

УДК 621.327.8:535.41

## Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна

Т.П. Янукович, А.В. Поляков

Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 20.06.2019

Принята к печати 05.08.2019

В связи с развитием систем автоматизации и контроля большой интерес вызывают методы и приборы для измерения больших значений силы тока. Целью работы являлась разработка принципиальной схемы распределенного сенсора силы тока на основе анализа частотных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна; создание математической модели сенсора для демонстрации его работы и расчет его основных параметров.

Для проведения измерений использовалось оптическое волокно с токопроводящим покрытием. Между токовой шиной, силу тока в которой необходимо измерить, и токопроводящим покрытием возникает сила Ампера, которая в свою очередь приводит к появлению деформации волокна. Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна имеет характеристическую частоту, значение которой зависит от величины деформации волокна. Изменение значения этой частоты позволяет измерить значение силы тока в токовой шине. Для регистрации изменения частоты и фиксации местоположения возмущения использовался метод анализа частотных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.

Приведена математическая модель работы сенсора на основе трехволновой модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Данная модель позволяет найти изменение интенсивности оптического сигнала, проходящего по оптическому волокну, в зависимости от изменения характеристической частоты рассеяния. Метод использует обратное Фурье-преобразование для построения функции импульсного отклика.

Представлена принципиальная схема распределенного сенсора силы тока на основе метода анализа частотных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Проведена априорная оценка параметров измерительной системы исходя из математической модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне. Пространственное разрешение сенсора при определении длины и местоположения участков волокна составляет 0,06 м. Разрешающая способность сенсора составляет 0,22 кА, максимальное значение силы тока 25 кА. Исследована зависимость работы сенсора при различных мощностях излучения используемого лазера. Рассмотрено влияние изменения показателя преломления оптического волокна на результат измерения.

**Ключевые слова:** сила тока, деформация, оптоволокно, местоположение.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

---

**Адрес для переписки:**

Т.П. Янукович  
Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь  
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

---

**Address for correspondence:**

T.P. Yanukovich  
Belarusian State University,  
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus  
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

---

**Для цитирования:**

Т.П. Янукович, А.В. Поляков  
Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна.  
Приборы и методы измерений.  
2019. – Т. 10, № 3. – С. 243–252.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

---

**For citation:**

T.P. Yanukovich, A.V. Polyakov  
[Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation].  
Devices and Methods of Measurements.  
2019, vol. 10, no. 3, pp. 243–252 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

# Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation

T.P. Yanukovich, A.V. Polyakov

Belarusian State University,  
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 20.06.2019

Accepted for publication 05.08.2019

## Abstract

Due to the development of automation and control systems, methods and devices for measuring of electric current large values are of great interest. The aim of the work was to develop a schematic diagram of a distributed current strength sensor based on the Brillouin optical frequency domain analysis; to create a mathematical model of the sensor to demonstrate its work and to calculate the basic parameters of the sensor.

To provide the measurement optical fiber with conductive coating is used. Between the current bus, where current is measured, and conductive coating the Ampere force arises. Strain occurs in optical fiber due to this force. Stimulated Brillouin scattering has the strain dependent characteristic frequency. Shift of the characteristic frequency allows to measure current in the bus. To measure the characteristic frequency and the location of its shift Brillouin optical frequency domain analysis is used.

The mathematical model of sensor operation based on tree-wave model of stimulated Brillouin scattering is demonstrated. This model allows calculating intensity of optical signal in the fiber in dependence of characteristic frequency shift. Brillouin optical frequency domain analysis uses inverse Fourier transform to obtain pulse response.

A schematic diagram of a distributed current sensor based on the method of Brillouin optical frequency domain analysis is presented. An a priori estimate of parameters of the measuring system was carried out on the basis of the mathematical model of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber. The spatial resolution of the sensor when determining the length and location of fiber sections was 0.06 m. The resolution of the sensor was 0.22 kA, the maximum value of the current strength was 25 kA. Dependence of the sensor operation at different powers of the laser used was investigated. The refractive index change influence on the result of measurements was estimated.

**Keywords:** electric current, deformation, optical fiber, location.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

---

### Адрес для переписки:

Т.П. Янукович  
Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь  
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

### Address for correspondence:

T.P. Yanukovich  
Belarusian State University,  
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus  
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

---

### Для цитирования:

Т.П. Янукович, А.В. Поляков  
Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна.  
Приборы и методы измерений.  
2019. – Т. 10, № 3. – С. 243–252.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

### For citation:

T.P. Yanukovich, A.V. Polyakov  
[Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2019, vol. 10, no. 3, pp. 243–252 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

## Введение

В связи с развитием систем автоматизации и контроля большой интерес вызывают методы и приборы для измерения основных параметров электрических генерирующих, транспортирующих и потребляющих устройств. Недостатком используемых сейчас систем измерения силы тока являются характеристики первичных преобразователей – высоковольтных трансформаторов тока. Их погрешность зависит от режима нагрузки, дополнительная погрешность накапливается, они пригодны только для измерения переменных токов. Для анализа данных первичного преобразователя используются электросчетчики. Их показания зависят от постоянства значения амплитуды и фазы переменного электрического сигнала. В качестве первичного преобразователя можно использовать датчик Холла. Он имеет большую точность и может измерять постоянный ток. Но его недостатком, так же, как и трансформаторов, является наличие эффекта насыщения, сильно ограничивающего диапазон измеряемых токов. При их установке необходимы сложные процедуры настройки для исключения влияния асимметричного поля и перекрестных наводок с расположенных рядом шин [1].

Большое значение имеет независимость измерительного устройства от измеряемой величины, так называемая развязка. Оптические датчики обладают рядом преимуществ. Они независимы от внешних полей, имеют малые габариты и достаточно просты в монтаже. Волоконно-оптические системы являются оптимальным решением большинства задач, возникающих при измерении силы тока. Такие системы обеспечивают точные измерения в большом диапазоне токов, развязку по электропитанию с измеряемыми системами, позволяют обрабатывать сигнал в режиме реального времени, результаты измерений обладают достоверностью и повторяемостью. В настоящее время используются оптоволоконные датчики на основе эффекта Фарадея [2, 3], представляющие собой солиноиды стандартных одноволоконных волокон, подключенных по рециркуляционной схеме [4, 5], по схеме интерферометра Саньяка [6]; волокно, легированное квантовыми точками CdSe для повышения чувствительности; в качестве датчиков применяются специальные магнито-оптические материалы и пластиковые оптические волноводы для передачи оптических сигналов [8–10]. Однако они требуют использова-

ние специфического оптического волокна, не позволяют одновременное измерение в различных точках. Кроме этого, существуют датчики на основе магнестрикции и деформации. Но они могут работать только в одной точке и создать на основе этих эффектов датчик, работающий распределенно, не представляется возможным.

В настоящее время активно изучается и применяется новый класс волоконно-оптических датчиков, использующих вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ). При создании таких сенсоров используется свойство изменения характеристической частоты вынужденного рассеяния при изменении температуры и деформации волокна. Кроме этого, такие сенсоры позволяют измерять не только воздействие величины температуры и деформации, но и ее местоположение. Первый класс сенсоров, созданных на этой базе, использовал анализ временной характеристики ВРМБ [11]. Для повышения чувствительности и сокращения времени измерений был предложен новый метод анализа частотных характеристик ВРМБ [12]. Увеличение соотношения сигнал-шум достигается использованием обратного Фурье преобразования. Применение этого преобразования уменьшает погрешность, связанную со спонтанным излучением Мандельштама–Бриллюэна. Трехволновая модель ВРМБ в оптическом волокне подробно рассмотрена в работах [12, 13].

Целью работы являлась разработка принципиальной схемы распределенного сенсора силы тока на основе анализа частотных характеристик ВРМБ, создание математической модели сенсора для демонстрации его работы и расчет основных параметров сенсора.

## Принцип работы сенсора

Индукцию  $B$  магнитного поля проводника с током  $I$  можно рассчитать согласно закону Био–Савара–Лапласа:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\mathbf{l}, \mathbf{r}],$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки, в которой рассчитывается индукция магнитного поля;  $d\mathbf{l}$  – элемент длины проводника, направление которого определяется направлением тока.

Для уединенного проводника большой длины, магнитную индукцию можно рассчитать по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

Если рядом с первым проводником с током  $I$  разместить еще один с током  $i$ , то между ними возникнет сила Ампера  $F_A$ :

$$F_A = iBl = \frac{\mu_0 Iil}{2\pi r}. \quad (1)$$

В случае, если токи  $I$  и  $i$  направлены противоположно, сила Ампера будет направлена перпендикулярно проводнику и отталкивать его, и в случае закрепленного проводника приведет к его поперечной деформации. Согласно закону Гука, деформирующее усилие можно записать:

$$\frac{F}{S} = E\varepsilon, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь сечения, перпендикулярного действию силы;  $E$  – модуль Юнга материала образца;  $\varepsilon$  – относительная деформация образца.

Так как деформация вызывается силой Ампера, то из выражений (1) и (2) можно получить:

$$\frac{\mu_0 Iil}{2\pi r} = E\varepsilon S.$$

Учитывая, что площадь сечения проводника, перпендикулярного действию силы, можно вы-

числить как произведение длины проводника  $l$  на его диаметр  $d$ , можно выразить связь тока  $I$  и относительной деформации  $\varepsilon$ :

$$I = \frac{2\pi r d E}{\mu_0 i} \varepsilon. \quad (3)$$

Таким образом, сила тока  $I$  в проводнике приводит к возникновению пропорциональной относительной деформации  $\varepsilon$ .

### Структура распределенной оптоволоконной системы измерения силы тока

Схема установки для измерения силы тока методом анализа бриллюэновского оптического частотного домена представлена на рисунке 1.

В качестве чувствительного элемента сенсора используется одномодовое оптическое волокно длины  $L$ . Участки волокна длиной  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  закреплены вдоль токовых шин с токами  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ , покрыты проводящей оболочкой из алюминия. При пропускании тока  $i$ , направление которого противоположно направлению тока в токовой шине, по проводящей оболочке между шиной и оболочкой волокна возникает сила Ампера, она вызывает деформацию оптического волокна.

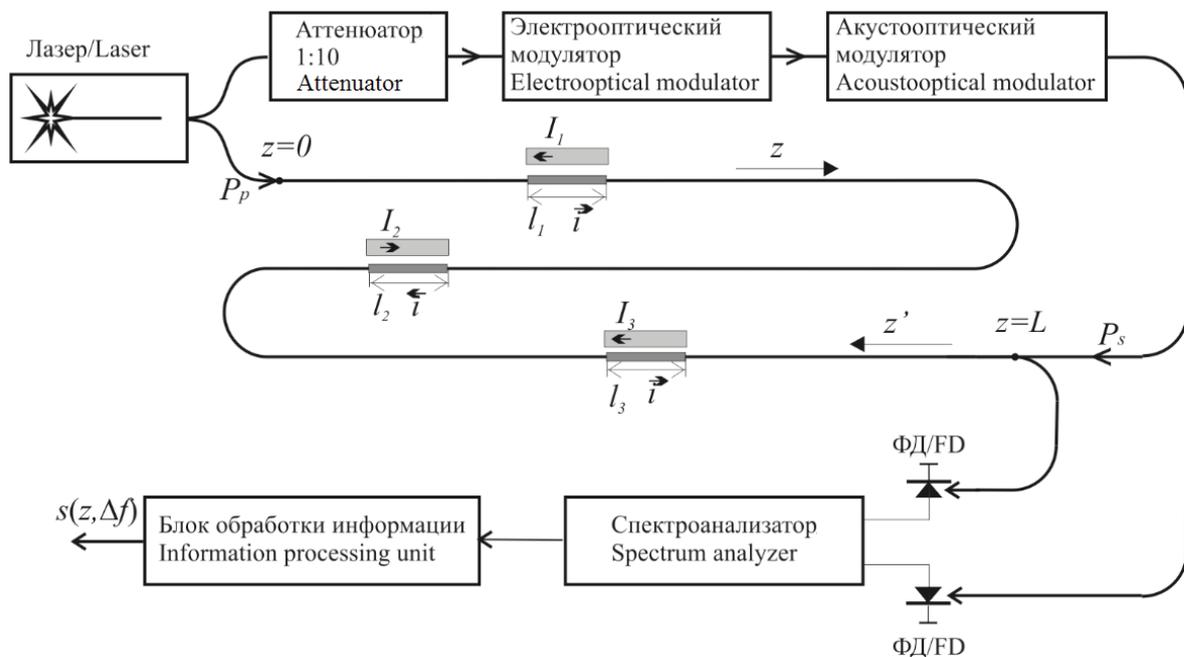


Рисунок 1 – Схема установки для измерений методом анализа частотных характеристик ВРМБ

Figure 1 – Brillouin optical frequency domain analysis measurement scheme

Источником излучения в установке служит твердотельный узкополосный лазер с длиной волны  $\lambda = 1,319$  мкм и мощностью  $P = 1 \div 10$  мВт. Излучение лазера разделяется на два потока. Один из них формирует непрерывное излучение накачки с частотой  $f_p$  и мощностью  $P_p(0)$ , которое вводится с одной стороны чувствительного оптического волокна, имеющего координату  $z = 0$ . Второй поток направляется на аттенуатор, где его мощность ослабляется в 10 раз. Затем с помощью электрооптического модулятора частота излучения сдвигается на величину  $\Delta f$  относительно частоты излучения накачки  $f_p$  и становится равной  $f_s$ . Установленная разность частот  $\Delta f = f_p - f_s$  между излучением накачки и пробным излучением является переменной. Пробное излучение модулируется с помощью акустооптического модулятора по гармоническому закону в пределах от 10 Гц до 80 МГц и с другой стороны чувствительного оптического волокна, имеющего координату  $z = L$ . Внутри оптического волокна излучение накачки и пробное распространяются навстречу друг другу. Если разность частот излучений  $\Delta f$  равна характеристической частоте ВРМБ  $f_B$ , формируется акустическая волна с частотой  $\Delta f = f_B$  и происходит рассеяние части излучения накачки, что приводит к ослаблению его мощности и усилению мощности пробного излучения. При этом излучение накачки приобретает частичную модуляцию, соответствующую модуляции пробного излучения. Мощность модулированного пробного излучения и излучения накачки детектируется фотодиодами. Далее детектированный сигнал поступает на спектроанализатор и обрабатывается дифференциальным методом, где в качестве опорного используется сигнал пробного излучения. Блок обработки информации выполняет обратное Фурье преобразование полученного спектра сигнала, зависящего от частоты модуляции пробного излучения и разности частот лазера. Анализируя полученную комплексную передаточную функцию  $s(z, \Delta f)$  [12], зависящую от координаты и разности частот лазеров, можно определить величину тока в токоведущей шине и координату участка с током.

## Моделирование работы сенсора

Для проведения моделирования использовалось одномодовое оптическое волокно, диаметр которого 125 мкм (диаметр сердцевины 9 мкм), с оболочкой из алюминия, по которой

пропускается ток  $i = 1$  А. Волокно расположено на расстоянии 1 см от токовой шины. В модели рассмотрены три участка волокна, длиной  $l_1 = 0,2$  м,  $l_2 = 0,1$  м,  $l_3 = 0,3$  м. Зависимость характеристической частоты ВРМБ от относительной деформации:

$$f_B = f_{B,0} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \varepsilon, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация участка оптического волокна;  $\partial f / \partial \varepsilon = 500$  кГц – деформационный коэффициент характеристической частоты ВРМБ, полученный экспериментально [11].

Результаты моделирования представлены на рисунке 2 в виде зависимости действительной части передаточной функции  $s$  от координаты волокна  $z$  и разности частот лазеров  $\Delta f$ . Передаточная функция имеет наибольшее значение в начале волокна и плавно уменьшается к концу волокна. Такое поведение функции характерно для недеформированного волокна. Минимум передаточной функции наблюдается при разности частот излучения накачки и пробным излучением  $\Delta f = 1,28 \cdot 10^{10}$  Гц. Такая разность частот соответствует характеристической частоте ВРМБ для недеформированного волокна. Однако на рисунке 2 есть скачкообразные увеличения значения передаточной функции при координате  $z = 80; 180; 240$  м от начала волокна. Такие изменения в передаточной функции говорят о том, что на этих участках волокна не происходит ослабление сигнала за счет ВРМБ. Следовательно, на этих участках изменяется характеристическая частота ВРМБ. После выявления участков с измененной характеристической частотой, производится анализ зависимости передаточной функции от разности частот лазеров  $\Delta f$ . Минимум передаточной функции будет соответствовать разности частот, на которой наблюдалось максимальное ВРМБ данном участке волокна. Именно это значение разности частот будет соответствовать характеристической частоте ВРМБ на данном участке и позволит вычислить значение измеряемого тока.

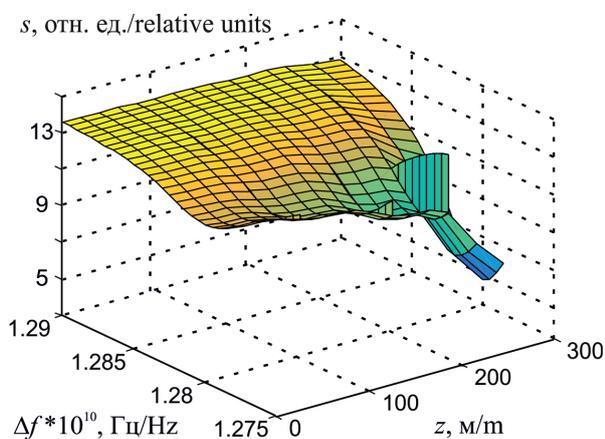
Зависимость передаточной функции от координаты волокна, представленная на рисунке 3а, позволяет обнаружить расположение участков со смещенной характеристической частотой ВРМБ и их длину. В данной модели при координате  $z = 80$  м обнаруживается участок длиной  $l_1 = 0,2$  м, при координате  $z = 180$  м – участок длиной  $l_2 = 0,1$  м,

при координате  $z = 240$  м – участок длиной  $l_3 = 0,3$  м. На каждом из них происходит изменение характеристической частоты. Согласно зависимости передаточной функции от разности частот излучений (рисунок 3b) определяется, какой частоте соответствует минимум передаточной функции на различных участках и тем самым можно определить деформацию. Кривые 1 ( $z = 80$  м), 2 ( $z = 180$  м) и 3 ( $z = 240$  м) соответствуют зависимости передаточной функции от частоты на участках, где оптическое волокно находится под воздействием силы тока, кривая 4 ( $z = 1$  м) показывает, как будет выглядеть зависимость передаточной функции для участка оптического волокна, не подверженного внешним воздействиям. Сила тока будет определяться по формуле:

$$I = c \cdot \Delta f,$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от размера волокна, его модуля Юнга, а также от расстояния между волокном и шиной. В данной модели, согласно (3) и (4):

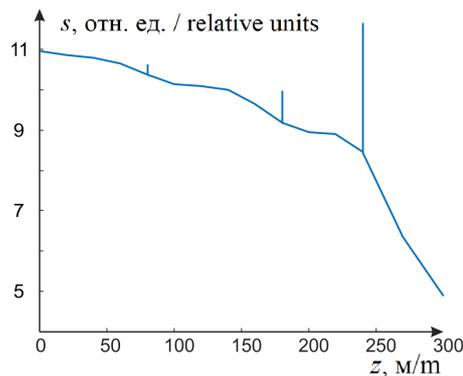
$$c = \frac{2\pi r d E}{\mu_0 i} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} = 0,432 \cdot 10^{-3} \text{ А/Гц}.$$



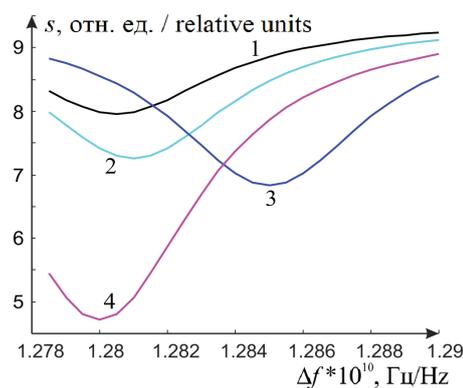
**Рисунок 2** – Зависимость передаточной функции  $s$  от координаты оптического волокна  $z$  и от разности частот излучений  $\Delta f$

**Figure 2** – Dependence of pulse response  $s$  on coordinate of optical fiber  $z$  and on radiation frequency difference  $\Delta f$

В результате проведенного моделирования получены результаты: на участке с координатой  $z = 80$  м сила тока  $I$  составила 2,2 кА, на участке с координатой  $z = 180$  м –  $I = 4,4$  кА и на участке с координатой  $z = 240$  м –  $I = 25$  кА.



**a**



**b**

**Рисунок 3** – Зависимость передаточной функции  $s$  от координаты  $z$  при разности частот излучений  $\Delta f = 12,8$  ГГц (a) и от разности частот лазеров  $\Delta f$  на участках волокна с координатами  $z = 80$  м (1);  $z = 180$  м (2);  $z = 240$  м (3);  $z = 1$  м (4) (b)

**Figure 3** – Dependence of pulse response  $s$  on coordinate of optical fiber  $z$  ( $\Delta f = 12,8$  GHz) (a) and on radiation frequency difference  $\Delta f$  on the spot with coordinate  $z = 80$  м (1);  $z = 180$  м (2);  $z = 240$  м (3);  $z = 1$  м (4) (b)

Чувствительность измерений силы тока методом АБОЧД определяется минимальной частотой, на которую смещается излучение лазера электрооптическим модулятором. В представленной модели минимальная разность частот между излучением накачки и пробным излучением составляет  $\Delta f = 0,5$  МГц, следовательно, разрешающая способность достигает величины 0,22 кА. Максимальное значение определяется не только возможностями электрооптического модулятора, но и изменением свойств оптического волокна под действием деформации. Максимальное измеренное значение тока в представленной модели составило 25 кА.

Особенностью представленного сенсора является то, что характеристическая частота ВРМБ зависит не только от деформации, но и от темпе-

ратуры. При прогреве оптического волокна смещение характеристической частоты изменяется по закону:

$$f_B = f_{B,0} + \frac{\partial f}{\partial T}(T - T_0).$$

Токовые шины, используемые в промышленности, являются теплоизолированными. Однако прохождение тока по оболочке оптического волокна приведет к его прогреву. Так, если оптическое волокно в оболочке, изготовленной из алюминия, будет теплоизолировано, то его температура будет повышаться каждые 5 с на 1 °С, что приведет к изменению характеристической частоты оптического волокна на 1,2 ГГц. Для проведения точных измерений необходимо поддерживать температуру волокна постоянной.

Следует отметить, что ВРМБ происходит по всей длине волокна. Однако ослабление сигнала зависит от длины волокна на всех частотах. К концу волокна потери больше, чем в начале. Это позволяет калибровать тестовое волокно и избежать ошибки при проведении измерений. В расчетах предполагалось, что температура вдоль всего измеряемого участка волокна постоянна.

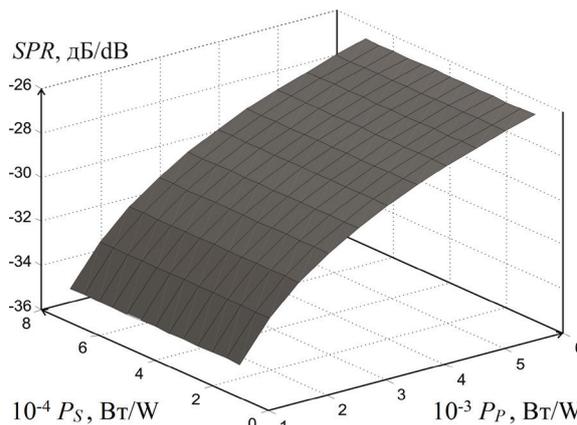
Максимальная длина волокна, которое можно исследовать методом АБОЧД, ограничена шагом дискретизации частоты  $\Delta f_m$ , с которым определяется передаточная функция. Поэтому максимальная длина волокна и пространственное разрешение АБОЧД сенсора будут соответственно:

$$L_{\max} = \frac{c}{2\pi\Delta f_m}, \quad \Delta z = \frac{c}{2\pi(f_{m,\max} - f_{m,\min})},$$

где  $f_{m,\max}$  и  $f_{m,\min}$  – максимальная и минимальная частоты модуляции соответственно.

При шаге дискретизации  $\Delta f_m = 4,6$  кГц максимальная длина волокна составляет 10 км. При  $f_{m,\max} = 800$  МГц и  $f_{m,\min} = 10$  Гц, пространственное разрешение сенсора вдоль волоконно-оптической линии составляет 0,06 м. Шаг дискретизации выбирается из условия технической реализуемости и требуемого времени измерений.

Для того, чтобы зарегистрировать изменение передаточной функции  $\Delta s$ , соответствующее изменению деформации волокна на  $\epsilon$ , необходимо, чтобы это изменение превосходило шум регистрирующей аппаратуры на участке деформированного волокна  $l$  (рисунок 4).



**Рисунок 4** – Зависимость соотношения полезный сигнал–максимальный отклик  $SPR$  от мощности излучения накачки  $P_p$  и мощности пробного излучения  $P_s$

**Figure 4** – Dependence of signal to maximum pulse ratio  $SPR$  on pump radiation power  $P_p$  and probe radiation power  $P_s$

Для оценки влияния мощности излучения на величину передаточной функции воспользуемся параметром  $SPR$ , который представляет собой соотношение полезный сигнал–максимальный отклик (в децибелах):

$$SPR = 10 \lg \left( \frac{\Delta s}{s_{\max}} \right).$$

Была исследована зависимость  $SPR$  от мощности пробного излучения и мощности излучения накачки, а также от глубины модуляции. Показано, что  $SPR$  мало зависит от мощности пробного излучения в пределах  $10^{-6}$ – $10^{-4}$  Вт и от глубины модуляции в пределах 10–100 %. При этом  $SPR$  нелинейно возрастает с увеличением мощности излучения накачки (рисунок 4). Таким образом, для получения лучшего пространственного разрешения и большей точности измерений необходимо, чтобы мощность излучения накачки находилась в пределах от 7 до 10 мВт. Дальнейшее увеличение мощности излучения накачки приводит к появлению нелинейных эффектов второго порядка. Модулированное излучение накачки приводит к вторичной модуляции пробного излучения, что вносит большие погрешности в измерение импульсного отклика.

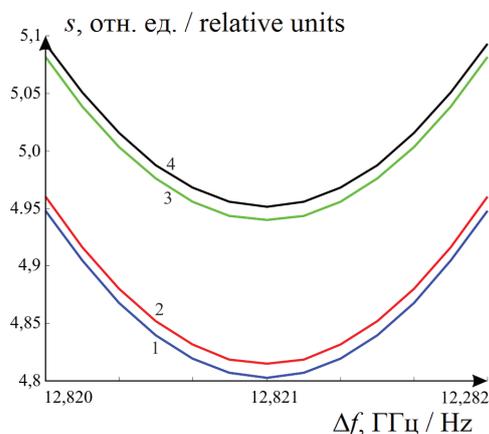
Выходной сигнал фотоприемника зависит также от изменения показателя преломления оптоволокна. В анизотропной среде оптического волокна показатель преломления зависит от направления распространения света и его поляризации. Изменения данной величины

под действием внутренних напряжений, вызываемых давлением, могут быть представлены с помощью изменения эллипсоида показателя преломления. Под действием поперечного внешнего давления  $p$  изменение показателя преломления сердцевинны оптического волокна записывается в виде:

$$\Delta n = \frac{n^3 p (p_{11} + p_{12})}{2E_c^2},$$

где  $p_{11}$  и  $p_{12}$  – коэффициенты Поккельса.

Наибольший интерес вызывает влияние избыточных потерь и изменение показателя преломления вблизи минимума функции отклика в области деформации, вызванной действием силы Ампера. Для расчетов использовались следующие значения:  $r = 10$  мкм;  $b = 120$  мкм;  $\Delta = 2 \cdot 10^3$ ;  $E_c = 6,2 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;  $p = 8 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>;  $p_{11} = 0,121$ ;  $p_{12} = 0,27$ . Математическое моделирование функции отклика (рисунок 5) было проведено без учета избыточных потерь и изменения показателя преломления (кривая 1), затем с учетом избыточных потерь (кривая 2), изменения показателя преломления (кривая 3). Кривая 4 представляет собой результат моделирования с учетом избыточных потерь и изменения показателя преломления.



**Рисунок 5** – Зависимость передаточной функции  $s$  от разности частот  $\Delta f$ : 1 – без учета избыточных потерь и изменения показателя преломления; 2 – с учетом избыточных потерь; 3 – с учетом изменения показателя преломления; 4 – с учетом избыточных потерь и изменения показателя преломления

**Figure 5** – The dependence of pulse response  $s$  on radiation frequency difference  $\Delta f$ : 1 – excluding excess losses and refraction index change; 2 – including excess losses; 3 – including refraction index change; 4 – including excess losses and refraction index change

Из рисунка 5 следует, что влияние избыточных потерь и изменение показателя преломления вносит незначительную погрешность ( $\approx 3\%$ ) при определении значения функции отклика методом АБОЧД. На определение характеристической частоты ВРМБ, а, следовательно, на определение силы тока эта погрешность влиять не будет. Влияние данных эффектов может возрасти с увеличением числа источников механических напряжений на единицу длины.

## Заключение

Представлена принципиальная схема распределенного сенсора силы тока на основе метода анализа бриллюэновского оптического частотного домена. Проведена априорная оценка параметров измерительной системы, исходя из математической модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне. Пространственное разрешение сенсора при определении длины и местоположения участков волокна составляет 0,06 м при использовании амплитудной модуляции оптического сигнала в пределах от 10 ГГц до 800 МГц. Разрешающая способность сенсора составляет 0,22 кА при разности частот излучения накачки и пробного  $\Delta f = 500$  кГц, максимальное значение силы тока 25 кА при разности частот излучения накачки и пробного  $\Delta f = 50$  МГц.

Исследована зависимость работы сенсора при различных мощностях используемого лазера. Показано, что для получения лучшего пространственного разрешения и большей точности измерений необходимо, чтобы мощность излучения накачки находилась в пределах от 7 до 10 мВт. Рассмотрено влияние изменения показателя преломления оптического волокна на результат измерения.

Дальнейшее исследование будет посвящено устранению влияния повышения температуры оптического волокна на результат измерений.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника, опто- и микроэлектроника» в 2019 г.

## Список использованных источников

1. Бонерт, К. Прорыв в области измерения сильных постоянных токов / К. Бонерт, П. Гугенбах // АББ Ревю. – 2005. – № 1. – С. 6–10.

2. Silva, R.M. Optical current sensors for high power systems: A Review / R.M. Silva, H. Martins, I. Nascimento [et al.] // Applied Sciences. – 2012. – Vol. 2, no. 7. – P. 602–628. DOI: 10.3390/app2030602

3. Zubia, J. Design and development of a low-cost optical current sensor / J. Zubia [et al.] // Sensors. – 2013. – Vol. 13, no. 10. – P. 13584–13595. DOI: 10.3390/s131013584

4. Zhang, H. High-current-sensitivity all-fiber current sensor based on fiber loop architecture / H. Zhang, Y. Qiu, H. Li [et al.] // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, no. 17. – P. 18591–18599. DOI: 10.1364/OE.20.018591

5. Zhang, H. A loop all-fiber current sensor based on single-polarization single-mode couplers // H. Zhang, J. Jiang, Y. Zhang [et al.] // Sensors. – 2017. – Vol. 17, no. 11. – P. 2674–2679. DOI: 10.3390/s17112674

6. Wang, Z. Effect of modulation error on all optical fiber current transformers / Z. Wang, Y. Wang, S. Sun // Journal of Sensor Technology. – 2012. – No. 2. – P. 172–176. DOI: 10.4236/jst.2012.24024

7. Watekar, P.R. Development of a highly sensitive compact sized optical fiber current sensor / P.R. Watekar, S. Ju, S.A. Kim [et al.] // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, no. 16. – P. 17096–17105. DOI: 10.1364/OE.18.017096

8. Liu, T. Optical current sensor with dual-wavelength configuration for improving temperature robustness / T. Liu, J. Han, H. Hu // IEEE Photonics Journal. – 2017. – Vol. 9, no. 1. – P. 210–221. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2639286

9. Bilro, L. Optical sensors based on plastic fibers / L. Bilro, N. Alberto, J.L. Pinto // Sensors. – 2012. – Vol. 12, no. 8. – P. 12184–12207. DOI: 10.3390/s120912184

10. Barczak, K. Optical fibre current sensor for electrical power engineering / K. Barczak // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2011. – Vol. 59, no. 4. – P. 409–414. DOI: 10.2478/v10175-011-0049-3

11. Bao, X. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber / X. Bao, D.J. Webb, D.A. Jackson // Optics Letters – 1994. – Vol. 19. – P. 141–143. DOI: 10.1364/OL.19.000141

12. Yanukovich, T.P. Numerical model of three-wave Brillouin scattering in an optical fiber. Journal of Optical Technology. – 2002. – Vol. 69, no. 7. – P. 518–523. DOI: 10.1364/JOT.69.000518

13. Янукович, Т.П. Метод диагностики протяженных волоконно-оптических линии с использованием анализа Бриллюэновского оптического частотного домена / Т.П. Янукович, А.В. Поляков // Известия РАН. Серия физическая. – 2006. – Т. 70, № 9. – С. 1267–1271.

## Acknowledgments

The work was performed as part of the implementation of the Belarusian National Research Programs "Photonics, opto- and microelectronics" in 2019.

## References

1. Bonert K., Gugenbah P. [Breakthrough in the field of measuring strong direct currents]. *ABB Review*, 2005, no. 1, pp. 6–10 (in Russian).

2. Silva R.M., Martins H., Nascimento I., Baptista J.M., Ribeiro A.L., Santos J.L., Jorge P., Frazao O. Optical current sensors for high power systems: A Review. *Applied Sciences*, 2012, vol. 2, no. 7, pp. 602–628. DOI: 10.3390/app2030602

3. Zubia J. Design and development of a low-cost optical current sensor. *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 10, pp. 13584–13595. DOI: 10.3390/s131013584

4. Zhang H., Qiu Y., Li H., Huang A., Chen H., Li G. High-current-sensitivity all-fiber current sensor based on fiber loop architecture. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 17, pp. 18591–18599. DOI: 10.1364/OE.20.018591

5. Zhang H., Jiang J., Zhan Y., Chen H., Zhao N., Lin L., Qiu Y. A loop all-fiber current sensor based on single-polarization single-mode couplers. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 2674–2679. DOI: 10.3390/s17112674

6. Wang Z., Wang Y., Sun S. Effect of modulation error on all optical fiber current transformers. *Journal of Sensor Technology*, 2012, no. 2, pp. 172–176. DOI: 10.4236/jst.2012.24024

7. Watekar P.R., Ju S., Kim S.A., Jeong S., Kim Y., Han W.T. Development of a highly sensitive compact sized optical fiber current sensor. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 16, pp. 17096–17105. DOI: 10.1364/OE.18.017096

8. Liu T., Han J., Hu H. Optical current sensor with dual-wavelength configuration for improving temperature robustness. *IEEE Photonics Journal*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 210–221. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2639286

9. Bilro L., Alberto N., Pinto J.L. Optical sensors based on plastic fibers. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 8, pp. 12184–12207. DOI: 10.3390/s120912184

10. Barczak K. Optical fibre current sensor for electrical power engineering. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. *Technical Sciences*, 2011, vol. 59, no. 4, pp. 409–414.

**DOI:** 10.2478/v10175-011-0049-3

11. Bao X., Webb D.J., Jackson D.A. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber. *Optics Letters*, 1994, vol. 19, pp. 141–143. **DOI:** 10.1364/OL.19.000141

12. Yanukovich T.P. Numerical model of three-wave Brillouin scattering in an optical fiber. *Journal of Optical Technology*, 2002, vol. 69, no. 7, pp. 518–523.

**DOI:** 10.1364/JOT.69.000518

13. Yanukovich T.P., Polyakov A.V. Diagnostic method for extended fiber lines using Brillouin optical frequency-domain analysis. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2006, vol. 70, no. 9, pp. 1267–1271.