol. 232. – № 1–6. – P. 159–166.
8. *Борисов, В.И.* Многоканальный микроизгибный волоконно-оптический датчик механического усилия / В.И. Борисов, И.В. Шилова // *Вестник Могилевского государственного технического университета.* – 2004. – № 1. – С. 19–21.
9. *Борисов, В.И.* Многоканальный микроизгибный волоконно-оптический датчик температуры / В.И. Борисов, И.В. Шилова // *Вестник Могилевского государственного технического университета.* – 2004. – № 2. – С. 21–24.
10. *Снайдер, А.* Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Дж. Лав. – М.: Радио и связь, 1987.
11. *Nielsen, M.D.* Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers / M.D. Nielsen, N.A. Mortensen, M. Albertsen // *Optics Express.* – 2004. – № 7. – P. 1775–1779.

Поступила в редакцию 26.12.12.