

Моделирование волоконно-оптических датчиков электрических величин на основе брегговских решеток с коррекцией инструментальных погрешностей

В.Н. Захаров¹

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. Исследование моделей ВОД/ВБР, с учетом особенностей проектирования, позволяет прогнозировать работу датчиков в жестких условиях эксплуатации с целью разработки рекомендаций по поддержанию и повышению их точности и стабильности при воздействии внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ).

1. Введение

Анализ известных и перспективных конструкций и алгоритмов функционирования волоконно-оптических датчиков на ВБР (ВОД/ВБР) позволяет посредством построенных математических моделей оценить эффективность различных способов коррекции инструментальных погрешностей, в том числе, вызванных внешними дестабилизирующими факторами (ВДФ) [1 - 5].

При ограниченном количестве доминирующих инструментальных погрешностей (ДИП) для улучшения метрологических характеристик целесообразно применение метода вспомогательных измерений. Типичные ДИП, вызванные внешними дестабилизирующими факторами (ВДФ) дополнительная деформация, люфты, перекосы и смещения сенсорного участка оптического волокна (ОВ) относительно измеряемого участка цепи или сопряженных с сенсорным участком активных сенсорно - актюаторных элементов, подключенных к электрической цепи, при их одномерных и двумерных смещениях.

Для коррекции погрешностей разметки аналоговых, дискретных и цифровых шкал, совмещенных с подвижными элементами цепи, и считывающих ВБР-элементов (СчЭ), эффективными являются алгоритмы функциональной фильтрации, основанные на логическом выделении из системы из двух и более однородных сигналов линейных участков без гистерезисов и люфтов позиционных характеристик с их последующей интерполяцией.

Разработаны алгоритмические модели, позволяющие устранять аддитивные погрешности, вызываемые внешними и внутренними шумами волоконно-оптического тракта. Алгоритмы основаны на введении структурной и информационной избыточности.

Модели датчиков, в которых применен метод образцовых мер, позволяют полностью устранить аддитивные и частично мультипликативные погрешности применением дублирующего датчика, находящегося под воздействием эталонного источника ЭВ. Наибольший выигрыш

достигается при коррекции погрешности нелинейности функции отклика, вызванной температурной нестабильностью параметров элементов.

На основе метода обратного преобразования разработаны принцип и модель датчика с коррекцией погрешностей, вызванных виброударными воздействиями на датчик и импульсным режимом измеряемых электрических величин.

Разработаны модели датчиков с устройствами функциональной обработки и коррекции отраженных оптических сигналов путем избирательной фильтрации по спектру. Расчет параметров моделей датчиков показан на примере расчета датчика электрического поля на решетке Брегга с использованием электрета.

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 выти в зону с максимальной чувствительностью, повысить точность показаний, уменьшить гистерезис при срабатывании.

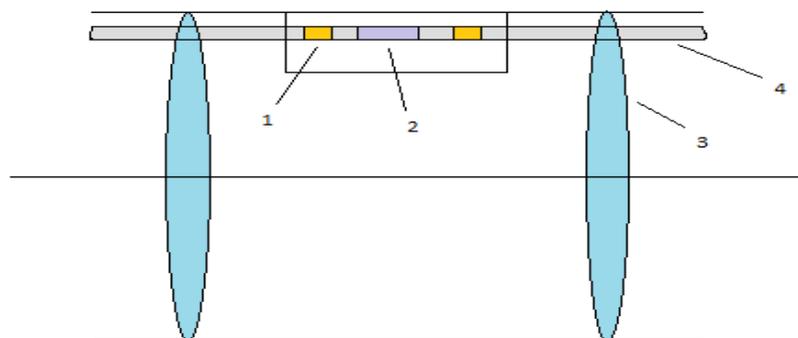


Рисунок 1. Схема волоконно-оптического датчика постоянного электрического поля.

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 оптоволокна.

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:

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

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

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

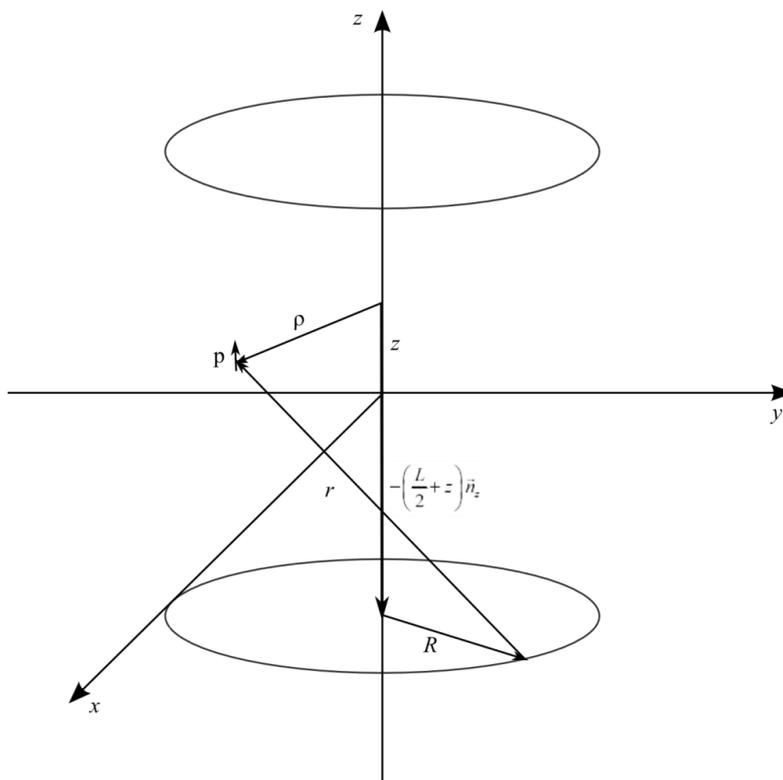


Рисунок 2. Принципиальная схема датчика с сильно неоднородным электростатическим полем.

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:

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

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

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

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:

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

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

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

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:

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

Будем считать, что дипольный момент направлен вдоль оси z :

$$\vec{p} = p\vec{n}_z. \quad (9)$$

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

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

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

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

Характерный вид потенциальной энергии (10) как функции двух переменных показан на рисунке 3.

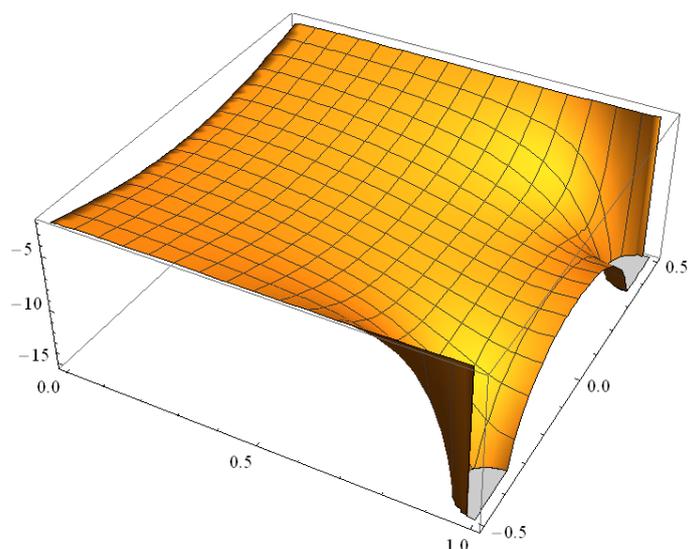


Рисунок 3. Потенциальная энергия взаимодействия точечного электрического диполя с электрическим полем двух колец. Радиальное расстояние (расстояние от точки, где находится диполь, до оси z) измеряется в долях R – радиуса колец. Расстояние вдоль оси z измеряется в долях L – расстояния между кольцами.

4. Литература

- [1] Леонович, Г.И. Волоконно-оптическая сенсорная сеть на ВБР-датчиках с комплексным резервированием / Г.И. Леонович, А.И. Данилин, А.Е. Лобах, В.Н. Захаров // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – 2017. – С. 17-19.
- [2] Леонович, Г.И. Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках / Г.И. Леонович, С.В. Олешкевич // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4-7. – С. 1340-1345.
- [3] Леонович, Г.И. Разработка оптоволоконного датчика электрических параметров на основе решеток брегга и программного комплекса для автоматического моделирования его параметров / Г.И. Леонович, В.Н. Захаров, А.И. Горшков // ИТНТ-2017. Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы, 2017. – С. 1507-1511.
- [4] Леонович, Г.И. Волоконно-оптический датчик напряженности постоянного электрического поля / Г.И. Леонович, В.Н. Захаров, А.Е. Лобах // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Материалы Всероссийской научно-технической конференции; под редакцией А.И. Данилина, 2018. – С. 65-67.

Fiber-optic power supply monitoring system for autonomous electronic equipment

V.N. Zakharov¹

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

Abstract. Currently, one of the most efficient converters that meet the high requirements for metrological and performance indicators are fiber-optic. The study of models of FOD / FBG, taking into account the design features, allows to predict the operation of sensors in harsh operating conditions in order to develop recommendations for maintaining and improving their accuracy and stability under the influence of external destabilizing factors (VDF).