

Волоконно-оптический распределенный датчик силы тока

Т.П. Янукович¹, А.В. Поляков¹, М.А. Ксенофонтов²

¹ Белорусский государственный университет, Минск

² Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко

Белорусского государственного университета, Минск

E-mail: YanukovichTP@bsu.by

В связи с развитием систем автоматизации и контроля большой интерес вызывают методы и приборы для измерения основных параметров электрических генерирующих, транспортирующих и потребляющих устройств. В металлургии и электрохимической промышленности электродуговые, индукционные и печи сопротивления работают при напряжениях до 1000 В и потребляют ток до нескольких сот килоампер. При внедрении оптимизированных процессов предприятия могут экономить электроэнергию и контролировать фактический ее расход, а значит, с большей точностью управлять процессами производства.

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 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 величину воздействующей величины, но и ее местоположение.

Предложена схема распределенного оптоволоконного датчика силы тока, использующего ВРМБ [1–3]. 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. В качестве источника излучения в установке используется 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 левой стороны чувствительного оптического волокна, имеющего координату $z = 0$. Второй поток направляется на аттенюатор, где его мощность ослабляется в 10 раз. Затем с помощью электрооптического модулятора частота излучения сдвигается на величину Δf 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 является переменной. Затем излучение модулируется с помощью акустооптического модулятора по гармоническому закону в пределах от 10 Гц до 80 МГц. Полученное таким образом излучение называется пробным и вводится с правой стороны чувствительного оптического волокна с координатой $z = L$. Мощность модулированного пробного излучения и излучения накачки детектируется фотодиодами. Детектированный сигнал поступает на спектроанализатор и обрабатывается дифференциальным методом, где в качестве опорного используется сигнал пробного излучения. Затем в блоке обработки информации полученный спектр преобразуется с помощью обратного Фурье преобразования сигнала, зависящего от частоты модуляции пробного излучения и разности частот лазера. Анализируя полученную комплексную передаточную функцию $s(z, \Delta f)$, зависящую от координаты и разности частот лазеров, можно определить величину тока в токоведущей шине и координату этой шины.

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 $\Delta f = 12,8$ ГГц. Такая разность частот соответствует характеристической частоте ВРМБ для недеформированного волокна. Если в волокне наблюдаются участки с деформацией, то передаточная функция будет иметь скачкообразные увеличения значения. Такие изменения в передаточной функции говорят о том, что на этих участках волокна не происходит ослабление сигнала в результате ВРМБ и на этих участках изменяется характеристическая частота ВРМБ. После выявления участков с измененной характеристической частотой, производится анализ зависимости передаточной функции от разности частот лазеров Δf . Минимум передаточной функции будет соответствовать разности ча-

стот, на которой наблюдалось максимальное рассеяние в данном участке волокна. Именно это значение разности частот будет соответствовать характеристической частоте ВРМБ на данном участке и позволит вычислить значение измеряемого тока.

Таким образом, разработана схема датчика силы тока на основе деформации оптического волокна. Для проведения измерений используется 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. ВРМБ 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 используется метод анализа бриллюэновского оптического частотного домена (АБОЧД). Приведена математическая модель работы сенсора на основе трехволновой модели ВРМБ. Данная модель позволяет найти изменение интенсивности оптического сигнала, проходящего по оптическому волокну, в зависимости от изменения характеристической частоты ВРМБ. Метод АБОЧД использует обратное Фурье-преобразование для построения функции импульсного отклика. Это позволяет избежать ошибок, связанных с появлением спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне. Исследованы пути уменьшения зависимости полученного результата от нагрева измерительного волокна. Пространственное разрешение сенсора при определении длины и местоположения участков волокна не превышает 0,06 м. Разрешающая способность сенсора составляет 0,22 кА, максимальное измеренное значение силы тока 25 кА. 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 измерений.

1. Янукович Т.П., Поляков А.В. // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 3. С. 243–252.
2. Янукович Т.П., Поляков А.В. // Современные тенденции развития науки и производства: Матер. IX Межд. науч.-практ. конф. Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2018. С. 17–20.
3. Янукович Т.П., Поляков А.В. // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: Матер. V Межд. науч.-практ. конф. Мн.: НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, 2019. С. 119–121.