

## Программное средство для моделирования влияния деформации на параметры оптического волокна

*Е.В. Резак, Ю.В. Карась*

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск*

**Аннотация:** В статье представлена разработка программного средства для моделирования влияния физических процессов, происходящих в одномодовом оптическом волокне в результате воздействия на него деформации изгиба. Приведены классическая и уточненная модели деформации. Указана специфика реализуемой программы, полученные в ходе вычислительного эксперимента.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, оптическое волокно, деформация изгиба, моделирование поведения деформированного волокна, вычислительный эксперимент, программное средство.

### Введение

В связи с глобальным характером информатизации, возрастающей роли цифровизации и внедрением автоматизации в различные сферы человеческой жизни к скорости и объёму передаваемой информации предъявляются все более и более серьезные требования. При этом увеличение скорости и способов доступа к получению информации зависит не только от разработки новых, но и модернизации действующих телекоммуникационных линий связи, что связано со значительными денежными средствами и временными затратами при полной физической замене подобных линий [1-3].

К высокоскоростным линиям передачи информации относятся волоконно-оптические линии связи [2, 3], где наибольшую скорость передачи обеспечивают одномодовые оптические волокна (далее ОВ) [3]. Однако резкое увеличение скорости передачи информации, даже в подобных сетях, невозможно. При этом, для дальнейшего увеличения скорости передачи информации, необходимо учитывать, во-первых, внешние факторы влияния среды [2], в которую помещается волокно в процессе эксплуатации. К ним можно отнести: механические вибрации, температуру [2, 3], давление и влажность окружающей среды, различного вида деформацию,

---

электромагнитное поле [2]. Во-вторых, необходимо учитывать физические свойства самого одномодового оптического волокна [4].

В силу специфичности отрасли связи: большая протяженность линий; малые поперечные размеры оптических волокон, высокая стоимость материалов и работ по прокладке кабеля, усложняющих процесс исследования в реальных условиях, необходимо проводить предварительное моделирование для изучения влияния различных факторов на потери сигнала в волокне. В идеале моделирование физических процессов есть построение и исследование математической(их) модели(ей), изучение которых осуществляется посредством специализированных программ или пакетов для математического моделирования. Однако, в свете текущих событий, очень остро стоит вопрос импортозамещения различных специализированных программных продуктов, в частности приложений для моделирования различных физических процессов. В статье будет рассмотрена разработка программного средства, позволяющая осуществлять моделирование физических процессов в оптическом волокне, в частности, при деформации изгиба.

### **Модель деформации изгиба одномодового оптического волокна**

Оптическое волокно, являясь диэлектрической направляющей средой, в обобщенном виде представляет собой тонкую нить (длинный, тонкий, прозрачный, однородный, сплошной цилиндр) из стекла или пластика (прозрачных материалов), применяемого для распространения электромагнитных волн оптического и инфракрасного диапазонов внутри себя посредством полного внутреннего отражения. Конструктивно оптическое волокно состоит из сердцевины и оптической оболочки, изготовленных из специальных материалов для возможности распространения оптического излучения по волокну. Показатель преломления сердцевины волокна варьируется в пределах от 1.4 до 1.5, при

---

этом показатель преломления оптической оболочки немного меньше (в пределах 5%), что обеспечивает полное внутреннее отражение света от границ раздела сердцевина-оболочка [5].

В результате внешних воздействий, на ОВ начинают действовать силы, приводящие к его деформации. При этом с волокном происходят различные изменения, такие как удлинение и/или укорочение по различным направлениям [6].

Рассмотрим деформацию изгиба одномодового оптического волокна (далее ООВ). Модель изгиба волокна представлена на рис. 1. На модели показаны: диаметр оболочки оптического волокна  $2b$ , радиус изгиба волокна  $R$ , угол изгиба волокна  $\varphi$ .

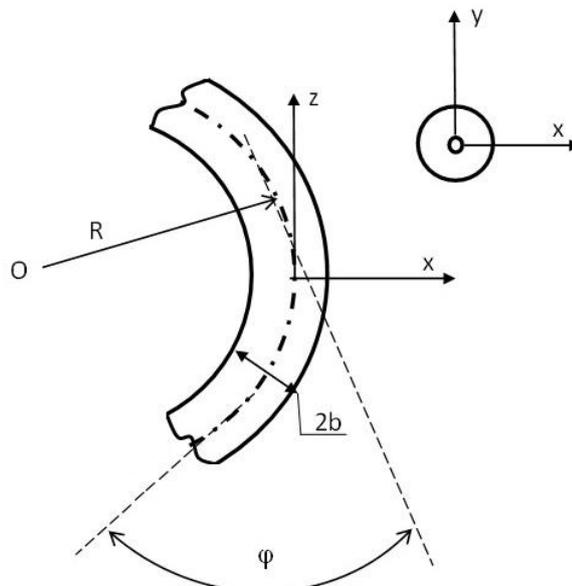


Рис. 1 – Модель деформации изгиба оптического волокна

Оси координат на рисунке расположены таким образом, чтобы поперечное сечение волокна было расположено на осях  $X$  и  $Y$ , а ось  $Z$  направлена вдоль всей длины ООВ.

Для оптимизации модели оптическое волокно разместим таким образом, чтобы деформации удлинения и укорочения происходили вдоль одной оси  $X$ , таким образом, составляющая механического напряжения вдоль

оси  $Y$  будет отсутствовать, волокно не будет менять свои параметры за счет компенсации по оси  $X$ .

Согласно [2, 7], составляющие механического напряжения в изогнутом волокне выражаются (1).

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{2R^2}(x^2 - b^2), \\ \sigma_y = 0, \\ \sigma_z = \frac{E}{R}x, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $x$  – координата относительно центральной оси волокна.

Абсолютная величина отношения относительной поперечной деформации  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  к относительной продольной  $\varepsilon_z$  называется коэффициентом поперечной деформации или коэффициентом Пуассона  $\mu$ , с учетом этого составляющие относительных деформаций имеют вид (2).

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]. \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя значения составляющих механического напряжения (1) в относительные деформации (2) получим составляющие относительных деформаций для изогнутого ООВ (3).

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) - \frac{\mu}{R}x \\ \varepsilon_y = -\mu \left[ \frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) + \frac{1}{R}x \right], \\ \varepsilon_z = \frac{1}{R}x - \frac{1}{2} \frac{\mu}{R^2}(x^2 - b^2) \end{cases} \quad (3)$$

Отметим, что в системе (3) учтены все составляющие относительных деформаций и эффекта фотоупругости в направлениях координатных

осей [8], в отличие от классической теории, в которой не рассматриваются значения  $|x| \ll b$ .

Однако некоторые авторы [2, 7] утверждают, так как  $|x| \ll b$ , то значениями  $x^2$  можно пренебречь, таким образом, формулы (3) принимают вид (4):

$$\begin{cases} \varepsilon_x = -\frac{1}{2R^2}b^2 - \frac{\mu}{R}x, \\ \varepsilon_y = \mu\left(\frac{b^2}{2R^2} - \frac{x}{R}\right), \\ \varepsilon_z = \frac{1}{R}x + \frac{1}{2}\frac{\mu}{R^2}b^2. \end{cases} \quad (4)$$

Отсутствие квадратичных составляющих приводит к потере полной картины, происходящей в оптическом волокне под воздействием деформации изгиба.

Рассмотрим изменение показателя преломления, вносимое различными составляющими относительных деформаций (3) и эффектом фотоупругости в направлениях координатных осей  $\delta n_x$ ,  $\delta n_y$  и  $\delta n_z$  с использованием коэффициентов Погкельса  $p_{ij}$ .

$$\begin{cases} \delta n_x = -\frac{n^3}{2}(p_{11}\varepsilon_x + p_{12}\varepsilon_y + p_{12}\varepsilon_z) \\ \delta n_y = -\frac{n^3}{2}(p_{12}\varepsilon_x + p_{11}\varepsilon_y + p_{12}\varepsilon_z) \\ \delta n_z = -\frac{n^3}{2}(p_{12}\varepsilon_x + p_{12}\varepsilon_y + p_{11}\varepsilon_z) \end{cases} \quad (5)$$

Тогда составляющие показателей преломления в направлении координатных осей примут вид (6), (7), (8):

$$n_x = n + \frac{n^3}{2} \left[ \frac{\mu}{R^2} \left( p_{12} - \frac{p_{11}}{2\mu} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} \left( p_{11} + p_{12} - \frac{p_{12}}{\mu} \right) x + \frac{\mu}{R^2} \left( \frac{p_{11}}{2\mu} - p_{12} \right) b^2 \right], \quad (6)$$

$$n_y = n + \frac{n^3}{4} \left[ \frac{\mu}{R^2} \left( p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} \left( 2p_{11} + 2p_{12} - \frac{2p_{12}}{\mu} \right) x + \frac{\mu}{R^2} \left( \frac{p_{12}}{\mu} - p_{12} - p_{11} \right) b^2 \right], \quad (7)$$

$$n_z = n + \frac{n^3}{4} \left[ \frac{\mu}{R^2} \left( p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} \left( 4p_{12} - \frac{2p_{11}}{\mu} \right) x + \frac{\mu}{R^2} \left( \frac{p_{12}}{\mu} - p_{12} - p_{11} \right) b^2 \right]. \quad (8)$$

### Исходные данные

Разработанное, на основе предложенных выше математических моделей, программное средство, реализует моделирование влияние деформации изгиба в оптическом волокне на показатель преломления сердечник-оболочка по классической и уточнённой моделям.

К исходным данным относятся: показатель преломления сердечника; диаметр волокна; радиус искривления оптического волокна; шаг вычисления; начальная и конечная координаты относительно центральной оси оптоволокна.

В качестве выходных данных приложение предоставляет таблицу расчетных значений показателей преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника и в переходе сердечник-оболочка, график изменения показателей преломления изогнутого волокна внутри сердечника в переходе сердечник-оболочка в направлении координатных осей.

Разработка программы происходила с применением языка программирования C# [9], для создания графического интерфейса использовался фреймворк WPF [10]. Применение декларативного языка разметки позволило упростить создание пользовательского интерфейса для приложения .NET, а язык XAML напрямую представил создание экземпляров объектов в конкретном наборе резервных типов, определённых в сборках.

Для создания графиков и реализации возможности сохранения результатов моделирования в разных форматах использовались различные библиотеки.

### Интерфейс программного средства

Верхнее меню приложения состоит из трех основных разделов: «Сохранить», «Модель», «Справка». Раздел «Сохранить» подразделяется на «Сохранить график» и «Сохранить таблицу». Раздел «Модель» позволяет выбрать классическую или уточнённую модель. Раздел «Справка» даёт возможность увидеть справку (раздел «Просмотр справки») и узнать информацию о программе (раздел «О программе OVMModel»).

Для ввода физических характеристик созданы поля ввода начальных значений с поясняющими надписями (см. рис. 2).

Введите показатель преломления сердечника:

Введите диаметр волокна:

Введите радиус оптического волокна:

Введите шаг вычислений:

Введите пределы координаты x:

Рис. 2. – Поля ввода исходных данных

Вывод полученных результатов моделирования осуществляется в виде таблиц. Для их создания использовались элементы DataGrid, для них были определены права доступа, которыми будет обладать пользователь программного средства. Пример заполненной таблицы представлен на рис. 3.

Для создания графической интерпретации полученных расчетных данных использовалась библиотека OxyPlot. На рис. 4 приведен пример результатов моделирования в виде графиков.

В результате исследования математической модели деформированного ОВ были найдены такие состояния, в которых волокно переходило из двухосного состояния «кристалла» в одноосное (см. рис. 4). Для подобных состояний реализована дополнительная таблица вывода точек перехода.

---

x	$n_x$	$n_y$	$n_z$
-0.004	1.474484408	1.474619957	1.47406475
-0.0036	1.474418503	1.474554051	1.474054365
-0.0032	1.474352597	1.474488146	1.47404398
-0.0028	1.474286692	1.47442224	1.474033595
-0.0024	1.474220786	1.474356335	1.474023211
-0.002	1.474154881	1.474290429	1.474012826
-0.0016	1.474088975	1.474224524	1.474002441
-0.0012	1.47402307	1.474158618	1.473992056
-0.0008	1.473957164	1.474092713	1.473981672
-0.0004	1.473891259	1.474026807	1.473971287
0	1.473825353	1.473960902	1.473960902
0.0004	1.473759448	1.473894997	1.473950517
0.0008	1.473693543	1.473829091	1.473940132
0.0012	1.473627637	1.473763186	1.473929748
0.0016	1.473561732	1.47369728	1.473919363
0.002	1.473495826	1.473631375	1.473908978
0.0024	1.473429921	1.473565469	1.473898593
0.0028	1.473364015	1.473499564	1.473888209
0.0032	1.47329811	1.473433658	1.473877824
0.0036	1.473232204	1.473367753	1.473867439
0.004	1.473166299	1.473301847	1.473857054

Рис. 3 – Таблица результатов расчета значений показателей преломления вдоль координатных осей

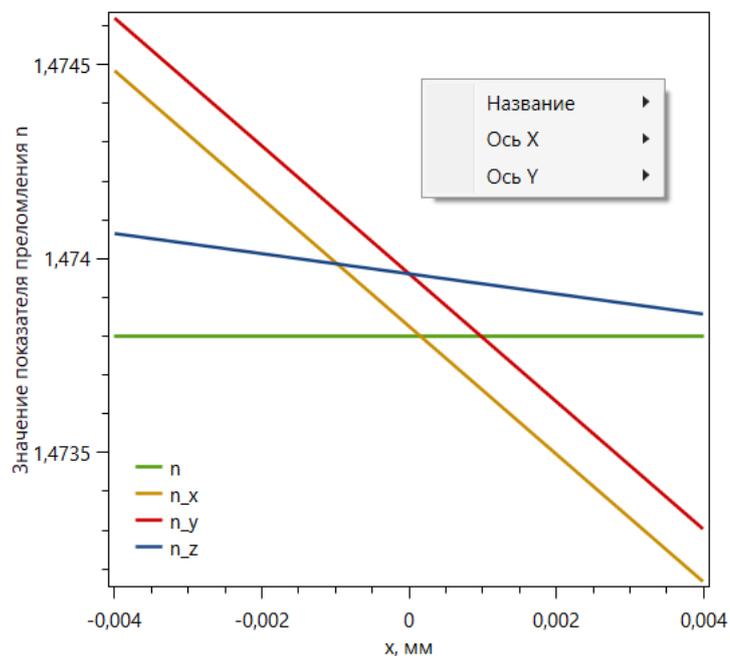


Рис. 4. – Пример графика

Для упрощения работы пользователя с приложением созданы окна, предупреждающие о различных ошибках

## Расчёт точек пересечения

По своей сути точки перехода изогнутого оптоволокна из двухосного состояния «кристалла» в одноосное – это точки пересечения показателей преломления по трём координатам. Поэтому для нахождения таких точек происходит сравнение значения показателей преломления на каждом шаге. Однако может произойти такой случай, когда точки будут пересекаться между шагами (см. рис. 5), т. е. между точками  $x+i*h$  и  $x+(i+1)*h$ , тогда данная точка не будет учтена.

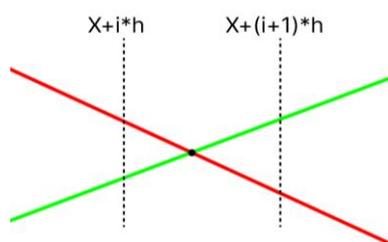


Рис. 5 – Точка пересечения функций между шагами

Поэтому, для нахождения всех точек пересечения, также находятся точки пересечения векторов, которыми являются отрезки графиков. Для этого использовался метод структуры Dot, при этом, если точка не существует, то значения  $x$  и  $y$  будут равны -1.

## Заключение

В ходе проделанной работы было реализовано программное средство, позволяющее осуществлять: ввод исходных данных; выбор модели вычислительного эксперимента; оно предоставляет возможность представления расчетных данных в табличном и графическом виде; позволяет выводить значения точек пересечения графиков в табличной форме; а также предоставляет пользователю возможность получить координаты отдельно взятой точки на графике в специальном окне.

## Благодарность за финансовую поддержку работы

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, дополнительное соглашение № 075-02-2023-932 от 16 февраля 2023 г.*

## Литература

1. Осипов В. А., Соловьев Г. Е., Гороховский Е. В., Капкаев А. А. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1539](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1539)
2. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. М.: Лань. 2023. 268 с.
3. Коршунов В. Н. Увеличение скорости передачи информации по оптическим кабелям // Кабели и провода, 2017, № 1(362). С. 16-19.
4. Никифоров Н. Д., Векшин М. М. Расчет эффективности ввода оптического излучения DFB- и VCSEL- лазеров в стеклянный интегрально-оптический волновод // Инженерный вестник Дона, 2018, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5053](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5053)
5. Резак Е. В. Потери в оптическом волокне при изгибе // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия, 2009, № 4. С. 119-122.
6. Резак Е. В. Моделирование влияния деформации изгиба в одномодовом оптическом волокне на показатель преломления сердечник - оболочка // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление, 2023, № 2. С. 44-50.
7. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики / Л., 1990. 256 с.
8. Резак Е. В., Панкратьева С. Г. Модель поведения деформированного оптического волокна // Перспективы науки, 2023, № 7(166). С. 81-84.



9. Griffiths I. Programming C# 8.0: Build Cloud, Web, and Desktop Applications 1st Edition. Sebastopol, O'Reilly Media; 1st edition. 2021. 797 p.

10. Price M. J. Apps and Services with .NET 8: Build practical projects with Blazor, .NET MAUI, gRPC, GraphQL, and other enterprise technologies 2nd ed. Edition. Sebastopol, O'Reilly Media; 1st edition. 2023. 798 p.

### References

1. Osipov V. A., Solov'ev G. E., Gorohovskij E. V., Kapkaev A. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1539](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1539).

2. Skljarov O. K. Volokonno-opticheskie seti i sistemy svjazi [Fiber Optic Networks and Communication Systems]. M.: Lan. 2023. 268 p.

3. Korshunov V. N. Kabeli i provoda, 2017, № 1(362). Pp. 16-19.

4. Nikiforov N. D., Vekshin M. M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5053](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5053)

5. Rezak E.V. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Fizika i himija, 2009, № 4. Pp. 119-122.

6. Rezak E.V. Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Serija: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie, 2023, № 2. Pp. 44-50.

7. Okosi T., Okamoto K., Ocu M., Nisihara H., Kjuma K., Hatatje K. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber Optic Sensors]. L., 1990. 256 p.

8. Rezak E.V., Pankrateva S. G. Perspektivy nauki, 2023, № 7(166). Pp. 81-84.

9. Griffiths I. Programming C# 8.0: Build Cloud, Web, and Desktop Applications 1st Edition. Sebastopol, O'Reilly Media; 1st edition. 2021. 797 p.



10. Price M. J. Apps and Services with .NET 8: Build practical projects with Blazor, .NET MAUI, gRPC, GraphQL, and other enterprise technologies 2nd ed. Edition. Sebastopol, O'Reilly Media; 1st edition. 2023. 798 p.

**Дата поступления: 29.12.2023**

**Дата публикации: 3.02.2024**