



# ПРЕИМУЩЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОГО РЕШЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ ПО ОПТОВОЛОКНУ (POWER-OVER-FIBER) И ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА

Е. Сердюк<sup>1</sup>, М. Пирейлес<sup>2</sup>, Чен-Лян Ву<sup>2</sup>, Мей-Хуан Ян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОЭС Спецпоставка, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>MH GoPower Company Limited, Гаосюн-Сити, Тайвань

Частичный разряд, возникающий в электрических устройствах высокого или среднего напряжения (распределительных электрических шкафах, двигателях, преобразователях и генераторах), оказывает негативное воздействие на работоспособность оборудования. Для обнаружения частичного разряда предложено использовать сопутствующее его возникновению оптическое излучение, которое можно обнаружить с помощью оптических датчиков. Обсуждается конструкция гибридной системы детектирования на основе флуоресцентного оптоволоконного датчика и технологии передачи мощности по волокну (PoF).

## 1. ВВЕДЕНИЕ

### 1.1. Частичный разряд и методы его обнаружения

Частичный разряд (ЧР) – явление, которое наблюдается при условии, когда напряженность электрического поля превышает напряжение пробоя изолятора. Оно происходит в таких электрических устройствах высокого или среднего напряжения, как распределительные электрические шкафы, двигатели, преобразователи, генераторы и т.д. Оказывая негативное влияние на работоспособность оборудования, ЧР требует внимательного контроля и мониторинга, это необходимо для оптимизации профилактических работ и предотвращения случаев чрезвычайных ситуаций. Сценарии обнаружения ЧР включают периодический и постоянный контроль основных узлов. В современных системах более предпочтителен непрерывный долгосрочный мониторинг в режиме "он-лайн", который позволяет своевременно реагировать на изменения в работе объектов электроэнергетики.

Существует несколько методов для обнаружения ЧР. Основные из них приведены ниже (рис. 1). Все методы имеют свои сильные и слабые стороны, поэтому ни один из этих методов не подходит для использования в контроле всех типов оборудования: выбор метода обнаружения диктует специфика применения. Например, в преобразователях часто используется контроль аку-

стической энергии, так как акустические волны, вызванные разрядом, хорошо передаются через твердотельные масляные преобразователи и их металлические стенки. В высоковольтных кабелях ЧР приводят к колебаниям электрического тока, что позволяет точно измерить ЧР непосредственно в кабеле или в заземляющем проводнике. А метод обнаружения электромагнитных (ЭМ) волн часто используется для шкафов коммутационной аппаратуры, где УВЧ-антенна может быть размещена на внутренней стенке шкафа и детектировать большинство событий ЧР [1].

### 1.2. Обнаружение частичного разряда оптическими методами

Частичный разряд вызывает генерацию оптического излучения, которое может быть обнаружено оптическими датчиками. Спектр сгенерированного ЧР света варьируется от УФ- до видимого диапазона в зависимости от энергии ЧР [2]. Так как цель системы мониторинга ЧР состоит в предотвращении негативных последствий, то основное внимание уделяется возможности обнаружения низкоэнергетических событий ЧР до того момента, когда они превратятся в высокоэнергетические опасные события. Основные оптические методы таковы:

1. Размещение УФ-фотодетектора рядом с источником потенциального УФ-излучения. Является самым простым оптическим методом.

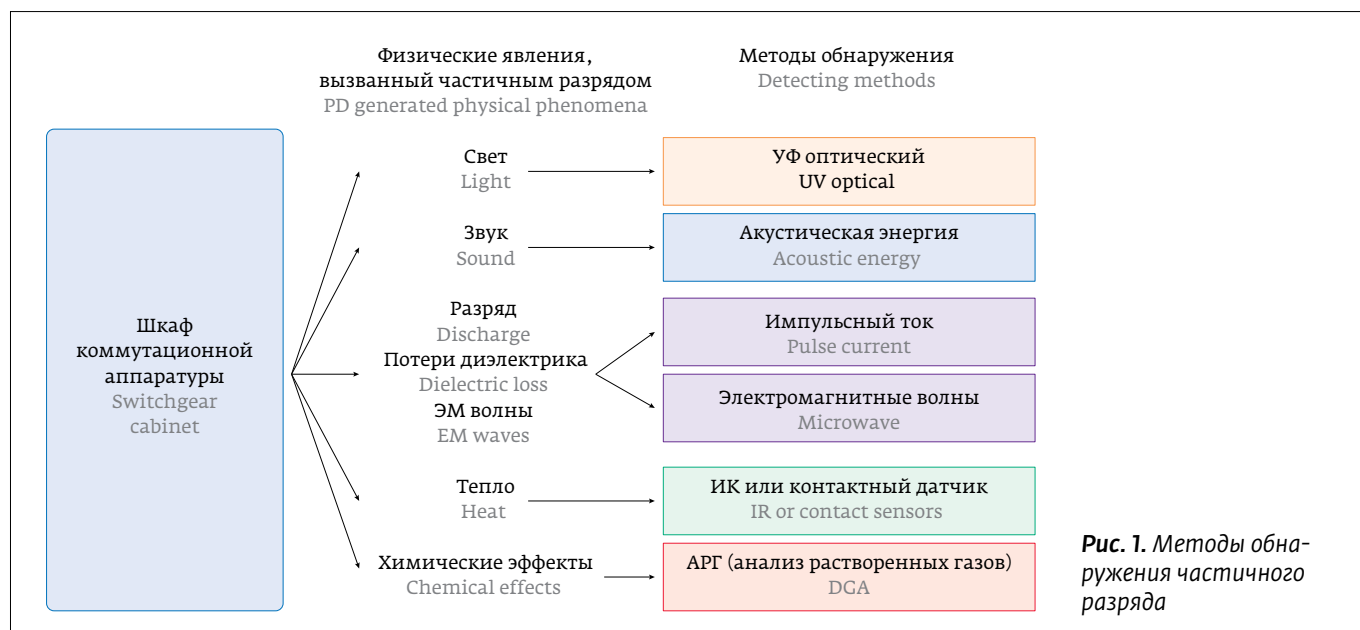


Рис. 1. Методы обнаружения частичного разряда

2. Использование флуоресцирующих веществ. Флуоресцирующее вещество, прикрепленное к наконечнику оптоволоконного кабеля, работает как точечный датчик. Поглощенный ультрафиолетовый свет вызывает флуоресценцию материала в оптоволоконном наконечнике, при этом часть излученной энергии видимого диапазона передается по оптоволоконному кабелю для удаленного. Одной из вариаций такого метода является использование U-образного оптоволоконного датчика (как и в точечном, оголенное оптоволоконное покрытие покрывается флуоресцирующим веществом) [3].

3. Использование оптоволоконного кабеля с жилой, легированной флуоресцирующим веществом [4]. В отличие от предыдущих двух методов, этот метод не является точечным. Такие датчики могут быть интегрированы в силиконовую резиновую изоляцию, которая окружает высоковольтные кабели. В таком случае флуоресцентное волокно размещено вблизи источника, генерирующего ЧР, который может произойти в изолированных точках подключения, в интерфейсах проводниковой изоляции или в самой изоляции [5].

Каждый из оптических методов имеет свои недостатки. Точечные датчики (1-й и 2-й методы) имеют ограничение по углу приема. Кроме того, оба этих датчика могут принимать свет только на небольшой площади, что приводит к низкой чувствительности и ограниченному полю зрения.

В свою очередь, ограниченное поле зрения в датчиках этих типов означает, что требуется множество датчиков для достаточного охвата большого отсека, такого как шкаф коммутационной аппаратуры. Легированный флуоресцентный оптоволоконный датчик имеет преимущество в том, что он может принимать свет и флуоресцировать вдоль всей длины флуоресцентного оптоволоконного кабеля. Это значит, что он обладает способностью к обнаружению низких уровней ЧР, а также обнаруживать ЧР из намного более широкой области. Однако его слабость состоит в высоком затухании в легированной жиле оптоволоконного кабеля, около ~300 дБ/км [4] (до 11 000 дБ/км в некоторых случаях [5]). Поэтому существует предел максимальной длины эффективной передачи (2 м для 85% эффективности передачи) [4]. Общее решение для преодоления этого ограничения состоит в том, что легированное волокно соединяют со стандартным волокном, имеющим малое затухание, и оно передаст излучение к удаленному фотодетектору.

## 2. СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЧР НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ PoF, СОЗДАННОЙ МН GO POWER

### 2.1. Обзор систем оптического обнаружения ЧР с применением PoF

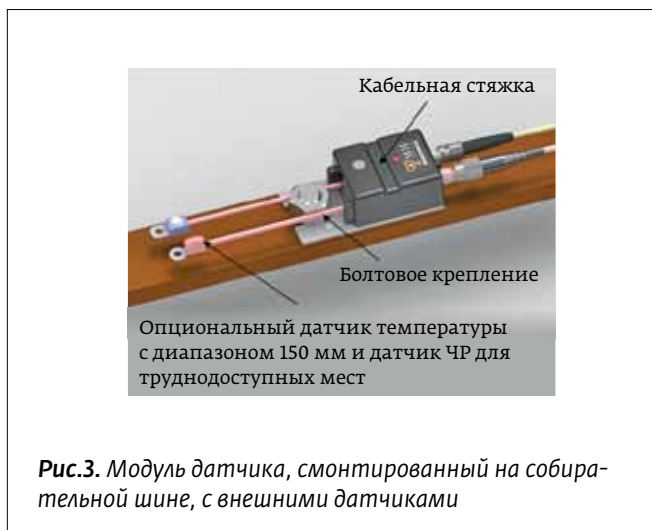
Одно из применений, где требуется мониторинг ЧР, – это оборудование коммутационной аппаратуры. В условиях высокой температуры и/или высокой влажности может произойти ЧР, что вызовет повреждение и отказ оборудования. Поэтому компанией MNGP была разработана система

мониторинга ЧР с технологией передачи мощности по волокну (PoF), Технология предназначена специально для контроля состояния шкафов коммутационной аппаратуры. Система может контролировать температуру шины, температуру окружающей среды, влажность в шкафу, а также частичный разряд.

Система непрерывного мониторинга ЧР с технологией PoF от МНГР отправляет лазерное излучение через оптоволоконный кабель, который подключается к модулю датчика. Модуль датчика содержит фотогальванический элемент, который преобразует попадающий на его приемную площадку лазерное излучение в источник электрической энергии. Она питает любой датчик или электронику передачи данных, которая интегрирована в модуль датчика. Поскольку модуль датчика запитан через абсолютно непроводящее оптоволокну, то он может быть помещен в любое место в шкафу коммутационной аппаратуры.

Модуль датчика может включать отдельные датчики любых типов, включая оптические. Исходный коммерческий продукт МНГР использует обнаружение оптического УФ и видимого излучения. Такой подход был выбран для обнаружения разрядов, которые могут происходить в ограниченных местах, например, вблизи механических соединений рычажков прерывателя или неизолированных кабельных соединений.

Система мониторинга ЧР включает головной лазерный модуль (ГЛМ) и один или несколько модулей датчика, подключенных двумя оптическими многомодовыми волокнами. По одному волокну ГЛМ передает мощность, а по второму получает показания от модуля датчика.



## 2.2. Описание конструкции системы

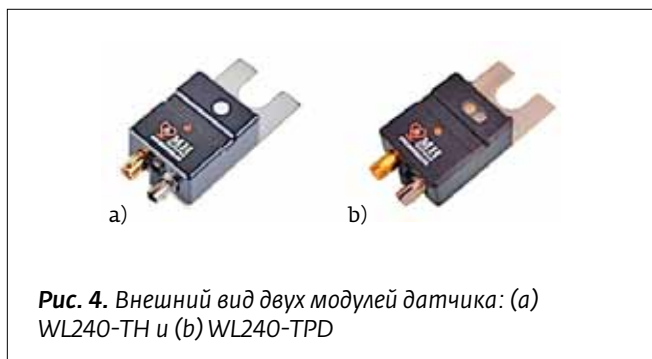
Одноканальный ГЛМ подключен к модулю датчика через два оптоволокна (рис. 2) (оранжевый – для подачи мощности на фотогальванический элемент, желтый – для передачи данных). Оптоволоконная система предназначена для эксплуатации на высоковольтных линиях электропередачи и подходит для монтирования на шины с напряжением до 38 кВ. На Модуль датчика смонтирован на сборочной шине монтажным болтом (рис. 3). Для некоторых установок также может подходить кабельная стяжка или монтаж при помощи эпоксидной смолы.

### Модули датчика

Компанией МНГР разработаны два модуля датчика для монтажа на шине среднего напряжения. Их состав указан в табл. 1, а внешний вид представлен на рис. 4 и 5.

### Головной лазерный модуль (ГЛМ)

Ранее описывалось устройство системы с одним датчиком и одноканальным ГЛМ, однако при работе с коммутационной аппаратурой для трех-

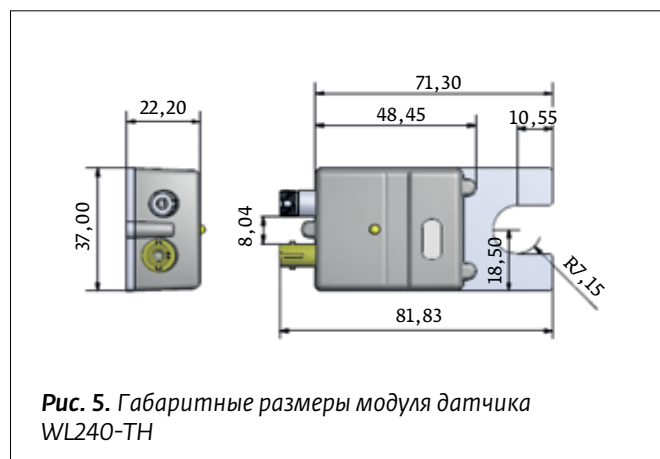


**Таблица 1.** Модули датчика системы обнаружения частичного разряда (ЧР)

Модуль WL240-TH	Модуль WL240-TPD
Питание с помощью фотовольтаического конвертера YCH-L240 производства MNGP, который может генерировать электроэнергию в 260 мВт при входной мощности лазера 1 Вт	
Температурный датчик сборительной шины для контроля роста температуры (такой рост может указывать на текущую перегрузку или высокий импеданс)	
Датчик температуры окружающей среды	Датчик УФ излучения (фотодиод SG01S-18 от sglux GmbH). Рабочий диапазон: 215–405 нм Рабочая температура до 170 °С
Датчик влажности окружающей среды	Датчик излучения видимого диапазона Рабочий диапазон: 380–1 100 нм Рабочая температура до 125 °С

фазных сетей, может потребоваться как минимум три датчика: для шины каждой из фаз. Для этой задачи был спроектирован многоканальный ГЛМ (рис. 6), поддерживающий до 12 модулей датчика. Конструкция предусматривает размещение 6 модулей датчика на рычажках в отсеке прерывателя, по одному на каждой из трёх сборительных шин и 3 дополнительных модуля датчика в кабельном отсеке. Размещение 12 модулей датчика в шкафу коммутационной аппаратуры обеспечивает комплексный мониторинг состояния каждого отсека.

Микроконтроллер головного модуля анализирует поступающую информацию, регистрируя как количество событий ЧР, так и среднюю интенсивность за установленный период (в соответствии со стандартом IEC62478 [6]). При необходимости необработанные показания датчиков могут быть переданы на внешнюю систему мониторинга через порт RS485 с помощью протокола MODBUS.



**Рис. 5.** Габаритные размеры модуля датчика WL240-TH

### 2.3. ПРЕИМУЩЕСТВА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЧР С ТЕХНОЛОГИЕЙ PoF

#### Многофункциональность модулей датчика

Модуль может включать любые датчики, если они умещаются в корпус WL240, и им достаточно электроэнергии, получаемой с помощью конвертера. Максимальная мощность вычисляется как произведение оптической мощности лазера (1,25 Вт, в соответствии с требованиями Класса 1) и КПД фотовольтаического преобразователя (26% у MNGP) и приблизительно равняется 325 мВт. Использование комбинации датчиков различного типа, установленных в множестве мест контролируемого оборудования, увеличивает надежность обнаружения событий ЧР и позволяет более точно прогнозировать состояние оборудования.

#### Обнаружение частичного разряда

##### в труднодоступных местоположениях

Механические соединения рычажков прерывателя коммутационного оборудования со временем повреждаются. Это приводит к коронному разряду, который ускоряет отказ оборудования. Обнаружение ЧР в этих обстоятельствах затруд-



**Рис. 6.** Многоканальный модуль данных лазерного датчика для питания до 12 модулей датчика



нено. Во-первых, из-за того, что расстояние между сосудом из эпоксидной смолы и рычагом прерывателя мало. Во-вторых, из-за того, что в сосуд из эпоксидной смолы часто встраивается металлический экран. Этот металлический экран поглощает большую часть электромагнитной энергии, сгенерированной событиями ЧР. Именно по этим причинам традиционные УВЧ-детекторы не могут точно обнаружить ЧР в этих областях. В свою очередь модули датчика с оптоволоконным соединением легко располагаются непосредственно на рычажке прерывателя.

### Удаленный мониторинг

Система мониторинга ЧР POF-WL240 от MNGP использует излучение лазера на 976 нм, с затуханием в волокне  $\sim 1,2$  дБ/км. Поэтому через 1 км  $\sim 75\%$  излучения лазера все еще оказывается доступным для преобразования в электрический ток. Потенциальная мощность электроэнергии через 1 км оптоволокна остается приблизительно равной  $1,25 \text{ Вт} \cdot 75\% \cdot 26\% = 243 \text{ мВт}$ . Поэтому датчики системы на основе технологии PoF могут находиться на значительном удалении от ГЛМ, осуществляя мониторинг ЧР на высотных объектах или в других труднодоступных местах.

### 3. ГИБРИДНОЕ РЕШЕНИЕ, ВКЛЮЧАЮЩЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ ПО ОПТОВОЛОКНУ (POF) И ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА (ФОВД)

Традиционный подход предполагает, что стандартный ФОВД (имеющий длину менее 2 м из-за сильного затухания в волокне) стыкуется со стандартным оптоволоконным кабелем для передачи данных к удаленному фотодетектору. В свою очередь, в гибридной системе ФОВД подключается непосредственно к модулю датчика на основе технологии PoF. Модуль датчика детектирует уровень флуоресцентного света, производит оцифровку полученных данных и отправляет их далее с помощью оптического передатчика. Кроме того, модуль датчика многофункционален и может содержать другие виды датчиков, описанные в предыдущих разделах.

### Преимущества гибридной системы

- Ранняя оцифровка флуоресцентного сигнала вблизи высоковольтного источника ЧР. Уровень детектируемого сигнала не зависит

от затухания в волокне и соединениях, что обеспечивает лучшую чувствительность и стабильность уровней обнаружения.

- **Оптимизация связи датчика с системой мониторинга.** В модулях на основе технологии PoF используются оптические передатчики, совместимые с традиционной инфраструктурой оптоволоконной связи. Кроме того, при необходимости в модуль может быть установлен беспроводной передатчик.
- **Упрощение кабельных соединений/уменьшение сложности.** К одному модулю датчика на основе технологии PoF может быть подключено сразу несколько ФОВД, показания которых передаются далее по единственному оптоволоконному каналу.
- **Лучшее покрытие и локализация события.** Преимущество, описанное в предыдущем пункте, дает возможность установки ФОВД с более высокой плотностью, обеспечивая лучший охват и локализацию события.
- **Многофункциональность для преодоления недостатков ФОВД.** Как описано ранее, многофункциональность обеспечивает дополнительную информацию о среде, полезную в разработке прогнозирования ее состояния. А использование комбинированного подхода приводит к более точному обнаружению ЧР. Как пример, акустический датчик может обнаружить ЧР в изоляции или другом участке электротехнического оборудования, где не происходит генерации сигнала, достаточного для детектирования уровня УФ-излучения.

### 4. БУДУЩЕЕ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ

#### 4.1. Ограничения основных типов оптоволоконных датчиков

Мы описали ФОВД УФ-излучения и их потенциальные возможности для гибридных систем на основе технологии PoF. Теперь мы исследуем более подробно возможности и ограничения других оптоволоконных датчиков, включая датчики интенсивности, длины волны и фазомодулированные оптоволоконные датчики [7]. Существует широкий спектр типов оптоволоконных датчиков. Оптоволоконные датчики обычно имеют в своем составе следующие компоненты: источник света, волокно, модулятор или преобразователь, и световой детектор для измерения переданного (или возвращенного) света. Волоконные датчики можно также классифицировать на внешние и внутренние датчики. Внешние волоконные датчики работают



**Таблица 2.** Преимущества гибридного решения PoF + ФОВД для обнаружения ЧР

Функция	PoF + ФОВД	ФОВД
Чувствительность	Лучшая	Переменная
Стабильность данных	Высокая	Низкая
Опции передач данных	Цифровая, оптически или беспроводно	Аналоговая
Сложность прокладки кабелей	Уменьшенная	Одно передающее оптоволокно на ФОВД
Охват события ЧР	Полный	Хороший
Многофункциональность	Решает ограничения ФОВД	Нет

по схеме: свет выходит из волокна в другую среду, которая меняет его параметры, а затем опять входит в волокно. В конструкции внутренних датчиков реализована иная схема работы: свет не покидает волокно, а среда действует непосредственно на волокно для изменения параметров пропускаемого света. Технология PoF может быть полезна для датчиков обоих типов, позволяя устранить некоторые их недостатки.

#### 4.2. Как технология PoF может устранить недостатки традиционных решений

Основная концепция предполагает разработку гибридного решения PoF + точечный оптоволоконный датчик (распределенные системы мониторинга типа DTS или DAS не получают существенного преимущества от такого гибрида). В оптоволоконном датчике одно волокно используется для обычного оптоволоконного датчика, а второе волокно питает "модулятор" (третье волокно может использоваться в некоторых случаях для оптической связи с модулятором). Этот "модулятор" оптически, акустически, механически, электрически или иначе изменяет параметры светового потока, пропущенного через внешний или через внутренний оптоволоконный датчик. В состав устройства модулятора может входить ряд встроенных обычных датчиков: оптический, электромагнитный, вибрационный или температурный. На основе показаний этих датчиков устройство будет модулировать свет в оптоволоконном датчике. Таким способом большая часть любых традиционных показаний датчика может быть сначала измерена модулятором на основе технологии PoF, а затем преобразована в интенсивность, длину волны или фазомодулированный сигнал, совместимый с традиционными оптоволоконными датчиками. Ниже описано, как гибридный подход может устранить недостатки оптоволоконных датчиков.

#### Волоконные датчики требуют различных детекторов и систем анализа для различных типов датчика

Особенность волоконных датчиков состоит в том, что различные методы обнаружения требуют различных датчиков и аналитических инструментов. Например, датчики на основе волоконной решетки Брэгга (FBG) обнаруживают изменения длины волны, в то время как датчики Фабри-Перо используют интерферометры для обнаружения фазовых сдвигов, а простые фотодиоды могут использоваться для обнаружения изменений интенсивности. Эти методы могут также использовать различные модуляторы (или требовать расположения специального волокна) в нужной локальной области.

Технология PoF позволяет использовать только один детектор или аналитический инструмент, только одно волокно и потенциально универсальный "модулятор", чтобы обеспечить все показания волоконного датчика. Модулятор на основе технологии PoF может измерять, например, температуру и корректировать микроизгиб волоконного датчика интенсивности в зависимости от температуры. Также модулятор может корректировать микроизгиб в зависимости от уровней влажности или атмосферного давления. Фактически, модулятор может иметь способность измерить температуру, атмосферное давление и влажность одновременно, и модулировать микроизгиб мультиплексируя данные во времени, представляя состояние всех трех параметров окружающей среды.

Точно так же оптоволоконный датчик Фабри-Перо использует изменяющееся расстояние между двумя отражающими поверхностями для измерения изменений фазы. Модулятор может изменить это расстояние, модулируя его показаниями других датчиков, таких как датчик температуры, интенсивности света или уровня напряжения.

Вышеупомянутые описания являются примерами возможностей гибридной системы PoF +



оптоволоконный датчик. Они иллюстрируют, что с помощью того же детектора-интерферометра и аналитических инструментов можно измерять условия окружающей среды, которые ранее не могли быть обнаружены волоконными датчиками Фабри-Перо. Этот гибридный подход обеспечивает потенциал для улучшения существующих аппаратных средств оптоволоконного датчика для многих новых приложений.

## Повышенная функциональность

Как уже было описано выше, этот подход позволяет использовать единственный волоконный датчик для одновременного обнаружения изменения различных условий окружающей среды. Кроме того, модулятор на основе технологии PoF в дополнение к воздействию на оптоволоконный датчик может также воздействовать на среду. Гибридные системы могут широко применяться в конфигурациях обнаружения и контроля, где должны быть приняты меры на основе определенных показаний датчика.

Например, система контроля может решить, что показание оптоволоконного датчика, такое как давление, превысило безопасный уровень, и запросить, чтобы модулятор на основе технологии PoF уменьшил поток газа.

## Стабильность данных

Проблема многих оптоволоконных датчиков состоит в том, что различные факторы окружающей среды могут повлиять на показания датчика. Например, оптоволоконный датчик интенсивности, в котором степень микроизгибов (и таким образом, количество света, потерянное на оболочке) варьируется в зависимости от давления среды, имеет много потенциальных источников воздействия со стороны среды за счет своей чувствительности. К таким источникам (кроме изменения давления среды) относятся локальные источники вибрации, изменения температуры и неизвестные оптоволоконные помехи, возникающие в других местоположениях вдоль пути оптоволоконного кабеля. Поэтому для многих оптоволоконных датчиков, может быть необходима эталонная система для обеспечения целостности данных [7].

Гибридное решение PoF+оптоволоконный датчик имеет встроенную эталонную систему, которая включает системную калибровку, обеспечивая более точные значения датчика. Продолжая приведенный выше пример, модулятор на основе технологии PoF может механически вызвать микроизгибы, соответствующие трем различным уров-

ням давления, таким как максимальное, промежуточное и минимальное давление. Система может периодически вызывать эти известные уровни микроизгиба, осуществляя перекалибровку и обеспечивая возможность корректировки измеренных значений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были выявлены определенные преимущества гибридной системы ФОВД+PoF для обнаружения ЧР. Исследования показали, что основное преимущество гибридного подхода состоит в многофункциональности, которую PoF может принести к ФОВД в высоковольтных средах, расположенных вблизи источника события ЧР. Эта многофункциональность помогает преодолеть ограничения ФОВД, обеспечивая увеличенный охват и потенциал для интеграции дополнительных методов обнаружения ЧР.

Кроме того, показаны возможности расширения функциональности широкого спектра внешних и внутренних оптоволоконных датчиков посредством использования гибридного решения PoF+волоконный датчик. Подход позволяет искусственно генерировать изменения среды в оптоволоконных датчиках с помощью модулятора на основе технологии PoF. Эти искусственно сгенерированные изменения обнаруживаются оптоволоконным датчиком и интерпретируются как желаемое показание датчика. Этот гибридный подход приводит ко многим новым возможностям применения оптоволоконных датчиков, открывая дверь для инноваций в технологиях оптической сенсорики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Meggs R. W., Daffey, K.** Partial Discharge Monitoring in Marine HV Systems // Proc. IMarEST, 2011.
2. **Muhr M., Schwarz R.** Experience with optical partial discharge detection // Materials Science-Poland, 2009, 27(4), 1139–1146.
3. **Joza A.V., Bajic J. S., Stupar D. Z., Slankamenac M. P., Jelic M., Zivanov M. B.** Simple and Low-Cost Fiber-Optic Sensors for Detection of UV Radiation // Telfor Journal, 2012, 4(2), 133–137.
4. **Tang J., Zhou J., Zhang X., Liu F.** A transformer Partial Discharge Measurement System Based on Fluorescent Fiber // Energies, 2012, 5(5), 1490–1502.
5. **Siebler D., Hohberg M., Rohwetter P., Brusenbach R., Plath R.** Elastomeric fluorescent POF for partial discharge detection // OFS249634, 96343W-1-96343W-4 (2015)
6. **Alvarez F., Garnacho F., Ortego J., Sanchez-Uran M. A.** Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment // Sensors, 2015, 15(4), 7360–7387.
7. **Fidanboyulu K., Efendioglu H. S.** Fiber Optic Sensors and Their Applications // IATS'09, 2010, 1–6.