

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ОПТОВОЛОКОННЫЙ СЕНСОР СИЛЫ ТОКА НА ОСНОВЕ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАММА-БРИЛЛЮЭНА

Белорусский государственный университет.
Минск, Республика Беларусь. YanukovichTP@bsu.by

Рассмотрен оптоволоконный сенсор силы тока, использующий вынужденное рассеяние Мандельштамма-Бриллюэна, позволяющий измерять как значение силы тока, так и определять участок, где измерение проводится. Приведена математическая модель работы сенсора. Проведена оценка точности и пространственного разрешения сенсора.

В различных областях электротехники находят применение оптические сенсоры силы тока и других параметров. Преимущество таких сенсоров в том, что они не подвержены шумам и наводкам, возникающим при других способах измерения электрических параметров. Применение оптических методов позволяет сделать измерение силы тока бесконтактным. Широко известны оптоволоконные сенсоры на основе применения эффекта Фарадея в оптическом волокне. Однако, они пригодны для измерения переменных и импульсных токов [1].

За последние годы большое развитие получил новый класс волоконно-оптических датчиков, в основе которого лежит явление вынужденное рассеяние Мандельштамма-Бриллюэна (ВМБР). Для повышения чувствительности и сокращения времени измерений был предложен новый метод анализа Бриллюэновского оптического частотного домена (АБОЧД) [2]. Основным достоинством этого метода является возможность измерений в узкой полосе частот, что улучшает отношение сигнал-шум и чувствительность сенсора. Другое преимущество – это возможность параллельных измерений, так что отклик системы может быть измерен при нескольких частотах модуляции одновременно. Это уменьшает общее время измерений. Увеличение отношения сигнал-шум при использовании метода АБОЧД связано с использованием обратного Фурье преобразования (ОФП). При его применении в широком интервале частот уменьшается влияние регистрируемого спонтанного рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна [3].

Характеристическая частота ВРМБ изменяется при нагреве и деформации волокна. Предлагается расположить оптическое волокно кольцами вплотную к кабелю, по которому протекает электрический ток. При нагреве за счет джоулева тепла, выделяемого в проводнике с током, температура оптического волокна изменится. Изменение температуры зафиксирует сенсор.

Схема установки для измерения методом АБОЧД представлена на рис. 1. В качестве чувствительного элемента используется одномодовое оптическое волокно длиной L . Непрерывное излучение узкополосного лазера накачки с частотой f_P и мощностью $P_P(0)$ подается на вход волокна. На выход волокна подается излучение узкополосного пробного лазера мощностью $P_S(L)$, частота которого f_S сдвинута в низкочастотную область по сравнению с частотой лазера накачки на величину характеристической частоты ВМБР f_B волокна [3]. Значение данной характеристической частоты зависит от температуры и волокна. В результате ВРМБ излучения пробного лазера в волокне возникает волна Стокса, которая распространяется противоположно распространению излучения пробного лазера.

В данном случае для определения пространственного распределения температуры или деформации используется модулированное по гармоническому закону с частотой f_m излучение пробного лазера. Модуляция интенсивности излучения пробного лазера совместно с ослаблением волны накачки будут связаны с изменением потерь в системе, а возникающая модуляция волны накачки и усиление Стоксовой волны – с усилением ВРМБ.

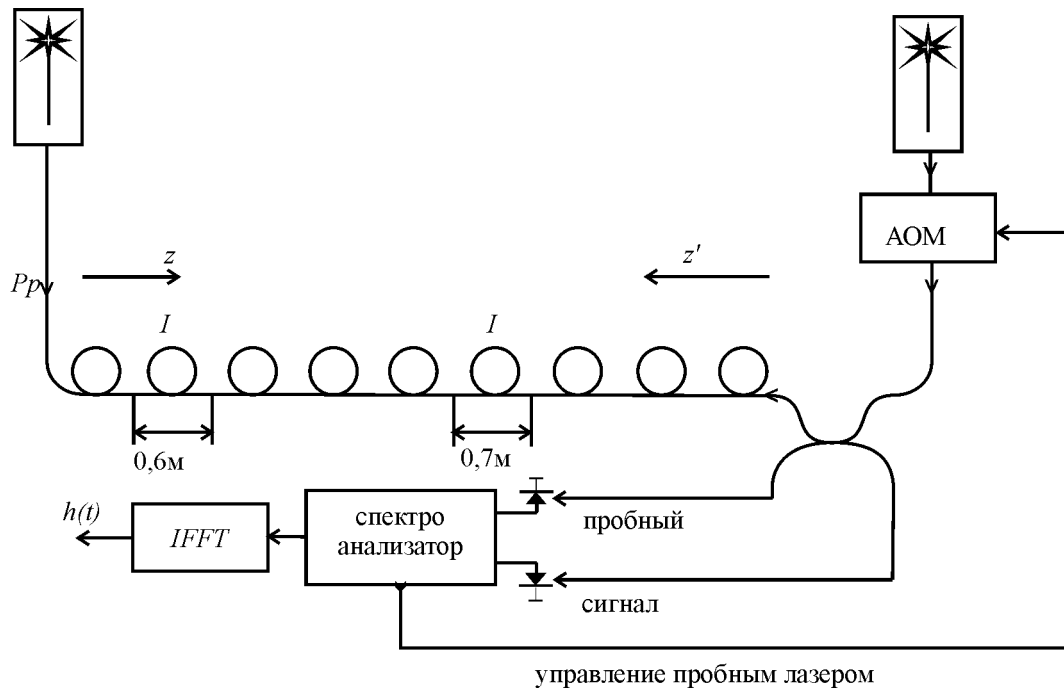


Рисунок 1 – Принципиальная схема измерительной установки методом АБОЧД

С помощью акустооптического модулятора (АОМ) излучение пробного лазера модулируется 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 температуры характеристической частотой ВРМБ на определенном отрезке волокна.

Мощность модулированного излучения пробного лазера и лазера накачки детектируется фотодиодами (ФД). Затем полученные данные с помощью математической обработки преобразуются в дискретную модуляционную передаточную функцию. Она зависит от частоты модуляции и от разности частот обоих лазеров. После ОФП этой функции, получаем зависимый от времени и разности частот импульсный отклик системы. Используя линейную связь времени и координаты, получим комплексную передаточную функцию $s(z, \Delta f)$. Она зависит от разности частот лазеров, то есть от характеристической частоты ВРМБ и от координаты Z. Зависимость от координаты позволяет определить место приложения воздействия.

При проведении численного моделирования работы оптоволоконного сенсора силы тока использовались следующие данные: сила тока измерялась в силовом кабеле с площадью поперечного сечения 16 мм², изготовленном из меди, с изоляцией из пожаробезопасного ПВХ. Для проведения измерений использовалось одномодовое оптическое волокно диаметром 125 мкм. Минимальный радиус изгиба оптического волокна позволяет расположить кольца волокна вплотную к кабелю. В модели было принято, что система теплоизолирована, то есть все джоулево тепло, выделяемое в силовом кабеле идет на нагрев самого кабеля и оптического волокна. При этом изменение температуры оптоволокна, регистрируемое с помощью сенсора, пропорционально квадрату силы тока в кабеле. Зависимость характеристической частоты ВРМБ от температуры:

$$f_B = f_{B,0} + (T - T_0) \frac{\partial f_B}{\partial T}, \quad (1)$$

где T – температура участка оптического волокна, К; $T_0 = 276$ К – температурный коэффициент; $\frac{\partial f_B}{\partial T} = 1,2$ МГц/К – температурный коэффициент характеристической частоты ВРМБ.

В модели рассматривается участок одномодового волокна длиной $L = 60$ м, с двумя участками намотанными на электропроводящие кабели. Длина первого участка составляет 0,6 м, а второго 0,7 м. В первом кабеле сила тока равна 20 А, во втором 10 А. Разность частот лазеров изменяется в пределах от 12,785 ГГц до 12,815 ГГц с шагом 1 МГц. Проводятся два измерения с разностью во времени 300 с. Разность функция отклика двух измерений пред-

ставлена на рис. 2а. Выбрав сечение этой поверхности по оси координат, получаем зависимость функции отклика от координаты (рис 2б). Из этой зависимости определяется местоположение участков оптоволокна, подверженных возмущению. Функция отклика на этих участках имеет существенный скачок. Проанализировав зависимость функции отклика от разности частот лазеров (рис. 2в), по значению частоты, на котором функция отклика достигает минимума, определяется температура оптоволокна и силу тока.

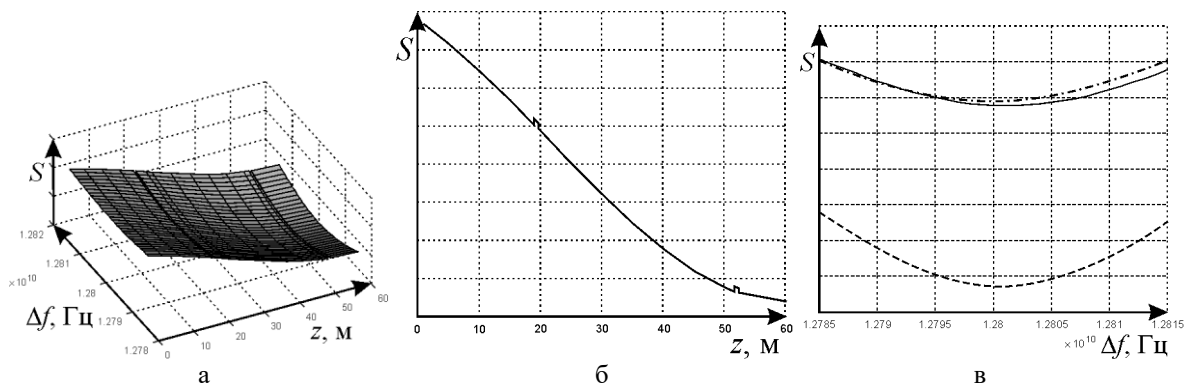


Рисунок 2 – Зависимость функции отклика S от разности частот лазеров Δf и координаты z . (_ _ _ – для невозмущенного участка оптоволокна, _ _ _ – для участка волокна, расположенного у кабеля с силой тока 20А, -- -- для участка волокна, расположенного у кабеля с силой тока 10 А)

Зависимость силы тока от температуры при описанных параметрах системы:

$$I = c \sqrt{\frac{T}{t}}, \quad (2)$$

где I – сила тока, А; c – коэффициент, зависящий от параметров токопровода и его изоляции, t – время измерения, с.

Построенная модель позволяет получить наглядное представление о работе сенсора и рассчитать параметры всех элементов измерительной установки. Проведенные расчёты показывают, что методом АБОЧД можно измерять большие значения сил токов (до 100 А). Однако при частоте перестройки лазера 1 МГц, точность проведенных измерений будет невысока. Для повышения точности, необходима перестраивать частоту лазера в диапазоне от 1,28 до 1,281 ГГц с дискретизацией 1 кГц. В таком случае будет получена точность измерений 0,6 А.

Список литературы:

1. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brandle – Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor // J. Lightwave Technology. 2002, Vol. 20, pp. 267-276.
2. Horigochi T., Tateda M. BOTDA – Nondestructive measurement of single mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory // J. Lightwave Technology. 1989. Vol. 7, № 8. P. 1170–1176.
3. Godolla T., Krebber K. Fibre sensors for distributed temperature and strain measurements using Brillouin scattering and frequency-domain methods // Proceedings of SPIE. 1997. Vol. 3105. P. 168–179.
4. Steady and relaxation oscillation of stimulated Brillouin scattering in single-mode optical fiber. I. Bar-Josef, A. A. Friesem, E. Lichtman, R. Waarts // J. Opt. Soc. Am. 1985. Vol. 2, № 10. P. 1606–1611.