

Разработка оптоволоконного датчика электрических параметров на основе решеток Брегга и программного комплекса для автоматического моделирования его параметров

Г.И. Леонович^а, В.Н. Захаров^а, А.И. Горшков^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

В настоящее время к одним из наиболее эффективных преобразователей, отвечающих высоким требованиям по метрологическим и эксплуатационным показателям, относятся волоконно-оптические. В статье отражено современное состояние измерительных волоконно-оптических датчиков, рассмотрены основные типы и методы измерения. Предложена новая модель волоконно-оптического датчика на основе решеток Брегга для измерения электрических параметров. Для предложенной модели написана программа для расчета параметров датчика, приведена действующая модель на испытательном стенде. Получены результаты работы и их оценка.

Ключевые слова: решетки Брегга; оптоволоконный датчик; мультисенсорные сети; постоянный ток; переменный ток; электростатическое поле; магнитное поле

1. Введение

В настоящее время к одним из наиболее эффективных преобразователей, отвечающих высоким требованиям по метрологическим и эксплуатационным показателям, относятся волоконно-оптические, оптомеханические и оптоэлектронные преобразователи физических величин с передачей информации от сенсора к контроллеру по волоконно-оптическим линиям связи (с встроенными волоконно-оптическими линиями связи – ВОЛС).

До недавнего времени основным типом датчиков для измерения механической деформации и температуры были тензодатчики, пьезодатчики, терморезисторы и др. Однако благодаря интенсивному развитию волоконной оптики были разработаны и получают всё большее распространение волоконно-оптические датчики, обладающие рядом преимуществ по сравнению с тензодатчиками: более высокой чувствительностью, помехозащищенностью и устойчивостью к воздействиям агрессивных сред, а также меньшей стоимостью.

Среди волоконно-оптических датчиков перспективными являются квазираспределённые волоконно-оптические датчики на основе брэгговских решёток (далее – брэгговские датчики), позволяющие контролировать состояние объекта во многих точках одновременно благодаря возможности спектрального и временного мультиплексирования.

2. Разработка математической модели

Брэгговские решетки связывают основную моду волоконного световода, распространяющуюся в прямом направлении по волоконному световоду, с основной модой, распространяющейся в противоположном направлении, на резонансной длине волны λ_{Br} , определяющейся соотношением [2]:

$$\lambda_{Br} = 2n_{eff}\Lambda$$

где $n_{эфф}$ – эффективный ПП сердцевины волокна основной моды

Λ – период брэгговской решетки.

Спектральные свойства являются наиболее важной характеристикой волоконных брэгговских решеток. Основными из них являются спектральное положение резонанса, его ширина и коэффициент отражения в максимуме. Расчет спектральных характеристик брэгговских решеток обычно выполняют с применением теории связанных мод. Выразим с помощью теории связанных мод функцию коэффициента отражения брэгговской решетки от длины волны [3]:

$$r = \frac{sh^2(\gamma_B L)}{ch^2(\gamma_B L) - \frac{\sigma^2}{\kappa^2}}$$

где $\gamma_B \equiv \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$, Спектральная отстройка от строгого резонанса σ определяется разностью постоянных распространения основной моды $\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$:

$$\sigma(z) = \beta(z) - \beta_{Br}(z) = \frac{2\pi n_{eff}(z)}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda(z)}$$

где локальный эффективный показатель преломления $n_{eff}(z) = n_{eff} + \eta \cdot \Delta n_{avr}(z)$

Коэффициент связи решетки $\kappa(z)$ на длине волны λ пропорционален амплитуде модуляции наведенного показателя преломления $\Delta n_{mod}(z)$:

$$\kappa(z) = \frac{\pi \eta \Delta n_{mod}(z)}{\lambda}$$

η – доля мощности основной моды, которая распространяется в сердцевине световода.

Спектральная ширина резонанса на полувывсоте брэгговских решеток может быть выражена следующим приближенным соотношением [3]:

$$\Delta\lambda_{0,5} = 2\lambda\alpha \sqrt{\left(\frac{\eta\Delta n}{2n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2}$$

где α – параметр порядка единицы для глубоких решеток (с коэффициентом отражения $r \sim 1$) и порядка 0,5 для решеток небольшой глубины.

Для решетки с периодом модуляции $\Lambda = 67,06 \mu\text{м}$ и с девиацией показателя преломления $\Delta n = 10^{-4}$ спектр отражения светового сигнала будет выглядеть как показано на рис. 1:

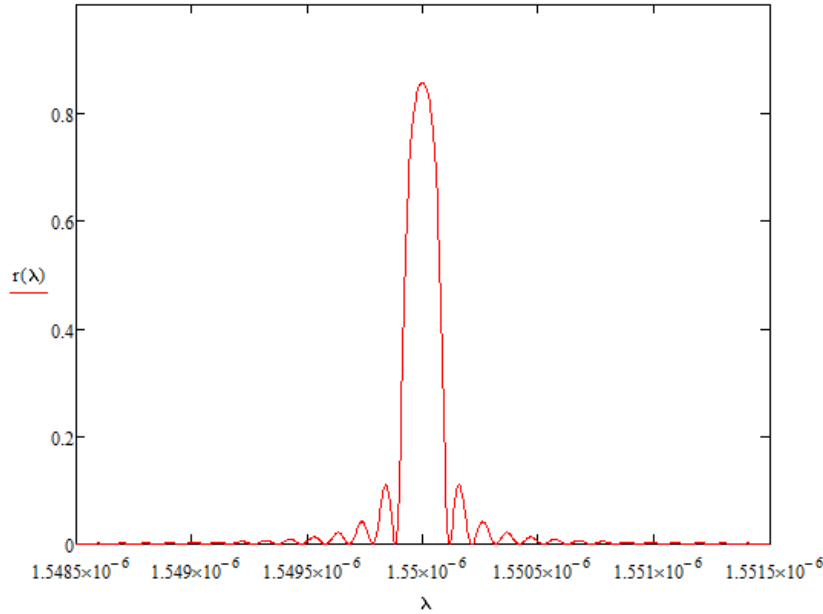


Рис.1. Спектр отраженного сигнала.

Центральная длина волны оптического излучения, отражённого брэгговской решёткой, зависит от эффективного показателя преломления и от периода решётки. Изменение центральной длины волны с учётом влияния температуры и механических напряжений определяется следующим образом [4]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right),$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления, Λ – период решетки.

Первое слагаемое в этом уравнении даёт значение сдвига длины волны в зависимости от деформации (удлинения), второе – в зависимости от температуры. Зависимость сдвига центральной длины волны отражённого излучения от деформации также может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \delta_z,$$

где p_e – константа деформации оптического волокна, определяемая из следующего выражения:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})),$$

где p_{11} и p_{12} – коэффициенты Показеля в тензоре оптических напряжений, ν – коэффициент Пуассона. Для типового волокна $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ и $n_{eff} = 1,4447$. Исходя из значений чувствительность для длины волны $\lambda_B = 1550 \text{ нм}$ составит $12,36 \text{ нм}/\%$.

При растяжении оптического волокна меняется длина брэгговской решетки, период модуляции показателя преломления, и происходит изменение показателей преломления сердцевинки и оболочки оптического волокна. Выражение для изменения ПП в результате растяжения определяется фотоупругим эффектом так, что

$$\Delta n_\delta = -\frac{1}{2} n_{eff}^3 \cdot p_e \cdot \delta_z,$$

это связано с анизотропией оптического волокна возникающей при растяжении.

Второе слагаемое даёт зависимость сдвига длины волны от температуры. Длина волны излучения, отраженного от брэгговских датчиков, изменяется в зависимости от температуры из-за следующих факторов: теплового расширения оптического волокна (удлиняется период брэгговской решётки), т. е. происходит изменение механической длины решётки, а также изменения показателя преломления волокна в зависимости от температуры (изменение оптической длины решётки). Откуда следует, что зависимость сдвига длины волны от температуры может быть описана следующим выражением [4]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T,$$

где α_Λ – температурный коэффициент линейного расширения ($\alpha_\Lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$ для плавленного кварца), α_n – термооптический коэффициент ($\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6}$ для оптического волокна с легированным германием). Исходя из этих значений чувствительность брэгговской решетки к температуре для длины волны $\lambda_B = 1550$ нм составит $14,1 \frac{\text{пм}}{^\circ\text{C}}$.

Графики зависимости длины волны от деформации и температуры представлены на рисунке 2. График зависимости от деформации представлен сверху, график зависимости от температуры – снизу.

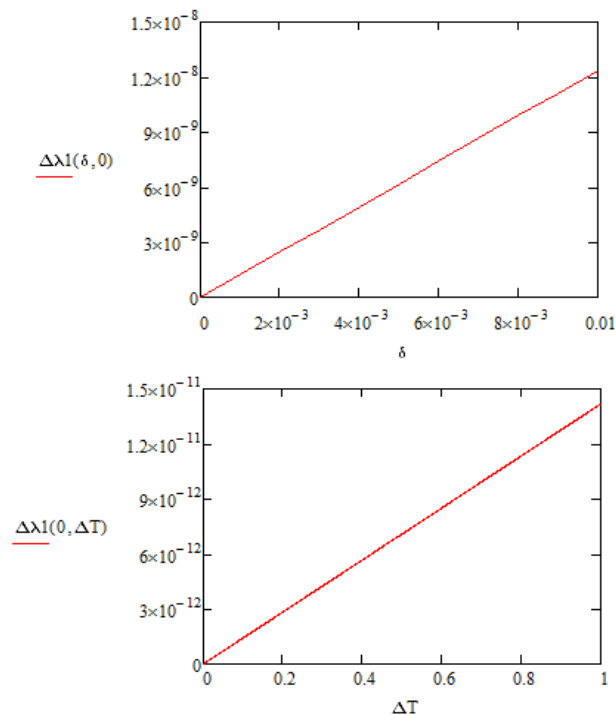


Рис. 2. Графики зависимости от деформации от температуры.

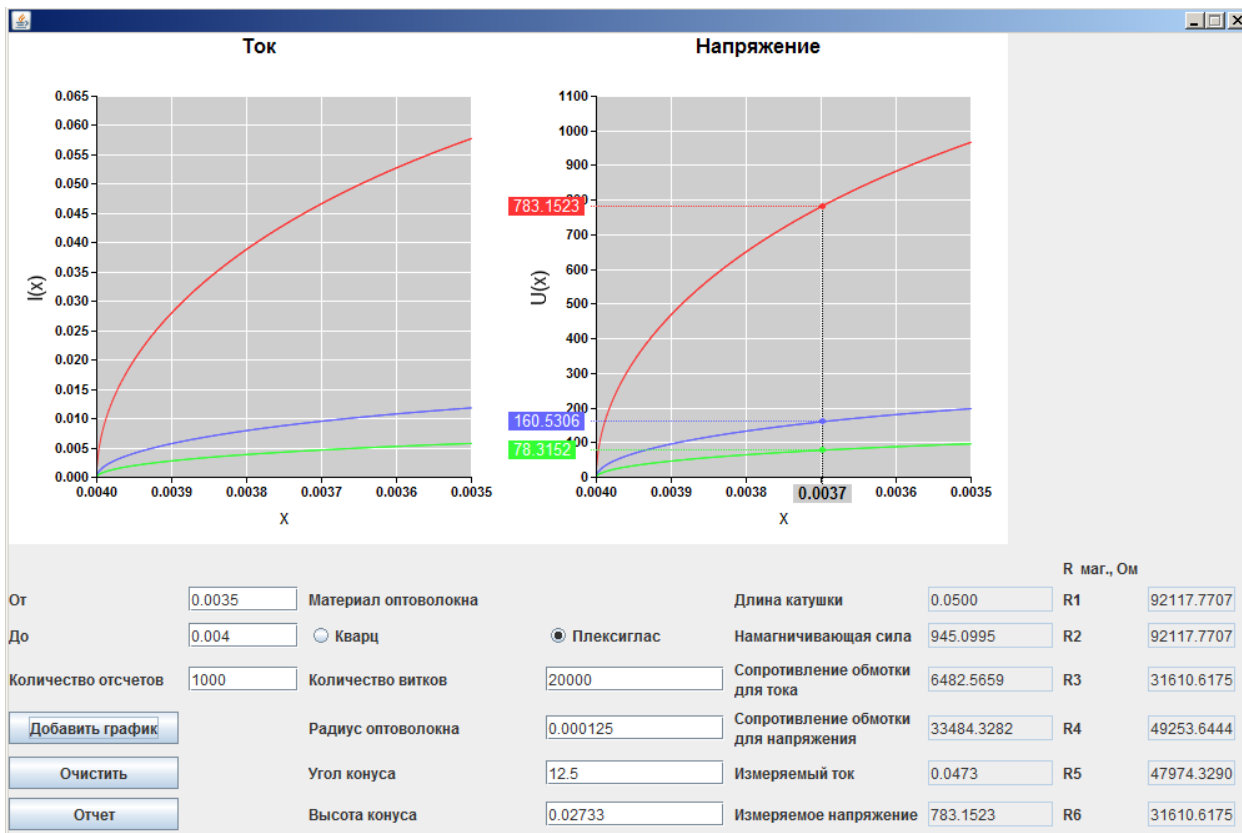


Рис. 3. Интерфейс программы.

3. Программа для моделирования технических параметров

Для моделирования работы данного типа датчиков была разработана автоматизированная система.

Окно реализованной системы приведено на рисунке 3. Пользователю предлагается обширные возможности для редактирования параметров моделирования. После нажатия на кнопку «Добавить график» в оба графика добавляются новые смоделированные данные, отличающиеся от предыдущих цветом. Также у пользователя есть возможность очистки графиков, всех полей и генерации отчета по данным по нажатию кнопки «Отчет».

4. Лабораторные испытания

В ходе работы над волоконно оптическим датчиком электрических параметров была взята предложенная выше математическая модель. Далее на основе данной модели была разработана конструкция датчика для проведения испытаний и выявления эффективности его работы. На рисунке 4 приведена принципиальная схема устройства датчика.

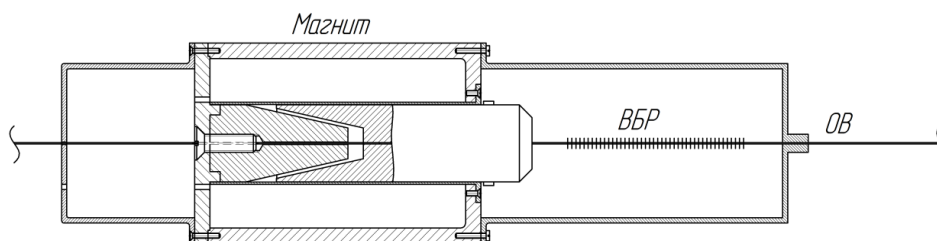


Рис. 4. Схема датчика.

В ходе лабораторных испытаний были проведены эксперименты на стенде, где был смонтирован вышеупомянутый датчик и получены результаты по минимальной чувствительности и зафиксированы критические параметры работы данного датчика (рис 5, 6). Полученные данные после проведения тестирования стенда. Параметры источника питания: 20В; 2.5А. На графике наблюдается скачек изменения длины волны отраженного спектра от внутриволоконной решетки Брегга при подаче питания на катушку – 7: (1524.990 – 1525.048нм).

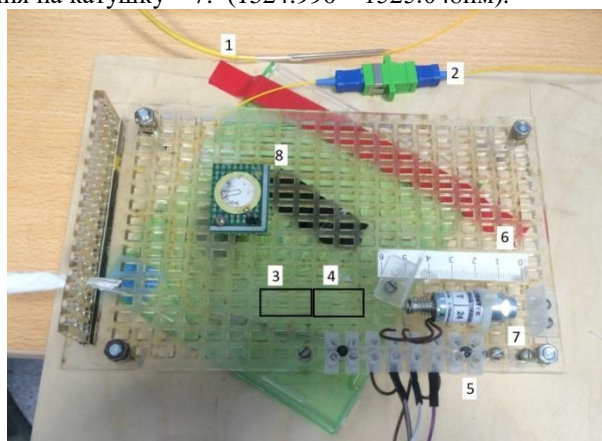


Рис. 5. Фото стенда. (1- оптическое волокно, 2 –разъем, 3,4-решетки Брегга, 5-электрические разъемы, 6-линейка, 7-катушка, 8-пьезо элемент (не используется)).

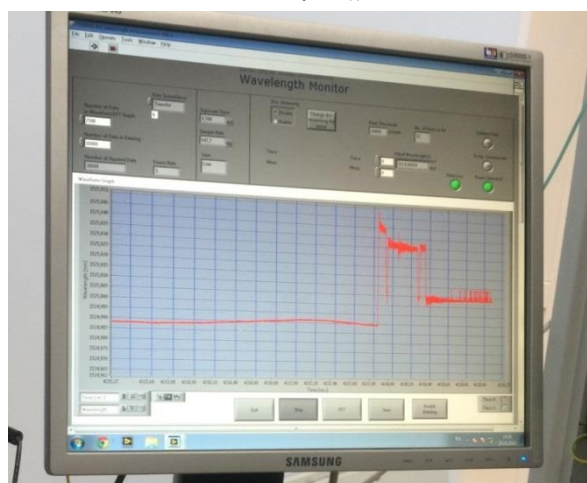


Рис. 6. Фото программы интеррогатора.

5. Заключение

При анализе аналогов волоконно-оптических датчиков тока выявлены такие недостатки, как: чувствительность к электромагнитным полям, амплитудное разделение каналов, чувствительность к акустическим воздействиям, низкое соотношение сигнал/шум. Предлагаемое устройство в качестве прототипа, которое содержит волокно с нанесенной брэгговской решеткой в качестве чувствительного элемента, электромагнит для преобразования электрической энергии в механическую, оптоволоконно в качестве канала передачи сигнала и спектроанализатор с цифровым выходом для подключения к компьютеру. Заявленное устройство свободно от недостатков, приведенных выше. Проведенные испытания показали, что разрешающая способность и чувствительность имеют довольно высокие значения и позволяют применить данный тип датчиков в широком диапазоне значений измеряемых параметров.

Литература

- [1] Васильев, С.А. Волоконные решетки показателя преломления и их применение / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. –2005. –т. 35, № 12. –С. 1085-1103.
- [2] Othonos, A. Fiber Bragg gratings / A. Othonos // Review of scientific instruments. –1997. –vol. 68(12). –pp. 4309-4341.
- [3] Медведков, О.И. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств / О.И. Медведков, И.Г. Королев, С.А. Васильев – Москва: Научный центр волоконной оптики при институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2004. – 46 с. – (Препринт / Научный центр волоконной оптики при институте общей физики им. А.М. Прохорова ; № 6)
- [4] Лазарев, В.А. Быстродействующая система измерения деформации и температуры на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков : автореф. дис. кандидата технических наук / В.А. Лазарев. –Москва, 2013. – 185 с.
- [5] Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. –Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
- [6] Гордон, А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская –Москва: Госэнергоиздат, 1960. –447 с.