

ТЕХНИКА ИНТЕРРОГАЦИИ СЕНСОРОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ SMART GRID PLUS

И.И. Нуреев¹, Р.Ш. Мисбахов²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,

Российская Федерация, 420011, г. Казань, К. Маркса, 10

²Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, 420066, г. Казань, Красносельская, 51

Аннотация. В статье перед авторами стоит цель решения задач интеллектуальной электроэнергетики, в частности, внедрение разработанных за последние пять лет на кафедре РФМТ программно-аппаратных средств и устройств с улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками для интерроргации сенсоров электрических сетей, а также объектовых сетей связи интеллектуальных электрических сетей и сенсорного мониторинга их эксплуатационных параметров, построенных на основе концепции «Smart Grid Plus (SGP)», по сравнению с известными системами, не использующими для построения указанную концепцию и/или радиофотонный адресный подход на основе многоадресных волоконных брэгговских структур (МАВБС).

Ключевые слова: SMART GRID PLUS, интерроргатор, комплексированный волоконно-оптический датчик (КВОД), пассивная оптическая сеть (ПОС), многоадресная волоконная брэгговская структура (МАВБС),

Введение

Тенденцией развития технологии и систем технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электрооборудования в электросетевом комплексе является переход на его ремонт и обслуживание *по состоянию*, когда объемы и сроки ТОиР определяются на основании систематического контроля технического состояния оборудования.

По имеющимся данным из опыта внедрения подобных систем в других областях техники, межремонтный интервал оборудования может увеличиваться в 1,2 – 1,6 раза, а объемы среднего и капитального ремонта могут сократиться на 40-50%. Согласно данным Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) около 30-50% электрооборудования может эксплуатироваться при меньшем объеме техобслуживания (при возможности замены полного обслуживания на текущее).

По итогам функционирования объектов электроэнергетики, МинЭнерго РФ отнесло в основную зону риска оборудование подстанций, риск повышения аварийности на которых обусловлен непроведением технического освидетельствования по истечении установленного нормативного срока службы оборудования. Учитывая процент физического износа, доля оборудования, которое экономически целесообразно переводить на обслуживание *по состоянию*, составляет более 60%.

Региональная электросетевая компания тратит на ТОиР в среднем до полумиллиарда рублей в год. Таким образом, потенциал экономии ОРЕХ, за счет перехода на ТОиР *по состоянию*, в отдельной региональной сетевой компании можно оценить до 400 млн. рублей в год. Объем финансирования ремонтной программы ПАО «Россети» в 2018 году составил порядка 64 млрд. рублей. Таким образом, потенциал экономии ОРЕХ, за счет перехода на ТОиР *по состоянию*, в ПАО «Россети» можно оценить до 25 млрд. рублей в год.

Системы мониторинга сетевого оборудования в режиме реального времени являются неотъемлемой частью наиболее эффективных АСУ ТОиР *по состоянию* (Системы

управления активами – ЕАМ, или соответствующие модули ERP). В таких системах с помощью установленных на оборудовании измерителей (более точно) и/или экспертным путем проводится оценка его состояния, строится прогноз о выводе данного оборудования в ремонт. Незапланированный труд в 2 раза дороже плановых работ.

Обслуживание *по событию* (при авариях и ненормальных режимах) характеризуется низким коэффициентом готовности и применяется только в случае низкой стоимости активов и не высоких предъявляемых требований по надежности (не для высоковольтной энергетики).

Основные эффекты инструментальной АСУ ТОиР:

- оптимизация графиков техобслуживания и повышение производительности труда (уменьшение стоимости владения);
- высокий коэффициент готовности обслуживаемого оборудования (увеличение времени безотказной работы);
- избежание незапланированных отключений (недопоставки э/энергии);
- профилактика электротравматизма.

Экономический эффект от внедрения инструментальной АСУ ТОиР по данным компании АВВ может быть достигнут за счет:

- продления сроков службы оборудования;
- оптимизации обслуживания (в т.ч. расходов на ТОиР);
- прогноза состояния оборудования;
- уменьшения производственных потерь.

Как будет видно из статьи, большая часть разработанных радиофотонных адресных сенсорных сетей (РФАСС) на основе МАВБС созданы для реализации систем технической диагностики и контроля.

Сочетание различных оптических технологий и их совместное применение в электросетях позволяет получать достоверную информацию для мониторинга протяженных электросетей. Эта тенденция развития интеллектуальных энергосистем основана на концепции SGP [1-4], а сами системы используют полностью оптические комбинированные технологии распределенных и точечных измерений, объединенных специализированными OPPC/OPGW и OFCPC кабелями, которые служат для передачи энергии, телекоммуникационных данных и являются основным чувствительным элементом слоя диагностического мониторинга. Развитие комбинированных оптических кабелей с встроенным в них ТАВБС или брэгговских структур другого типа позволяют определить направления дальнейших исследований по затронутой тематике. При этом последний фактор может позволить принципиально исключить из структуры слоя диагностики подстанции большой объем контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), поскольку информация, которую они представляли, снимается с РФАСС на МАВБС [5-9], использующих OPPC/OPGW и OFCPC, кабелями. Представленные в статье устройства являются базовыми элементами обобщенных схем интеллектуальных систем диагностики для раннего предупреждения аварий, основанных на полностью оптических технологиях и полностью соответствующих концепции SGP. Все разработанные устройства защищены либо патентами РФ, либо пионерскими публикациями в ведущих мировых изданиях, либо коммерческими соглашениями с предприятиями-заказчиками.

1. Радиофотонный интерроргатор

Как отмечалось в [7-9] радиофотонный интерроргатор (РФИ) строится по схеме с наклонным фильтром и опорным фотоприемником. Его структура представлена на рис. 1. Широкополосный источник формирует излучение, соответствующее диапазону измерений, которое поступает на несколько МАВБС Зλ-ВБР или Зπ-ВБР типов [10, 11] (на рис. 1 не показано).

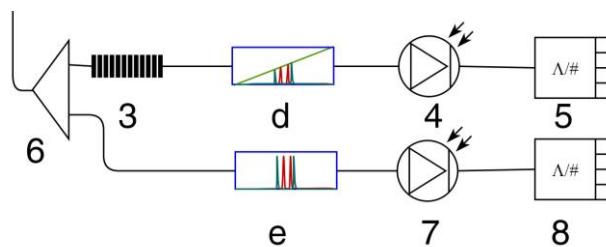


Рис. 1. Функциональная схема радиофотонного интерропратора:

3 – линейный наклонный фильтр; 4 – измерительный фотоприемник; 5 – измерительный АЦП; 6 – оптический разветвитель; 7 – опорный фотоприемник; 8 – опорный АЦП. Буквами d и e на рисунке схематично приведены спектральные характеристики оптических сигналов после наклонного фильтра и на выходе МАВБС соответственно

Каждая из МАВБС, например, трехадресная, формирует трехчастотное излучение, которое суммируется в одно общее излучение и поступает на оптический разветвитель 6, на выходе которого в опорном канале получаем многочастотное лазерное излучение (диаграмма e).

Многочастотное излучение проходит и через верхнюю ветвь оптоволоконного разветвителя 6 и поступает в измерительный канал. В измерительном канале установлен фильтр 3 с наклонной линейной характеристикой модифицирующий амплитуды многочастотного излучения в асимметричное излучение (диаграмма d), после чего сигнал поступает на измерительный фотоприемник 4 и принимается на измерительный АЦП 5. Сигнал с АЦП 5 методом частотной (аналоговой или цифровой) фильтрации служит для определения положения АВБС. В опорном канале сигнал (диаграмма e) поступает на опорный фотоприемник контроля мощности входного оптического сигнала 7 и принимается на опорный АЦП 8. Все дальнейшие вычисления идут с отношением мощностей в измерительном и опорном каналах. Требования, которые определены к РФИ и которые могут существенно отличаться по значениям для различных задач, позволили нам определить два главных из них к оптической части: рабочий диапазон длин волн 1550 нм с шириной полосы излучения до 3 нм и ширину полосы пропускания фотоприемника до 10-40 ГГц.

В качестве фотоприемника нами был выбран фотоприемник PR-30-A от Optilab (рис. 2).

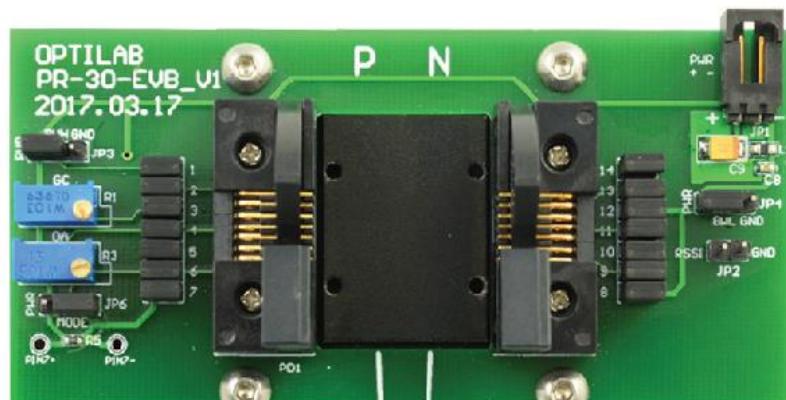


Рис. 2. Фотоприемник, закрепленный на плате

Он представляет собой линейный фотоприемник с полосой пропускания до 30 ГГц. В 14-контактном mini-DIL-корпусе (корпус с двурядным расположением выводов), фотоприемник PR-30-A содержит поверхностно-связанный копланарный волноводный PIN-фотодиод и линейный трансимпедансный усилитель (TIA). Фотоприемник может работать как

в режиме ручного управления усиливанием (MGC), так и в режиме автоматического регулирования усиления (AGC). Он обладает дифференциальным коэффициентом усиления преобразования до 2000 В/Вт. Диапазон пропускания PR-30-A может быть увеличен до 35 ГГц. В AGC режиме усиления коэффициент усиления автоматически настраивается для обеспечения постоянного дифференциального выходного напряжения до 1800 мВ. Высокий коэффициент преобразования и низкий входной шум делают этот линейный приемник хорошо подходящим как для высокоскоростных аналоговых приложений, так и цифровых приложений, требующих высоколинейного отклика, например, QAM-16.

В качестве лазерного диода был выбран лазерный диод Фабри-Перо LD-FP-1550 (рис. 3).

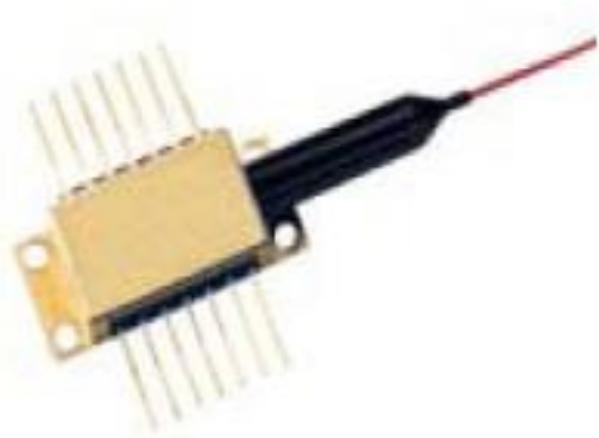


Рис. 3. Лазерный диод LD-FP-1550

Он представляет собой высокоэффективный лазерный диод типа Фабри-Перо (FP) от Optilab с центральной длиной волны 1550 нм и шириной полосы 5 нм. Диод предназначен для лабораторных исследований, требующих небольшого когерентного источника. Чип st-MQW лазерного диода интегрирован вместе с термоэлектрическим охладителем (TEC) и PIN фотодиодом в экономически выгодный герметичный 14-контактный корпус типа «бабочка». LD-FP-1550 оснащен температурным датчиком (заземленным термистором) и внешним оптическим изолятором, который соединен с одномодовым оптоволокном.

Ключевые особенности:

- длина волны 1550 нм;
- выходная мощность до 20 мВт;
- 14-ти контактный корпус «бабочка»;
- TEC охладитель + термистор;
- встроенный фотодиод для мониторинга;
- внешний оптический изолятор.

Для работы в полевых условиях необходим более стабильный ЛД с диапазоном температур по нижнему пределу меньше -20°C . Выбор указанного диода для проведенных исследований и внедренных систем достаточен, поскольку оптическая часть РФИ устанавливается в специальном помещении с поддерживаемой температурой.

Общая конструкция РФИ с учетом функциональной электроники и коммутационных волокон показана на рис. 4.

Как видно из рис. 4, в корпусе дополнительно установлен интерроргатор I-MON, использованный для контроля и сравнения результатов измерений.

РФИ состоит из следующих узлов:

- 1) оптоэлектронный модуль радиофотонного типа (ОМ);

- 2) кросс-1 (KP1) (для коммутации оптоэлектронного модуля с датчиками через волоконно-оптический кабель;
- 3) кросс-2 (KP2) (для разветвления волоконно-оптического кабеля на 24 канала подключения датчиков);
- 4) Волоконно-оптический кабель (ВОК), соединяющий KP1 и KP2;
- 5) Патч-корды для соединения KP2 и КВОД.

РФИ может применяться в составе систем энергоснабжения, управления и автоматики на предприятиях промышленности и энергетики (КРУ, НКУ, выключателях, трансформаторах, двигателях, турбинах, силовых кабелях и т.п.).

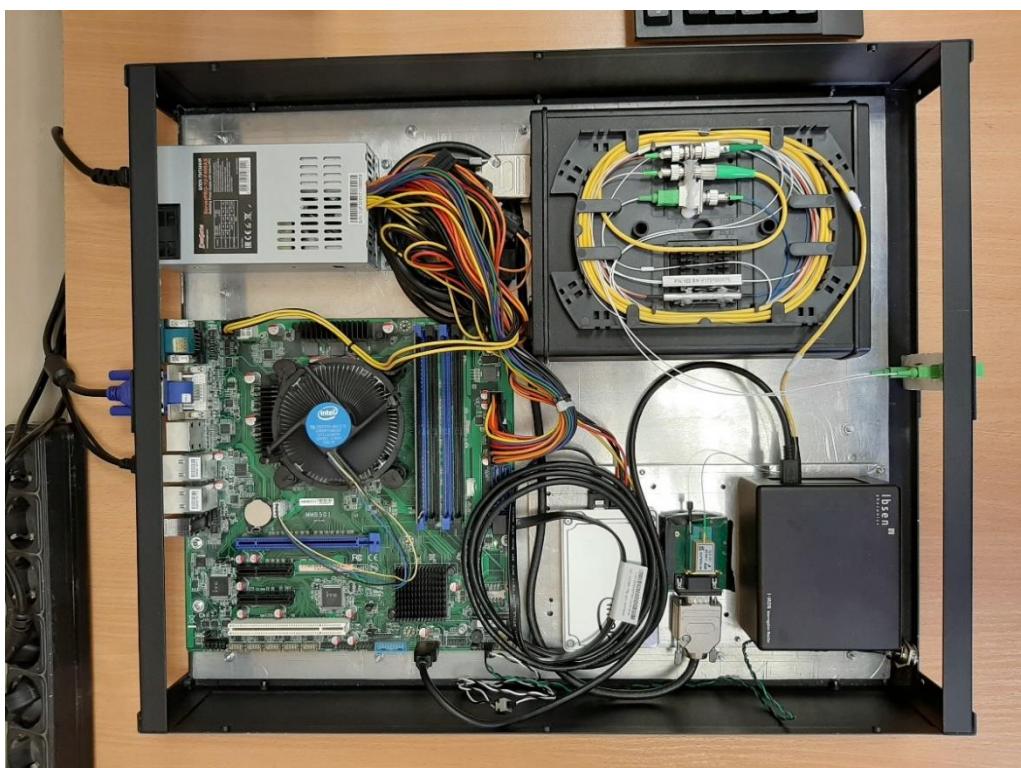


Рис. 4. Радиофотонный интерроргатор

КВОД на МАВБС, не входящие в комплект РФИ, состоят из электрически не проводящих материалов, что позволяет использовать их, например, в местах с высоким напряжением. Они изготовлены в корпусах, которые не подвержены коррозии, сами КВОД также не подвержены электромагнитным помехам и не электризуют другие устройства. Могут безопасно использоваться во взрывоопасной среде без риска возникновения электрической искры даже в случае поломки. Датчики имеют высокую точность и, в зависимости от типа защитных свойств кабеля стекловолокна, широкий диапазон рабочих температур от -60 до +300 °C. При необходимости, возможно объединение большого числа датчиков (мультиплексирование) в одну измерительную сеть с расположением измерительного модуля на расстоянии до 10-30 км.

Преимущества КВОД на основе МАВБС перед КВОД на основе классических ВБР показаны в [12-16].

На рис. 5 представлена передняя панель РФИ с расположенными рядом КВОД на основе МАВБС.

На рис. 6 представлена задняя панель РФИ.



Рис. 5. Передняя панель РFI



Рис. 6. Задняя панель РFI

Монтаж РFI производится в стандартную стойку для коммуникационного оборудования шириной 19". Монтаж кросса 1 КР1 производится в стандартную стойку для коммуникационного оборудования шириной 19". При монтаже КР1 следует расположить с учетом обеспечения подключения к РFI с использованием патч-кордов и обеспечения монтажа ВОК. Монтаж кросса 2 КР2 производится в стандартную стойку для коммуникационного оборудования шириной 19".

При монтаже КР2 следует расположить с учетом обеспечения подключения ВОД с использованием патч-кордов и обеспечения монтажа ВОК. КВОД монтировать на объект измерения с использованием болтового соединения М8.

Для подготовки РFI к работе выполняются следующие подключения:

- произвести установку и монтаж ВОК в соответствии со схемой;
- подключить оптические вилки SC/APC (оптическая вилка- это разъемный оптический соединитель, состоящий из корпуса оптической вилки и вмонтированного в него отрезка оптического кабеля) патч-кордов к оптическим разъемам КР2 и КВОД в соответствии со схемой проекта и маркировкой КВОД и патч-кордов;
- подключить оптические вилки FC-SC/APC патч-кордов к оптическим разъемам РFI и КР1 в соответствии со схемой проекта и маркировкой РFI и КР1;
- присоединить телекоммуникационный разъем РFI к ЛВС через порт Ethernet, стандартное подключение подразумевает подключение системы в маршрутизатор ЛВС;
- подключить кабель питания (при выключенном РFI).

2. Интерфейс подключения КВОД МАВБС к внутриобъектовой ПОС GPON

Разработка интерфейса связи для подключения КВОД МАВБС к пассивной оптической внутриобъектовой системе связи на базе технологии GPON с возможностью дальнейшей передачи информации к диспетчеру проводились на подстанции «Центр» НЧЭС – филиал ОАО «Сетевая компания» [17-19].

Интерфейс разработан как контроллер присоединения к ПОС с возможностью интеграции SFP ONU GPON модуля (преобразователь измерительный многофункциональный ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON) (рис. 7). По объектовой сети обеспечивалась его оптическая связь с РФИ и для контроля работоспособности с ОЭИ I-BSEN.

Оба интерроратора подключаются к опытной пассивной внутриобъектовой системе связи через оптический сплиттер.



Рис. 7. Контроллер ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON

Интеграция трансивера SFP ONU GPON в контроллер осуществляется посредством объединения платы SGMII-интерфейса с поддержкой технологии GPON с платой контроллера присоединений ЭНИП-2.

На рис. 8 представлена функциональная схема ЭНИП-2 в режиме преобразования информации с электронных датчиков, кодирования их в оптический сигнал и передачу по протоколу Ethernet в КИТ GPON. Информация с электронных датчиков подводится к отдельному SFP ONU GPON.

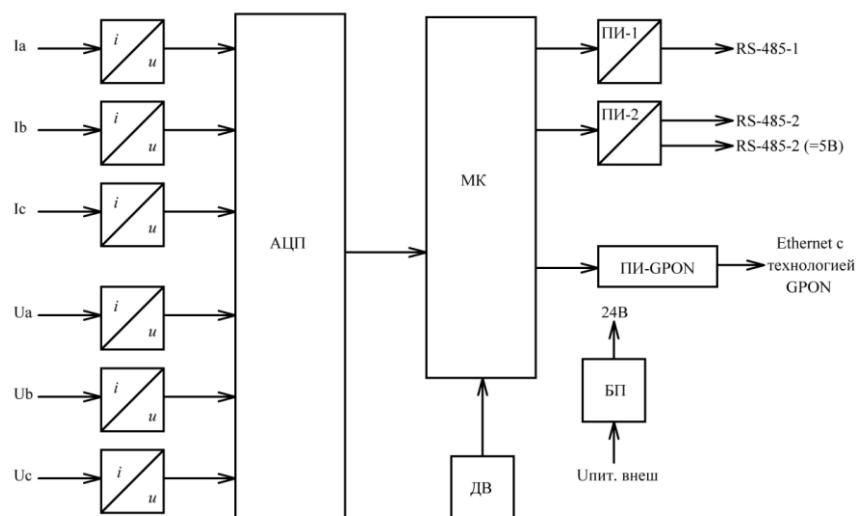


Рис. 8. Функциональная схема ЭНИП-2: ПИ - преобразователь интерфейса RS-485, ПИ-GPON – преобразователь интерфейса SGMII/Ethernet

В качестве приемо-передатчика GPON был выбран трансивер с встроенным SGMII интерфейсом типа D-Link DPN-100.

Структурная схема платы ЭНИП-2 с поддержкой GPON представлена на рис. 9. Она создана на основе микроконтроллера TI AM3359 фирмы Texas Instruments и преобразователя MAX24287 – конвертера последовательного интерфейса в параллельный от фирмы Microsemi.

На базе полученных решений были разработаны и изготовлены опытные образцы модернизированного многофункционального контроллера ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON и, соответствующие платы со слотами для установки SFP xPON модулей (рис. 10).

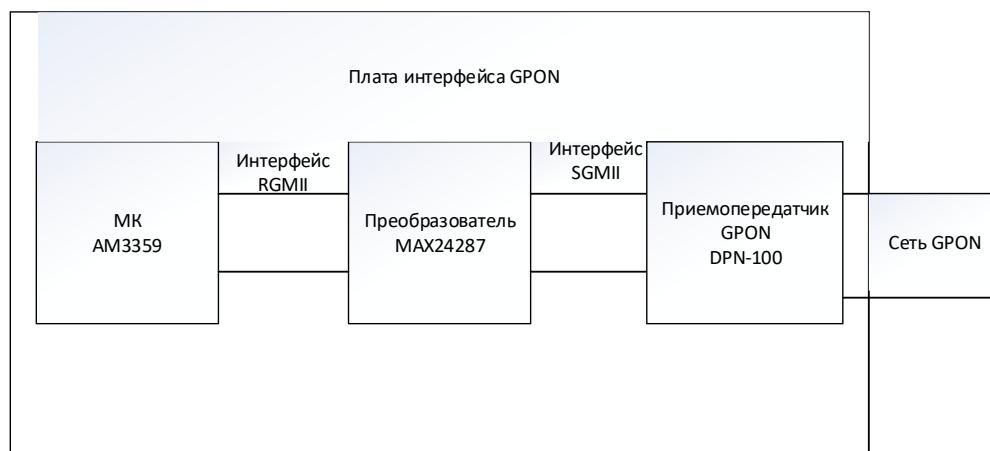


Рис. 9. Плата интерфейса ЭНИП-2, подключаемого к GPON

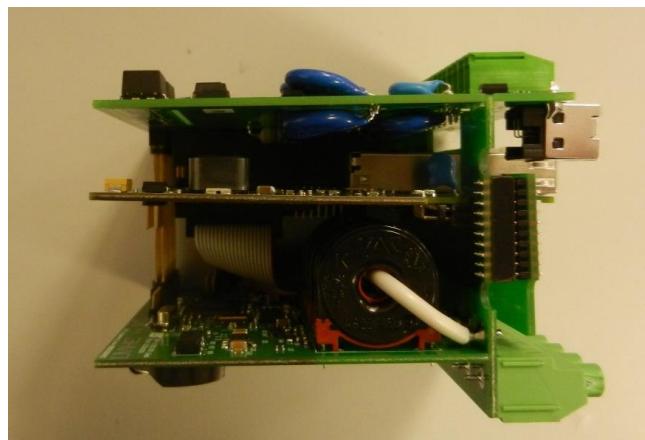


Рис. 10. Внутренние платы модернизированного контроллера ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON (вид сбоку)

Контроллер ЭНИП-2-45/100-220-A2E4SFP-21 с поддержкой технологии GPON, показанный на рис. 11, был выполнен в литом корпусе из пластмассы, не поддерживающей горение.

На рис. 12 представлена схема соединений и подключений электронных и оптических датчиков к ЭНИП-2 для дальнейшей передачи на OLT.

В качестве коммутатора (OLT) был выбран станционный терминал GPON OLT LTP-4X производства отечественной компании Eltex (рис. 13). Он имеет четыре порта PON, ис-

полнение 1U, а также позволяет реализовывать удаленное управление посредством протоколов CLI, SNMP. К каждому интерфейсу можно подключить до 128 абонентских оптических терминалов (ONU) по одному волокну.



Рис. 11. Общий вид контроллера ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON со вставленным SFP GPON/EPON ONT модулем

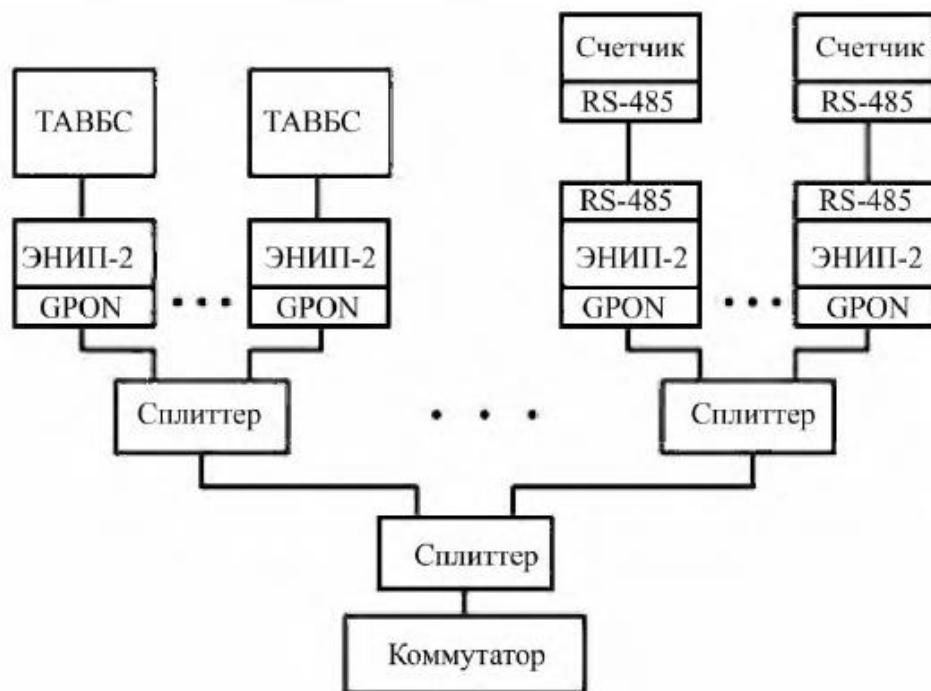


Рис. 12. Схема соединений и подключений контроллеров ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON



Рис. 13. GPON OLT LTP-4X Eltex

Выход в магистральную сеть реализуется посредством 10 Gigabit или комбинированных Gigabit uplink интерфейсов [20].

Для стеновых испытаний использовался оптический сплавной (FTB) разветвитель в пластиковом корпусе (рис. 14), предназначенный для ответвления оптической мощности в пассивных оптических сетях (PON), контрольно-измерительном оборудовании, в локальных сетях, и телекоммуникациях.



Рис. 14. Оптический сплавной разветвитель в пластиковом корпусе

Выбранный оптический сплиттер имеет 3 ответвления с одинаковым процентным соотношением деления мощности. Оптический сплиттер оптимизирован для работы в трех окнах прозрачности оптического волокна (1310, 1450 или 1550 нм) в сетях WDM.

На рис. 15 представлен экспериментальный стенд для проведения испытаний ССПИ на базе контроллеров присоединения ЭНИП-2, содержащий все указанные выше элементы (рис. 12). Структура экспериментального стенда показана на рис. 16.

На стенде проверялись:

- возможность удаленного считывания показаний счетчика: в качестве испытуемого счетчика использовался Меркурий 230, как наиболее часто используемый для учета электроэнергии на отходящих линиях КРУ 6-35 кВ и волоконно-оптический датчик температуры, обработка информации с которого проводилась в РИ, установленном на OLT;
- проверка информационного обмена между ЭНИП-2 и ПК, а также работоспособности системы в целом с использованием установки УППУ-МЭ 3.1;
- проверка работы передачи результатов измерений от контроллеров ЭНИП-2 по протоколу ГОСТ Р МЭК 60870-5-104 (Modbus TCP) в ПО «Modbus Poll»;
- опрос ЭНИП-2 с помощью модуля ЭНКС-3м по протоколу ГОСТ Р МЭК 60870-5-

101 (UDP). Проверка результатов измерения проводилась в ПО «Конфигуратор ЭНКС»;
- синхронизация по протоколам ГОСТ Р МЭК 60870-5-101 и 104.



Рис. 15. Стенд экспериментальный для проверки и калибровки интерфейса КИТ

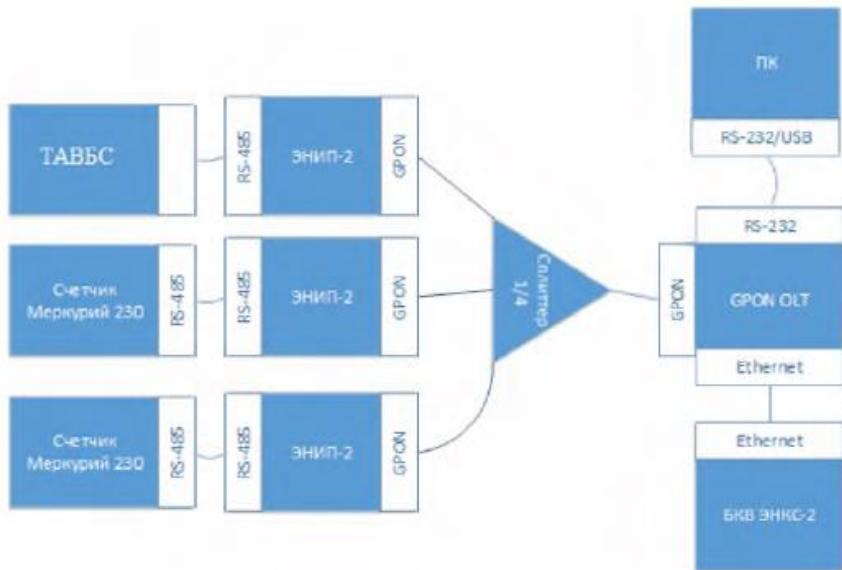


Рис. 16. Структурная схема экспериментального стенда КИТ GPON

Получены положительные результаты тестов.

3. Оптико-электронный блок интерроргации ВОД диапазона 850 нм

Для регистрации и обработки сигналов с совмещенного волоконно-оптического датчика давления и температуры на ВБР был разработан оптико-электронный блок интерроргации ВОД в диапазоне 850 нм [21-23]. За основу разрабатываемого блока была взята оптическая схема спектрографа типа Эберта-Фасти. В такой схеме разложение излучения в спектр обеспечивается за счет использования плоской дифракционной решетки, установленной в параллельном пучке лучей. В отличие от классической схемы для упрощения кон-

структурки и облегчения юстировки предложено заменить зеркальные коллимирующий и камерный объективы линзовыми. Общий вид разработанной оптической схемы представлен на рис. 17.

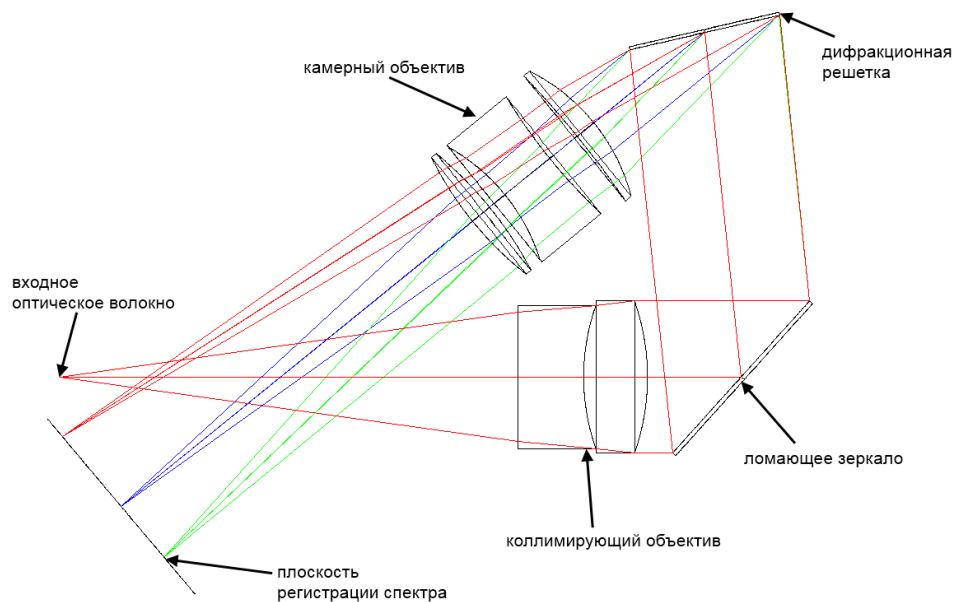


Рис. 17. Оптическая схема оптико-электронного блока

Была проведена оценка качества изображения оптической системы. Для демонстрации достигаемого пространственного разрешения приведены точечные диаграммы спектрографа (рис. 18) и его аппаратные функции для диаметра входного волокна 5 мкм (рис. 19).

Они позволяют оценить спектральное разрешение при использовании широкополосного источника излучения. При измерении смещения лазерной линии излучения реальное спектральное разрешение зависит от способа интерполяции данных измерений.

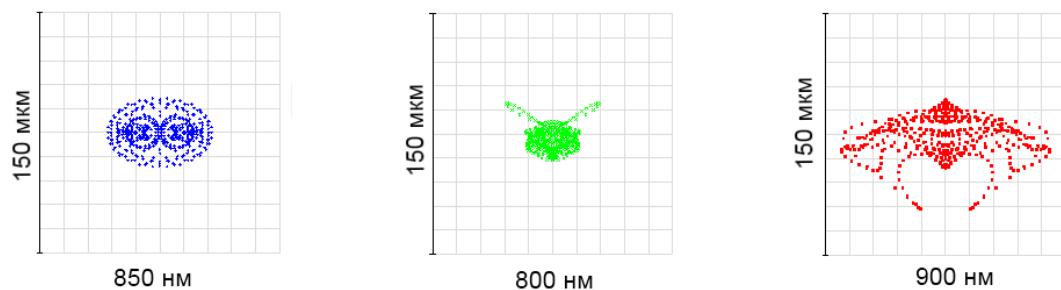


Рис. 18. Точечные диаграммы спектрографа

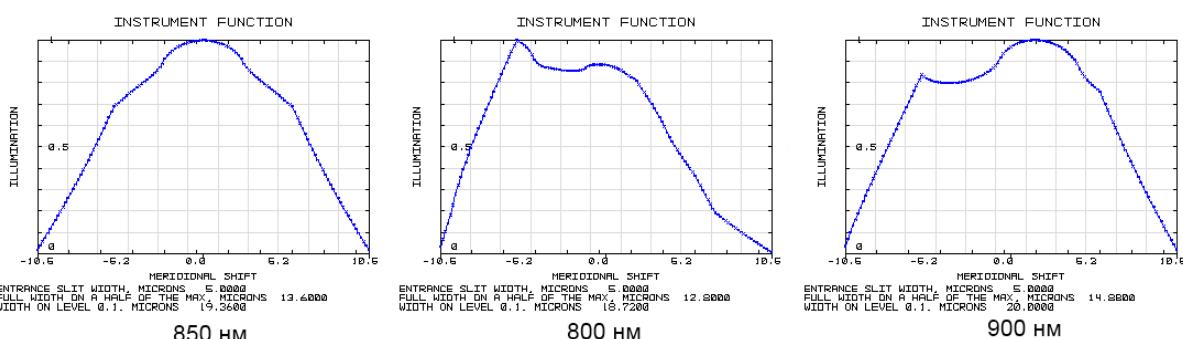


Рис. 19. Аппаратные функции спектрографа

Как следует из графиков, пространственный предел разрешения спектрографа составляет 12,6-14 мкм (при измерении по уровню 0,5). Результаты макетирования подобных схем показали, что при переходе к лазерному источнику излучения такого предела разрешения достаточно для обеспечения спектрального разрешения порядка 2-3 пм.

Предложена следующая конструктивная реализация разработанной оптической схемы (рис. 20). Все элементы схемы монтируются в общем корпусе 9 (показан в разрезе), изготавливаемом на высокоточном оборудовании и обеспечивающем взаимное позиционирование элементов. Входное оптическое волокно фиксируется во фланце 1 с помощью стандартного FC-разъема. Объектив-склейка 2 устанавливается в посадочное место, расточенное непосредственно в корпусе 9 и прижимается кольцом (не показано). Ломающее зеркало 4 крепится к корпусу на внешнем фланце 3. Юстировка его положения обеспечивается подрезкой посадочной поверхности фланца. Аналогичным образом устанавливается дифракционная решетка 6. При этом посадочное место во фланце 5 выполнено под углом, что обеспечивает выполнение расчетного угла падения излучения на решетку.

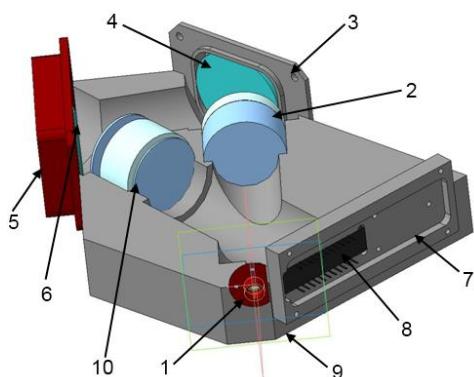


Рис. 20. Общий вид конструкции оптико-механического блока

Камерный объектив 10 также монтируется непосредственно внутри корпуса и фиксируется прижимным кольцом. Воздушные промежутки между линзами обеспечиваются с помощью распорных колец. Их толщина может быть подобрана при юстировке объектива вне корпуса (на оптической скамье или в корпусе-дубльере). Фланец 7 располагается на боковой грани корпуса 9 и служит для установки ПЗС-линейки 8, а также платы регистрации и первичной обработки сигнала (не показана). Предложенный поход к конструктивной реализации блока позволит сократить до минимума число сложных механических деталей, обеспечит минимальные габариты блока, удобство его сборки и юстировки.

Внешний вид разработанного устройства опроса ВБР представлен на рис. 21.



Рис. 21. Внешний вид разработанного устройства опроса ВБР

Заключение

1. Разработана элементно-модульная база для создания РФАСС на основе МАВС для решения задач интеллектуальной энергетики. Она представлена модельным рядом радиофотонных интерропаторов, оптических измерительных преобразователей – интерфейсов связи КВОД с КИТ. Элементно-модульная база внедрена на НЧЭС (Набережные Челны).

2. Разработаны системы мониторинга температуры элементов коммутации и токоведущих шин, содержащие в составе комплексированные датчики давления на базе ВБР. Для их интерропации разработан ОЭИ диапазона 850 нм, выигрывающий по габаритам и стоимости у аналогичных интерропаторов диапазона 1550 нм.

3. Данные устройства являются основой для создания РФАСС интеллектуальной энергетики любого назначения.

Список литературы

1. *Maskevich, K.V.* Fiber optic technologies for diagnostic monitoring of digital energy grids based on 'Smart Grids Plus' concept / K.V. Maskevich, Rin.Sh. Misbakhov, O.G. Morozov // Proc. of International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. - 2018. - P. 8501617. - DOI:10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501617.
2. *Маскевич, К.В.* Волоконно-оптическая парадигма диагностического мониторинга цифровой энергетики. Основа концепции «Smart Grids Plus» / К.В. Маскевич, Рин.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, И.И. Нуриев, А.Ж. Сахабутдинов // Фотон-экспресс. - 2018. - № 4. - С. 18 - 25.
3. *Maskevich, K.* Point and quasi-distributed monitoring of digital electric power grids based on addressable fiber optic technologies / K.V. Maskevich, Rin.Sh. Misbakhov, O.G. Morozov, A.Z. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, A.A. Kuznetsov, L.M. Fashkutdinov, K.A. Lipatnikov, G.A. Morozov, L.M. Sarvarova, A.A. Tyazhelova // Proc. of SPIE. - 2019. - Vol. 11146. - P. 111461R. - DOI: 10.1117/12.2527561.
4. *Мисбахов, Рин.Ш.* Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок / Рин.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв и др. // Проблемы энергетики. 2018. - Т. 20. - № 11-12. - С. 16 - 26.
5. *Мисбахов, Рин.Ш.* Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Рин.Ш. Мисбахов, Рин.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // Инженерный вестник Дона. - 2017. - Т. 46. - № 3 (46). - С. 24.
6. *Морозов, О.Г.* Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - № 4. - С. 535 - 543.
7. *Morozov, O.* Multi-addressed fiber bragg structures for microwave photonic sensor systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov, R. Misbakhov, A. Kuznetsov, T. Agliullin // Sensors. - 2020. - Vol. 20. - № 9. - P. 2693. - DOI: 10.3390/s20092693.
8. *Аглиуллин, Т.А.* Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Рин.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6. - № 1. - С. 6 - 13. - DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-1-6-13.
9. *Misbakhov, Rin.Sh.* A concept of microwave photonic sensor systems based on three component addressed fiber Bragg gratings / Rin.Sh. Misbakhov // Proc. SPIE. - Vol. 11516.- P. 15160S.
10. *Morozov, O.G.* Modelling and record technologies of address fibre Bragg structures based on two identical ultra-narrow gratings with different central wavelengths / O.G. Morozov, A.Zh.

- Sakhabutdinov, I.I. Nureev, Rin.Sh. Misbakhov // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - Vol. 1368. - P. 022049. - DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022049.
11. Morozov, O.G. Modelling and record technologies of address fibre Bragg structures based on gratings with two symmetrical pi-phase shifts / O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, Rin.Sh. Misbakhov // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - Vol. 1368. - P. 022048. - DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022048.
12. Мисбахов, Рин.Ш. Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах / Рин.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов, К.А. Липатников // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2019. - Т. 15. - № 3. - С. 101 - 110. - DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-101-110.
13. Misbakhov, Rin.S. Combined brillouin OFDA and address FBG sensor system for distributed and point temperature measurements / Rin.S. Misbakhov // Proc. of International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. - 2019. - Pp. 69 - 74. - DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877685.
14. Misbakhov, Rin.Sh. DAS quasi-distributed system combined with temperature measuring on addressed fiber Bragg gratings / Rin.Sh. Misbakhov // Proc. SPIE. - 2020. - Vol. 11516.- P. 115160T.
15. Misbakhov, Rin.S. Combined raman DTS and address FBG sensor system for distributed and point temperature and strain compensation measurements / Rin.S. Misbakhov // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. - 2019. - Pp. 64 - 68.
16. Сахабутдинов, А.Ж. Радиофотонный дифференциальный акселерометр на двух адресных волоконных брэгговских решетках / А.Ж. Сахабутдинов, В.В. Пуртов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А. А. Кузнецов, В.И. Артемьев, А.Н. Васев, К.А. Липатников, В.В. Чистяков, М.В. Носиков, Рин.Ш. Мисбахов. // Фотон-экспресс. 2019. - № 5 (157). С. 7 - 15.
17. Мисбахов, Рин.Ш. Технологии передачи данных в современных системах релейной защиты и автоматики и их показатели качества / Рин.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв и др. // Проблемы энергетики. - 2017. - Т. 19. - № 1-2. - С. 52 - 63.
18. Пат. 2657180 Российская Федерация, МПК G06 F 15/16, G06 F 19/00. Многопроцессорная информационно-управляющая система релейной защиты и автоматики / И.Н. Лизунов, А.Н. Васёв, В.В. Федотов; заявитель и патентообладатель ОАО «Сетевая компания». - № 2017128345; заявл. 08.08.2017. опубл. 08.06.2018. Бюл. № 16.
19. Пат. 2697633 РФ, МПК G06 E 1/04, H01 H 83/00, H02 H 7/00. Многопроцессорная информационно-управляющая система релейной защиты и автоматики на основе пассивной оптической сети / И.Н. Лизунов, А.Н. Васёв, Р.Ш. Мисбахов и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - № 2018135746; заявл. 08.10.2018, опубл. 15.08.2019, Бюл. № 23. - 12 с.
20. Макаров, И.А. Инициализация центральной длины волны восходящего потока транспортного WDM-PON домена радиосетей доступа мобильной связи 5G / И.А. Макаров, С.Г. Алюшина, В.О. Анучин, Н.С. Гарипов, Рин.Ш. Мисбахов, Рус.Ш. Мисбахов, А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов, Г. А. Морозов, Г.И. Ильин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2020. - № 2. - С. 73 - 81.
21. Муслимов, Э.Р., Спектрографы с высокой дисперсией для радиофотонных сенсорных систем / Э.Р. Муслимов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов и др. // Фотон-экспресс. - 2019. - № 6 (158). - С. 318-319.
22. Muslimov, E., Optical designs with curved detectors for fiber bragg grating interrogation monitors / E. Muslimov, N. Pavlycheva, I. Nureev, O. Morozov et al.// Sensors. - 2021. - Т. 21. - № 1. - С. 1-13.

23. *Muslimov, E.* Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach / E. Muslimov, I. Nureev, O. Morozov et al. // Optical Engineering. - 2018. - T. 57. - № 12. - C. 125104.

TECHNICS OF SENSORS INTERROGATION FOR IMPLEMENTATION OF SMART GRID PLUS CONCEPT

I.I. Nureev¹, R.Sh. Misbachov²

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420011, Russian Federation

²Kazan State Power Engineering University
51, Krasnoselskaya st., Kazan, 420066, Russian Federation

Annotation. The purpose of this article is to solve the problems of intelligent electric power industry, in particular, the introduction of software and hardware tools and devices developed over the past five years at the RFMT department with improved metrological, technical and economic characteristics for interrogation of electrical networks sensors, as well as object communication networks of intelligent electrical networks and sensor monitoring of their operational parameters, built on the basis of the "Smart Grid Plus (SGP)" concept, in comparison with the known systems that do not use the specified concept and/or the microwave photonic addressing approach based on multicast fiber Bragg structures.

Keywords: SMART GRID PLUS, interrogator, integrated fiber-optic sensor, passive optical network, multicast fiber Bragg structure

Поступила в редакцию 10.12.2021