

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА СИЛЫ ТОКА

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Рассмотрена модель оптоволоконного сенсора силы тока, использующий зависимость характеристической частоты вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна от деформации оптического волокна, позволяющий измерять как значение силы тока, так и определять участок, где проводится измерение. Приведены метрологические характеристики сенсора, позволяющие рассчитать параметры работы на этапе конструирования.

Вопросы эффективного энергопотребления тесно взаимосвязаны с точным измерением силы тока при любых его значениях. Кроме этого, значение имеет независимость измерительного устройства от измеряемой величины, так называемая развязка. Оптические датчики обладают рядом преимуществ. В волоконно-оптических датчиках с внешним чувствительным элементом измерение параметров производится в области за пределами волокна. То же относится и к гибридным волоконно-оптическим датчикам. Сами датчики можно рассматривать как «черные ящики», при этом оптические волокна используются для переноса света к «ящикам» и данных – в обратном направлении. В большинстве случаев понятия датчиков с внешним чувствительным элементом и гибридных датчиков взаимозаменяемы. Основное различие возникает в случае использования энергии светочувствительных элементов, когда луч света используется для приведения в действие электронного датчика и данные возвращаются обратно по волоконно-оптическому каналу. В этом случае термин «гибридные» является более подходящим.

Большой и важный подкласс датчиков, в которых оптическое волокно используется в качестве чувствительного элемента, или чистоволоконных датчиков, – это датчики интерферометрические. Большинство датчиков, обеспечивающих наиболее высокую производительность, относятся именно к этому подклассу.

В настоящее время активно изучается и применяется новый класс волоконно-оптических датчиков, использующих вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна. 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, но и ее местоположение, что не могут обеспечить оптоволоконные сенсоры, работающие на других принципах.

Увеличение соотношения сигнал-шум достигается использованием обратного Фурье преобразования. Применение этого преобразования уменьшает погрешность, связанную со спонтанным излучением Манделъштама-Бриллюэна [1].

Схема установки для измерения методом АБОЧД представлена на рисунок 1.

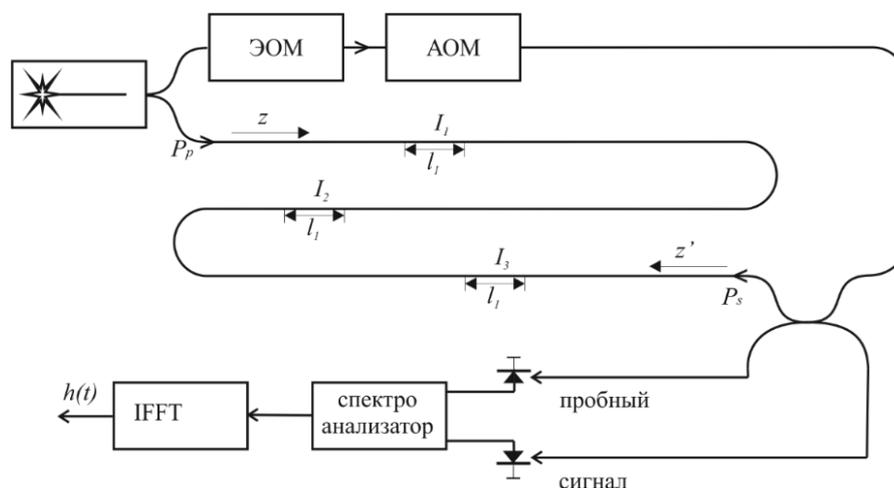


Рисунок 1 – Принципиальная схема измерительной установки методом АБОЧД

В качестве чувствительного элемента используется одномодовое оптическое волокно, покрытое проводящей оболочкой длиной  $L$ , закрепленное вдоль токовой шины. При пропускании тока  $i$  по проводящей оболочке между шиной и оболочкой волокна возникает сила Ампера, она вызывает деформацию оптического волокна. В установке используется узкополосный лазер, излучение которого разделяется на две части. С левого конца волокна вводится непрерывное излучение узкополосного лазера с частотой  $f_p$  и мощностью  $P_p(0)$ . С правого конца волокна подается излучение с ослабленной мощностью  $P_s(L)$ , частота которого  $f_s$  сдвинута в низкочастотную область с помощью электрооптического модулятора по сравнению с частотой лазера накачки на величину характеристической частоты ВМБР  $f_B$  волокна [1]. Значение данной характеристической частоты зависит от деформации волокна. В результате ВРМБ излучения пробного лазера в волокне возникает волна Стокса, которая распространяется противоположно распространению излучения пробного лазера.

Акустооптический модулятор (АОМ) модулирует излучение пробного лазера по гармоническому закону в пределах от 10 Гц до 80 МГц. Установленная разность частот  $\Delta f = f_p - f_s$  между двумя лазерами является зависимой от деформации характеристической частотой вынужденного рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна на определенном отрезке волокна.

Мощность модулированного излучения пробного лазера и лазера накачки детектируется фотодиодами (ФД). После математической обработки получаем комплексную передаточную функцию  $s(z, \Delta f)$ .

Результаты моделирования представлены на рисунке 2. Зависимость функции отклика от длины позволяет обнаружить расположение участков и их длину. Согласно зависимости функции отклика от частоты определяется, какой частоте соответствует минимум передаточной функции на различных участках и тем самым можно определить деформацию. Сила тока будет определяться по формуле:

$$I = c\varepsilon, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока в шине, А;  $\varepsilon$  – относительная деформация;  $c$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от размера волокна, его модуля Юнга, а также расстояния между волокном и шиной. В данной модели  $c = 0,216 \cdot 10^3$  А.

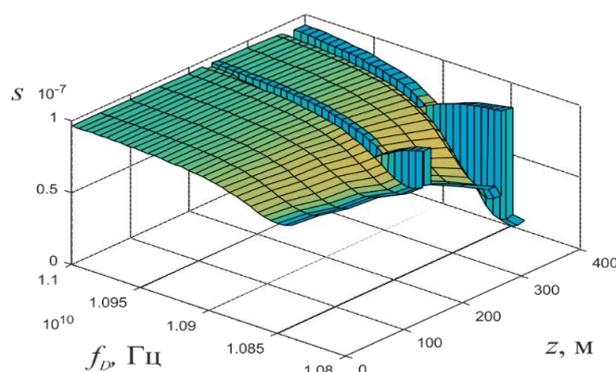


Рисунок 2 – Зависимость функции отклика  $s$  от длины оптического волокна  $L$  и от разности частот лазеров  $\Delta f$ .

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.

В представленной модели 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 температуры.

При использовании оптического волокна на основе  $\text{GeO}_2$  значение коэффициента усиления ВРМБ изменяется в зависимости от воздействующей величины (рисунок 3). Эти данные были использованы при построении модели температурного и деформационного воздействия на одном и том же участке [2].

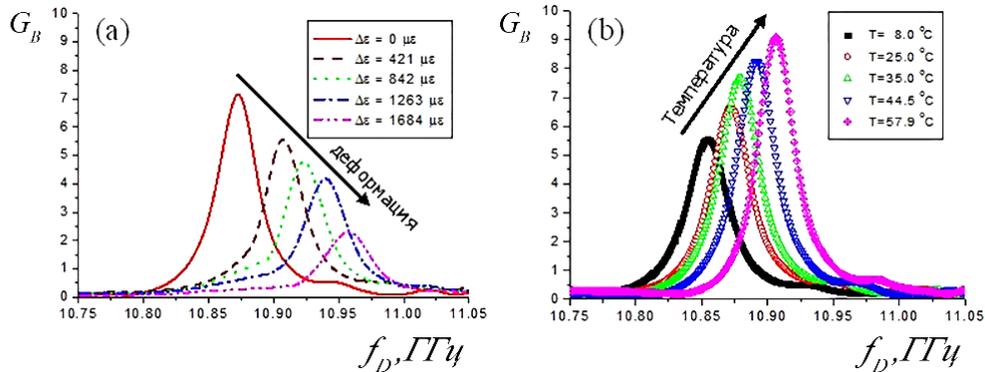


Рисунок 3 – Зависимость усиления мощности пробного сигнала от разности частот накачки и пробного сигнала при деформационном (а) и температурном (б) воздействии на оптическое волокно с добавлением  $\text{GeO}_2$ .

Было проведено моделирование температурного и деформационного воздействия на одном и том же участке. Величина передаточной функции различна для изменения температуры и деформации из-за различных коэффициентов усиления (рисунок 4), что позволяет разделить паразитный температурный сигнал и полезный деформационный.

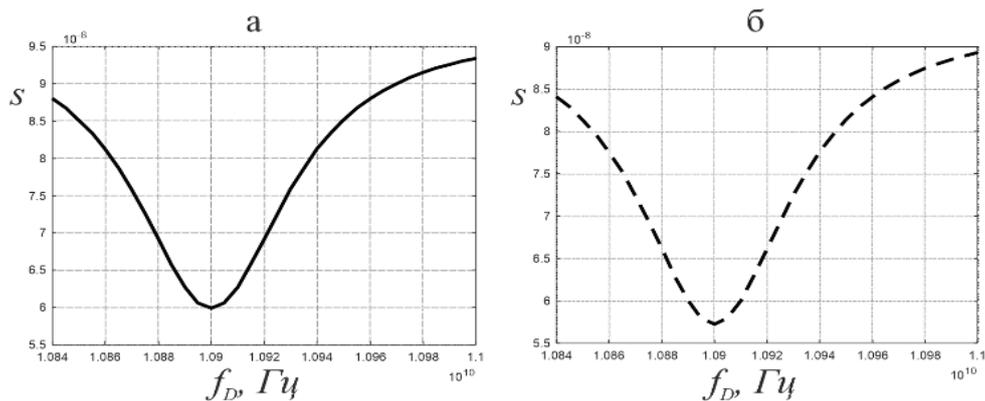


Рисунок 4 – Зависимость передаточной функции от разности частот накачки и пробного сигнала в случае деформационного (а) и температурного (б) воздействия

Проведена априорная оценка параметров измерительной системы исходя из математической модели вынужденного рассеяния Манделъштама–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 Гц 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.

#### Список литературы

1. Godolla T., Krebber K. Fibre sensors for distributed temperature and strain measurements using Brilluoin scattering and frequency-domain methods // Proceedings of SPIE. 1997. Vol. 3105. P. 168–179.
2. Янукович, Т.П., Исмаилова, А.С. Моделирование работы оптоволоконного сенсора температуры и деформации с использованием рассеяния Манделъштама-Бриллюэна // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022) : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. – Минск : БГУ, 2022. – с.257-260