

Математическое моделирование волоконно-оптического датчика электрического поля с ВБР на основе электрета

Г.И. Леонович¹, В.Н. Захаров¹, А.Ф. Крутов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

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 рассчитана математическая модель. Получены результаты работы и проведена их оценка.

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 электрического, магнитного и электростатического поля были электрические датчики и их аналоги. Однако благодаря интенсивному развитию волоконной оптики были разработаны и получают всё большее распространение волоконно-оптические датчики, обладающие рядом преимуществ по сравнению с электрическими датчиками: 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. Датчики электрического поля и электрических параметров так же претерпевают изменения и нуждаются в принципиально новых решениях.

2. Принцип работы датчика электрического поля на решетке Брегга с использованием электрета

Для разработки модели датчика электрических параметров была предложена схема работы датчика и ее составные элементы. На рисунке 1 представлена принципиальная схема работа датчика. Схема представляет собой два кольцевых электрода (3) расположенных параллельно

друг другу, на заданном расстоянии. На электроды подано напряжение. Между ними возникают силы сопоставимые с силами, возникающими между обкладками конденсатора. Между электродами помещено волокно с решеткой Брегга (2) и нанесенным покрытием (1), реагирующим на электрические величины. В нашем случае для определения электрического поля мы использовали электрет (1).

Волокно располагается перпендикулярно плоскости электродов. Покрытие в виде электрета наносится по краям решетки и состоит из двух участков, которые находятся между электродами под влиянием электрического поля. Так же данные участки реагируют между собой, отталкиваясь, что дает необходимое усилие на волокне в участке с нанесенной решеткой Брегга для ее предварительно растяжения. Данное решение позволяет повысить эффективность датчика и выйти в зону с максимальной чувствительностью, повысить точность показаний, уменьшить гистерезис при срабатывании.

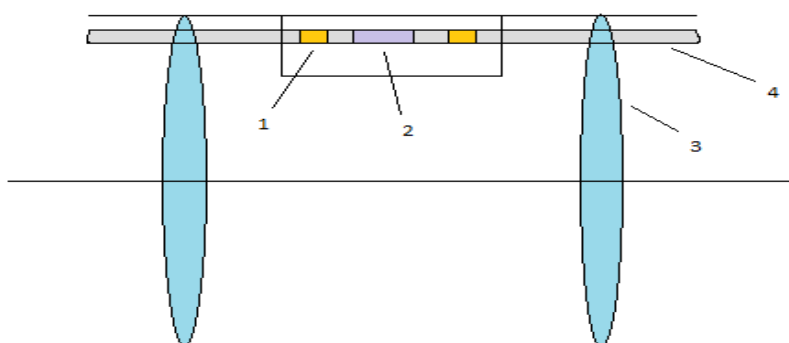


Рисунок 1. Принципиальная схема датчика

3. Расчет потенциальной энергии диполя в поле двух разноименно заряженных колец

Анализ текущего состояния исследований в области создания новых датчиков физико-химических величин показывает, что с точки зрения конструирования датчиков, реагирующих на стационарное магнитное и электростатические поля, перспективными представляются конструкции, в которых создаются сильно неоднородные поля. Конфигурация полей должна быть подобрана таким образом, чтобы потенциальная энергия взаимодействия чувствительного элемента датчика с внешним электрическим или магнитным полем имела пространственно разнесенные ярко выраженные минимумы. Тогда помещенные в окрестности двух таких минимумов чувствительные элементы будут испытывать силы направленные в точки минимумов, что приведет к натяжению оптоволокон.

В качестве примера рассмотрим систему, принципиальная схема которой изображена на рисунке 2. Пусть верхнее кольцо заряжено отрицательно, а нижнее положительно с линейными плотностями зарядов $-\sigma$ и σ , соответственно. Другими словами, на кольца подана некоторая разность потенциалов. Очевидно, что система обладает аксиальной симметрией и все точки, расположенные на любой окружности с центрами на оси z и в плоскостях, перпендикулярных оси z , будут находиться в одинаковых физических условиях. Рассчитаем потенциал электростатического поля данной системы в точке с координатами (ρ, z) . Прямым интегрированием можно показать, что потенциал поля, созданного нижним (положительно заряженным) кольцом равен следующему выражению:

$$\varphi_2(\rho, z) = \frac{4R\sigma}{\sqrt{(\rho+R)^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2}} K(k_2), \quad (1)$$

где $K(x)$ – полный эллиптический интеграл первого рода:

$$K(x) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-x^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (2)$$

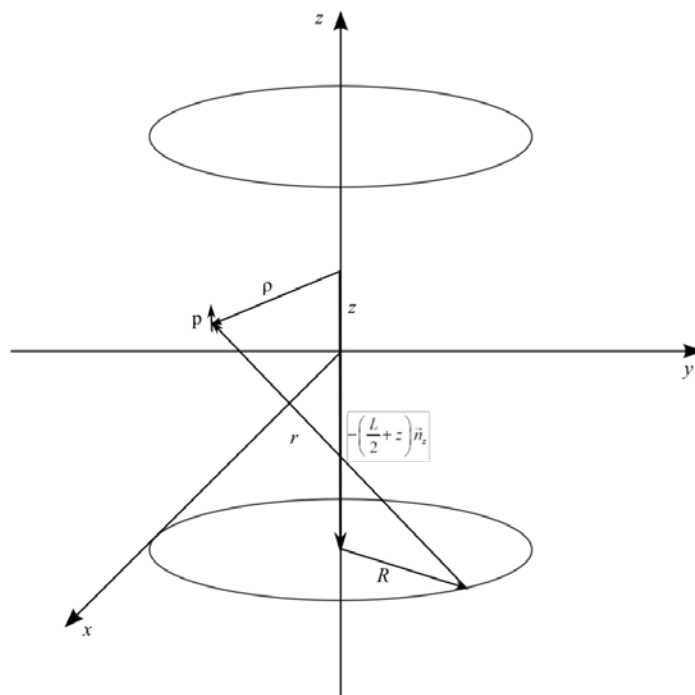


Рисунок 2. Принципиальная схема датчика с сильно неоднородным электростатическим полем.

Два разноименно заряженных кольца радиуса R расположены в плоскостях, перпендикулярных к оси z , расстояние между которыми равно L . Начало координат помещено на середину отрезка, соединяющего центры колец. Чувствительный элемент моделируется точечным электрическим диполем величиной p , который направлен вдоль оси z аргумент функции $K(x)$ в формуле (1) определяется выражением:

$$k_2 = \frac{\sqrt{4\rho R}}{\sqrt{(\rho + R)^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2}}. \tag{3}$$

Аналогично рассчитывается потенциал созданный верхним (отрицательно заряженным) кольцом:

$$\varphi_1(\rho, z) = -\frac{4R\sigma}{\sqrt{(\rho + R)^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2}} K(k_1), \tag{4}$$

где аргумент полного эллиптического интеграла 1-го рода равен следующему выражению:

$$k_1 = \frac{\sqrt{4\rho R}}{\sqrt{(\rho + R)^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2}}. \tag{5}$$

Для расчета потенциала всей системы в данной точке воспользуемся принципом суперпозиции, т.е потенциал поля, созданного двумя кольцами будет равен сумме потенциалов, созданных каждым кольцом:

$$\varphi(\rho, z) = -\frac{4R\sigma}{\sqrt{(\rho + R)^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2}} K(k_1) + \frac{4R\sigma}{\sqrt{(\rho + R)^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2}} K(k_2). \tag{6}$$

Напряженность электростатического поля в рассматриваемой системе будет определяться по стандартной формуле:

$$\vec{E}(\rho, z) = -\text{grad } \varphi(\rho, z) = -\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \vec{n}_\rho - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{n}_z, \tag{7}$$

где \vec{n}_ρ – единичный вектор, перпендикулярный оси z , \vec{n}_z – единичный вектор, направленный вдоль оси z . При вычислении градиента в цилиндрической системе координат учтено, что поле обладает аксиальной симметрией, т.е. не зависит от полярного угла.

Поместим, в рассматриваемую точку точечный электрический диполь p . Потенциальная энергия взаимодействия диполя с электрическим полем колец вычисляется по стандартной формуле, как скалярное произведение вектора дипольного момента и вектора напряженности электростатического поля:

$$U(\rho, z) = -(\vec{p}, \vec{E}). \tag{8}$$

Будем считать, что дипольный момент направлен вдоль оси z :

$$\vec{p} = p\vec{n}_z. \tag{9}$$

Подставляя формулы (7) и (9) в формулу (8) получаем следующее выражение для потенциальной энергии взаимодействия точечного диполя с электростатическим полем системы из двух колец:

$$U(\rho, z) = p \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{4R\sigma\rho\left(\frac{L}{2}-z\right)}{\sqrt{(\rho+R)^2+\left(\frac{L}{2}-z\right)^2}} \cdot \frac{1}{(\rho-R)^2+\left(\frac{L}{2}-z\right)^2} E(k_1) - \frac{4R\sigma\rho\left(\frac{L}{2}+z\right)}{\sqrt{(\rho+R)^2+\left(\frac{L}{2}+z\right)^2}} \cdot \frac{1}{(\rho-R)^2+\left(\frac{L}{2}+z\right)^2} E(k_2) \tag{10}$$

где $E(x)$ – полный эллиптический интеграл 2-го рода:

$$E(x) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-x^2 \sin^2 \varphi} d\varphi. \tag{11}$$

Характерный вид потенциальной энергии (10) как функции двух переменных показан на рисунках 3-5.

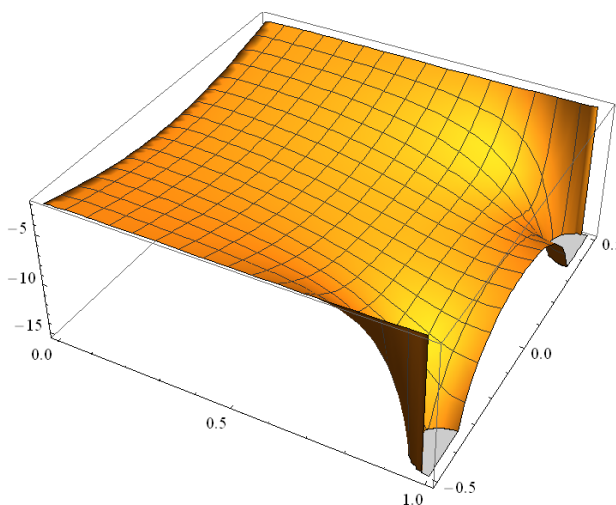


Рисунок 3. Потенциальная энергия взаимодействия точечного электрического диполя с электрическим полем двух колец. Радиальное расстояние (расстояние от точки, где находится диполь, до оси z) измеряется в долях R – радиуса колец. Расстояние вдоль оси z измеряется в долях L – расстояния между кольцами.

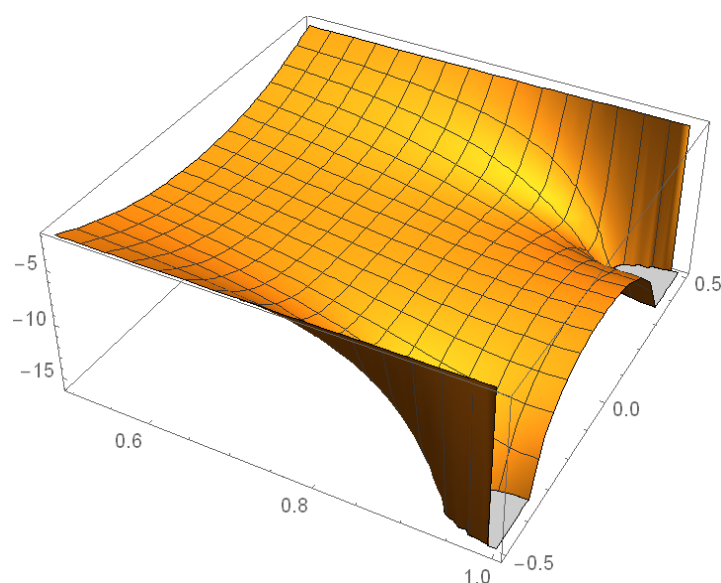


Рисунок 4. Потенциальная энергия взаимодействия точечного электрического диполя с электрическим полем двух колец. Радиальное расстояние (расстояние от точки, где находится диполь, до оси z) измеряется в долях R – радиуса колец. Расстояние вдоль оси z измеряется в долях L – расстояния между кольцами.

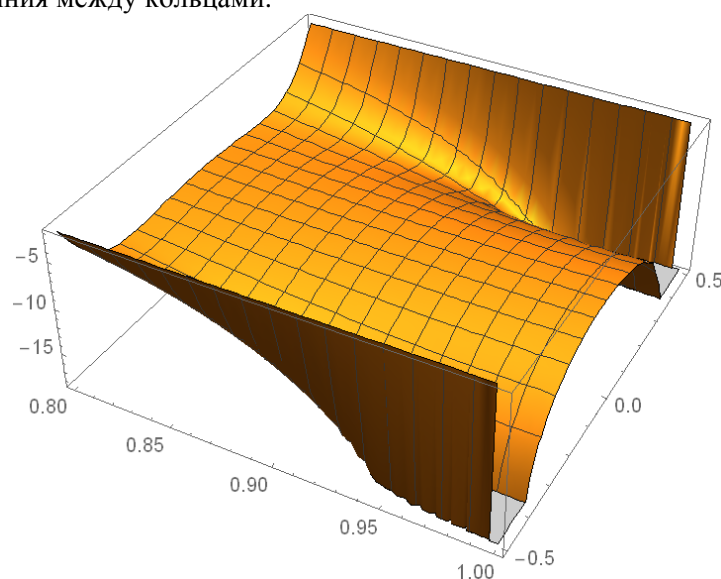


Рисунок 5. Потенциальная энергия взаимодействия точечного электрического диполя с электрическим полем двух колец. Радиальное расстояние (расстояние от точки, где находится диполь, до оси z) измеряется в долях R – радиуса колец. Расстояние вдоль оси z измеряется в долях L – расстояния между кольцами.

Из рисунков 3-5 видно, что потенциальная энергия системы имеет явно выраженные и достаточно резкие минимумы, располагающиеся на расстоянии R от оси z около колец. Это означает, что при размещении двух чувствительных элементов, прикрепленных к оптоволокну, которые можно моделировать диполями, в окрестности этих минимумов на эти диполи будут действовать противоположные силы. Это приведет к растяжению оптоволокну. Заметим, что потенциальные ямы являются глубокими и резкими, что приведет к появлению достаточно большой силы. Это может обеспечить высокую чувствительность датчика, а взаимное расположение диполей создаст пред растяжение на волокне и повысит чувствительность датчика.

4. 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, электрет для преобразования электрической энергии в механическую, оптоволокно в качестве канала передачи сигнала и спектроанализатор с цифровым выходом для подключения к компьютеру. Заявленное устройство свободно от недостатков, приведенных выше. Проведенная работа позволяет проектировать подобные датчики с заданными параметрами и рассчитывать оптимальные габаритные размеры для подобного устройства. Разработка подобного датчика сможет решить задачи по определению электрического поля в условиях, где необходима надежность и защищённость датчика от внешних воздействий, а так же в местах, где есть требования по взрывобезопасности.

5. 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 // Rev. of scientific instruments. – 1997. – Vol. 68(12). – P. 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, 2004.
- [4] Лазарев, В.А. Быстродействующая система измерения деформации и температуры на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков / В.А. Лазарев. – Москва, 2013.
- [5] Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991.
- [6] Гордон, А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – Москва: Госэнергоиздат, 1960.
- [7] Легостаев, Н.С. Материалы электронной техники / Н.С. Легостаев. – Томск: Эль Контент, 2012.

Mathematical modeling of fiber-optic electric field sensor with FBG based on electret

G.I. Leonovich¹, V.N. Zakharov², A.F. Krutov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Currently, one of the most effective converters that meet the high requirements for metrological and operational parameters are fiber-optic. The article reflects the current state of fiber-optic sensors, considers the main types and methods of measurement. The proposed new model of fiber-optic sensor based on Bragg gratings for measuring electrical parameters. A mathematical model is calculated for the proposed model. The results of the work were obtained and evaluated.

Keywords: Electret, FBG, sensor.