

Оптические системы обнаружения электрической дуги в комплектных распределительных устройствах

Алексей БЕЛЕНКОВ
belan@efo.ru
Игорь ШВЕЧИКОВ
sh@efo.ru
Алексей ЕЛИСЕЕВ
avel@efo.ru

Короткие замыкания (КЗ) — одна из самых распространенных причин возникновения аварийных ситуаций в электрических сетях. В комплектных распределительных устройствах (КРУ) электрических подстанций с рабочим напряжением 6–35 кВ особую опасность представляют КЗ, сопровождающиеся открытой электрической дугой. Обнаружение дугового КЗ и своевременное отключение поврежденного участка сети позволяет свести к минимуму причинение ущерба. В статье рассмотрены основные методы обнаружения электрической дуги. Особое внимание уделено наиболее перспективному из них — регистрации оптического излучения вспышки электрической дуги.

Электрическая дуга в КРУ

Распределение электрической энергии на подстанции осуществляется в распределительном устройстве. В сетях 6–35 кВ, как правило, применяются комплектные распределительные устройства внутренней (КРУ) или наружной (КРУН) установки. Секция КРУ состоит из нескольких шкафов, каждый из которых имеет три высоковольтных отсека (рис. 1):

- отсек кабельной сборки служит для подсоединения вводной линии и отходящих фидеров к секции КРУ, а также содержит измерительные трансформаторы тока;
- отсек выключателя содержит выключатель и другое высоковольтное оборудование (предохранители, секционные разъединители, трансформаторы напряжения);

- отсек сборных шин предназначен для соединения шкафов КРУ при помощи силовых шин [1].

Оборудование релейной защиты и автоматики (РЗА), измерительные приборы и устройства управления расположены в низковольтном релейном отсеке.

Дуговое КЗ в отсеках КРУ возникает в результате электрического пробоя изоляции между двумя проводниками или между проводником и «землей». Повреждения изоляции могут происходить из-за попадания грязи и влаги, проникновения в шкафы КРУ животных (в частности, грызунов), ошибок персонала или износа оборудования [1, 2]. Какова бы ни была причина появления дугового КЗ, оно может иметь катастрофические последствия для КРУ. Электрическая дуга сопровождается возникновением ударной вол-

ны и выделением огромного количества тепловой энергии, что в силу замкнутости КРУ может привести к повреждению или даже полному уничтожению значительной части оборудования. Подача электроэнергии на поврежденные участки приостанавливается, а восстановление секции может занять продолжительное время и потребовать больших затрат. Но гораздо важнее то, что электрическая дуга представляет серьезную угрозу здоровью и даже жизни персонала, оказавшегося рядом с местом аварии. Нахождение человека вблизи возникновения электрической дуги грозит ему тяжелыми ожогами, травмами от разбрасываемых осколков, а также ослеплением из-за мощной вспышки света, сопровождающей горение электрической дуги [3].

Сегодня вопросу построения эффективных систем защиты от дуговых замыканий (ЗДЗ) уделяется большое внимание. Современные отраслевые нормативно-технические документы [4–6] предписывают оснащать такими системами все КРУ с напряжением 6–35 кВ.

Существует несколько подходов к созданию систем ЗДЗ. Однако прежде чем перейти к их обсуждению, необходимо рассмотреть механизм возникновения электрической дуги, ее основные свойства и воздействие на материалы.

Электрическая дуга

Электрический пробой между токоведущими частями обычно связан с наличием электрического поля большой напряженности,

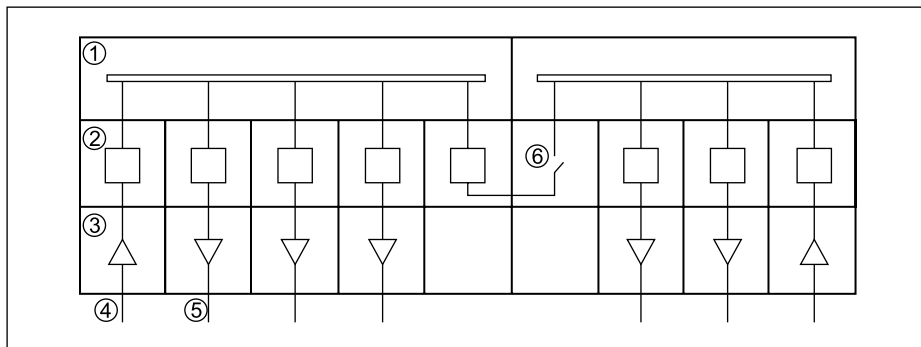


Рис. 1. Схема КРУ (на примере двухтрансформаторной подстанции):
1 — отсек сборных шин; 2 — отсек выключателя; 3 — отсек кабельной сборки;
4 — линия ввода; 5 — отходящие линии; 6 — секционный разъединитель

Таблица 1. Ущерб, причиняемый в результате длительного горения электрической дуги

Время, мс	Процесс	Влияние
0	Возникновение электрической дуги	
5	Амплитуда мощности оптического излучения достигает первого максимума	Воздействие на зрение
10	Ударная волна достигает максимума	Разрушение оборудования Травмы от разбрасываемых осколков Воздействие на слух
100	Плавление концевой заделки кабелей	Разрушение материалов Выделение токсичных газов Возгорание Ожоги
150	Плавление меди	
200	Плавление стали	

под влиянием которого с поверхности проводника вырываются электроны. Электроны ускоряются полем и сталкиваются с нейтральными атомами, что приводит к их ионизации. Образовавшиеся свободные электроны и ионы находятся в состоянии плазмы, имеющей проводимость, близкую к проводимости металла. Это явление носит название дугового электрического разряда [1, 7].

В створе электрической дуги создается очень высокая температура (несколько тысяч градусов по Цельсию). В окружающее пространство выделяется большое количество тепловой энергии, резко повышается давление. Также в результате столкновения электронов и атомов происходит испускание фотонов, поэтому электрическая дуга сопровождается яркой вспышкой света. Под влиянием мощного электромагнитного поля столб электрической дуги может перемещаться по силовым линиям, вызывая разрушения прилегающих отсеков КРУ. Скорость распространения может достигать 200 м/с [2, 3].

Важным моментом является то, что все описанные процессы происходят за доли секунды. В таблице 1 показано, к каким последствиям может привести «продолжительное» горение электрической дуги [1].

Поскольку основное внимание в данной статье уделено оптическим системам ЗДЗ, отметим также некоторые свойства оптического излучения, выделяемого вспышкой электрической дуги [1]:

- плотность мощности оптического излучения может достигать 10 кВт/м² (для сравнения: плотность мощности солнечного света, достигающего поверхности Земли, составляет приблизительно 0,74 кВт/м²);
- спектр оптического излучения электрической дуги имеет сложную форму, в каждом случае индивидуальную, однако установлено, что большая его часть сосредоточена в диапазоне длин волн от 300 до 800 нм (рис. 2);
- зависимость амплитуды мощности от времени имеет периодический характер с частотой колебаний, равной удвоенной частоте напряжения сети (100 Гц для сети 50 Гц); амплитуда при этом может изменяться в широких пределах.

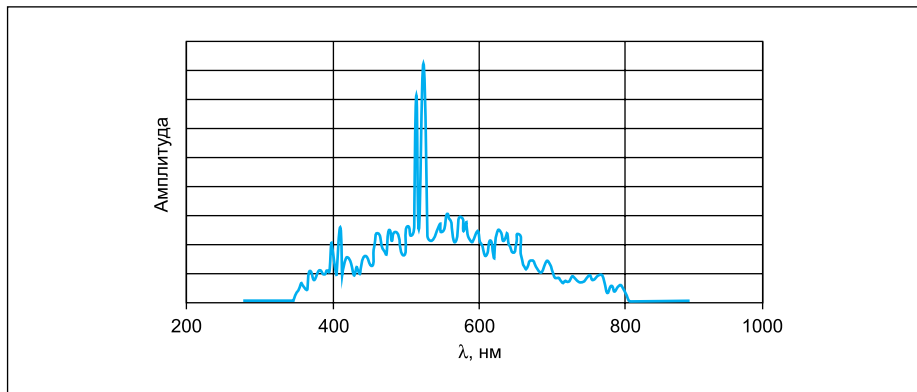


Рис. 2. Спектр оптического излучения вспышки электрической дуги

Системы ЗДЗ

Один из способов борьбы с последствиями дугового КЗ — модернизация конструктивов КРУ, в частности использование дугостойких перегородок между отсеками. Такая защита называется пассивной. Однако важную роль, особенно в КРУ, введенных в эксплуатацию много лет назад, играет также активная ЗДЗ, под которой подразумевается комплекс устройств, позволяющих зафиксировать возникновение электрической дуги на ранних стадиях ее развития и своевременно отключить поврежденные участки сети [3].

К системам ЗДЗ предъявляется ряд требований, среди которых следует отметить следующие [2]:

- **Быстродействие.** Как было показано выше, ключевым фактором в борьбе с электрической дугой является время. Согласно нормативам суммарное время от момента возникновения дуги до срабатывания выключателя не должно превышать 200 мс [4]. Однако даже за столь короткое время дуга может нанести значительный ущерб. Поэтому время срабатывания ЗДЗ необходимо сократить насколько возможно.
 - **Селективность (избирательность).** Под селективностью подразумевается способность системы защиты отключить только поврежденный сегмент энергосистемы для того, чтобы свести к минимуму перебои в подаче электроэнергии. Для этого необходимо как можно точнее определить место возникновения электрической дуги.
 - **Чувствительность.** Защита должна срабатывать даже при минимальных значениях аварийных параметров.
 - **Надежность.** Важным свойством системы дуговой защиты также является отсутствие отказов работоспособности и ложных срабатываний.
- Работа системы ЗДЗ основана на анализе процессов, сопровождающих дуговое замыкание, и контроле соответствующих параметров. Способы идентификации электрической дуги можно разделить на две группы [2, 8]:

1. Контроль основных параметров и характеристик электрической цепи при дуговом КЗ:
 - амплитуды тока/напряжения;
 - спектрального состава тока/напряжения;
 - вольт-амперной характеристики;
 - сопротивления.
2. Контроль основных параметров физических процессов, сопровождающих электрическую дугу:
 - температуры;
 - давления;
 - электрической проводимости (степени ионизации газов);
 - оптического излучения.

Среди методов контроля из первой группы наибольшее распространение получил контроль амплитуды тока или напряжения. В простейшем случае эту функцию выполняют устройства РЗА, такие как максимальная токовая защита (МТЗ), токовая дифференциальная защита и «логическая защита шин» (ЛЗШ). Дифференциальная защита и ЛЗШ не нашли широкого применения в системах ЗДЗ, главным образом потому, что имеют «мертвую зону» — отсеки измерительных трансформаторов тока и кабельной сборки, являющиеся одними из наиболее вероятных мест повреждения. МТЗ всегда имеет некоторую выдержку времени, устанавливаемую, чтобы дать возможность сработать раньше другим аналогичным защитам, находящимся ближе к месту повреждения [9]. К недостаткам всех систем РЗА относится то, что признаки, по которым определяется наличие дугового КЗ, могут наблюдаться не только при внутренних, но и при внешних КЗ, а также при некоторых эксплуатационных режимах работы [8].

Тем не менее МТЗ нашла широкое применение в системах ЗДЗ благодаря своей простоте, надежности и низкой стоимости. Кроме того, подавляющее большинство КРУ уже оснащено системами МТЗ. Однако одной МТЗ для борьбы с дуговыми КЗ недостаточно, поскольку она не обладает достаточной селективностью и быстродействием.

Основным принципом создания эффективной системы ЗДЗ, широко применяемым

Таблица 2. Сравнение датчиков электрической дуги

Название датчика	Клапанный [8, 10]	Температурный [2]	Антенный [8, 11]	Оптический [1, 8, 12]
Контролируемый параметр	Давление	Температура	Проводимость (степень ионизации)	Мощность оптического излучения
Принцип работы	Повышение давления приводит к открыванию клапана, снабженного контактами	Термодатчик реагирует на повышение температуры	Плазма дуги притягивается стальным прутком (дугоулавливающим электродом), к которому подключен трансформатор тока	Регистрируется оптическое излучение вспышки электрической дуги
Преимущества	Простота, низкая стоимость	Подавляющая часть энергии дуги превращается в тепло	Один антенный датчик можно проложить в нескольких отсеках	Высокое быстродействие
Недостатки	Необходимо определенное значение давления. Реакция на последствия дуги, а не на саму дугу	Сложность аппаратуры. Уязвимость. Датчик должен располагаться вблизи места КЗ	Датчик должен располагаться вблизи места КЗ	Риск ложных срабатываний (для части датчиков)

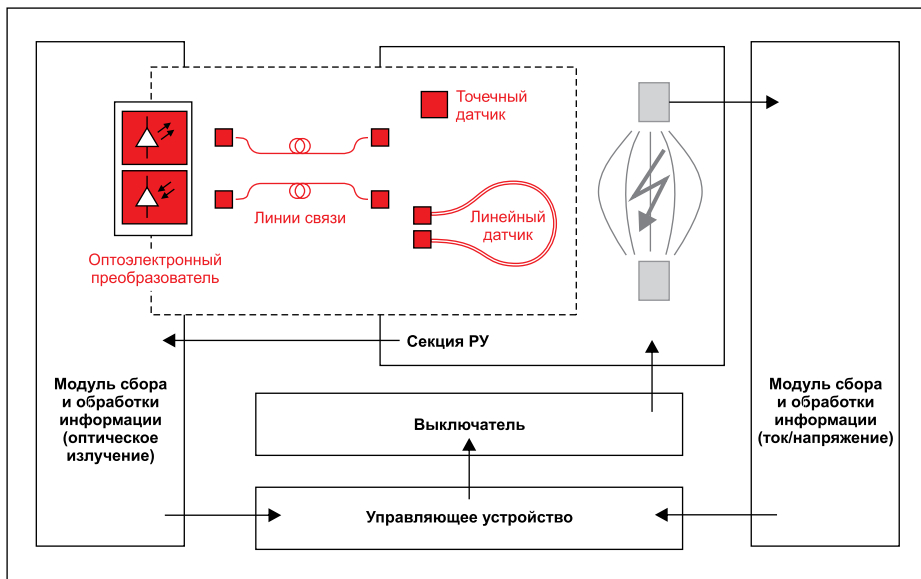


Рис. 3. Блок-схема системы ЗДЗ на основе МТЗ и оптического датчика

на практике, является ускорение действия МТЗ при помощи систем обнаружения, основанных на контроле параметров явлений, сопутствующих электрической дуге (то есть параметров второй группы). В таблице 2 представлена краткая характеристика некоторых систем, реагирующих на различные признаки возникновения дугового КЗ.

Анализ существующих технологий обнаружения электрической дуги, а также опыт их практического применения показал, что наиболее перспективным является проектирование систем ЗДЗ, реагирующих на амплитуду тока (МТЗ) и оптическое излучение (оптический датчик) [1, 3].

В общем случае принцип работы такой защиты состоит в следующем. В отсеках КРУ располагаются элементы, захватывающие оптическое излучение. Фотоприемник преобразует оптический сигнал в электрический и передает его на управляющее устройство. Время срабатывания современных оптических датчиков составляет от одной до нескольких десятков миллисекунд. Управляющее устройство также обрабатывает сигнал, пришедший с измерительных трансформаторов тока МТЗ. Типичное время формирования сигнала МТЗ составляет 30–50 мс. Если оба значения превышают пороговые, управляющее устройство определя-

ет место возникновения дугового КЗ и формирует сигнал на срабатывание соответствующих выключателей, предотвращающих дальнейшее распространение электрической дуги [1]. Блок-схема такой ЗДЗ изображена на рис. 3. Кроме того, при наличии сигнала с оптического датчика система запрещает автоматическое повторное включение (АПВ) и автоматическое включение резерва (АВР) в поврежденном сегменте сети.

Оптический датчик электрической дуги

В современных системах ЗДЗ используются оптические датчики двух видов, различающиеся по способу установки [1, 8].

В первом случае полупроводниковый фотодатчик (фотодиод, фоторезистор, фототранзистор, фототиристор) устанавливается непосредственно в отсек КРУ. Недостаток такой конструкции заключается в том, что электронные компоненты и линии связи располагаются в рабочей зоне, а значит, подвержены воздействиям сильных электромагнитных полей.

Для устранения этих нежелательных воздействий существует другой способ реализации оптического датчика, при котором в отсек КРУ устанавливается некий пассивный элемент, осуществляющий захват оптическо-

Таблица 3. Сравнение точечного и линейного датчиков

Сравниваемый параметр	Линейный датчик	Точечный датчик
Риск затенения	нет	есть
Чувствительность	ниже, чем у точечного	высокая
Возможность работы с несколькими отсеками	есть	нет
Точность определения места возникновения электрической дуги	низкая	высокая

го излучения, а вся оптоэлектронная часть выводится за пределы шкафа РУ (рис. 3). Передача сигнала от собирающего элемента к фотоприемнику происходит по оптическому волокну, которое не подвержено влиянию электромагнитных полей. Такие устройства получили название волоконно-оптических датчиков (ВОД). Захват оптического излучения выполняется при помощи устройства на основе линзы или же отрезка оптического волокна в прозрачной оболочке.

Фотодатчики и линзовые ВОД называют также точечными датчиками, поскольку они регистрируют оптическое излучение в ограниченном телесном угле. ВОД на основе собирающего волокна реализуют захват излучения поверхностью волокна по всей его длине, поэтому называются линейными датчиками [1, 12]. Один линейный датчик может быть установлен сразу в нескольких отсеках или шкафах КРУ. Как точечный, так и линейный датчики имеют свои преимущества и недостатки (табл. 3).

Точечные фотодатчики нашли свое применение в ряде систем ЗДЗ, таких как ЗДЗ-01 (ИЦ «Бреслер»), «Фотон» (НПЦ «Мирономика»), БССДЗ-01 и БССДЗ-03 (ЗАО «Промэлектроника»). Большинство же отечественных и иностранных предприятий, разрабатывающих оптические системы ЗДЗ, используют точечные и линейные ВОД, в некоторых случаях сочетая оба подхода. Среди оптических систем ЗДЗ иностранного производства можно выделить следующие: REA (ABB, Германия), DENNShort (Dehn, Германия), ARCON (Eaton, Ирландия), PGR-8800 (Littelfuse, США), VAMP (Schneider Electric, Франция). В России ассортимент оптических ЗДЗ представлен следующими устройствами: «ОВОД» (ООО НПЦ «ПРОЭЛ»), ФВИП-С (ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова), «Орион-ДЗ» (ЗАО «РАДИУС Автоматика»), ДУГА-МТ (ООО «НТЦ «Механотроника»), «ЭТЮД» (ООО «МПП «Энерготехника»), РС40-АРК, ПД-01, ПД-02 (ООО «РЗА СИСТЕМЗ»), УДЗ 00 «Радуга-ПС» (ООО «ТЕРМА-ЭНЕРГО») и др.

При разработке ВОД необходимо учитывать несколько моментов:

- Выбор типа ВОД. Как точечный, так и линейный датчик имеют свои преимущества и недостатки и могут быть использованы в системах дуговой защиты. Зачастую целесообразно использование обоих типов датчиков.

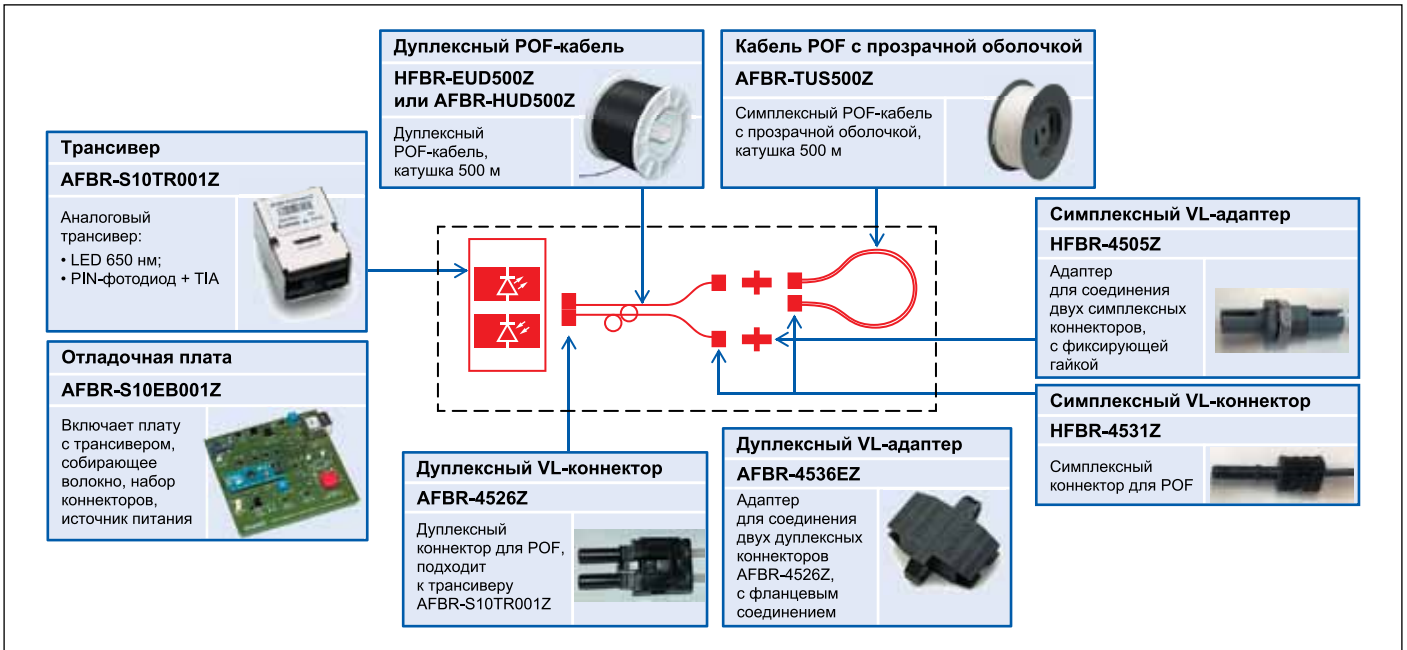


Рис. 4. Линейный ВОД компании Avago

- Выбор собирающего элемента. Линзовый ВОД должен захватывать излучение в достаточно широком телесном угле. Эффективность линейного ВОД во многом определяется свойствами собирающего волокна. Обычно используется волокно с большим диаметром сердцевины, например пластиковое (POF) или HCS-волокно.
- Расположение собирающих элементов. Необходимо обеспечить контроль всех частей КРУ, в которых возможно возникновение дугового КЗ.
- Выбор фотоприемника. Спектральная характеристика используемого фотоприемника должна перекрывать спектр излучения вспышки. Фотоприемник также должен иметь достаточную пороговую чувствительность.
- Диагностика работоспособности. Постоянная проверка работоспособности позволяет вовремя обнаружить неработающие датчики. Это можно сделать при помощи тестового сигнала, периодически посылаемого к фотоприемнику от передатчика, специально устанавливаемого в датчик для этой цели [1].
- Настройка пороговых значений. Устройство должно уметь отличать сигнал, вызываемый электрической дугой, от тестового сигнала и излучения других источников света.
- Быстродействие. Время срабатывания ЗДЗ складывается из времени срабатывания устройств обнаружения (МТЗ и оптического датчика) и времени срабатывания выключателя. Важную роль играет собственное время срабатывания оптического датчика.

Линейный волоконно-оптический датчик компании Avago Technologies*

Совершенствование систем ЗДЗ постоянно продолжается, ведутся работы по созданию новых оптических датчиков. Одна из последних разработок в этой сфере — линейный ВОД на основе компонентов компании Avago Technologies (рис. 4) [1, 13]

Основным компонентом системы является пластиковое оптическое волокно (POF) с прозрачной огнестойкой оболочкой AFBR-TUS500Z. Большая числовая апертура волокна (NA = 0,48) способствует захвату значительной части света, попадающего на его поверхность.

Оптоэлектронное преобразование излучения дуги и проверка целостности волокна осуществляются при помощи аналогового оптического трансивера (приемопередатчика) AFBR-S10TR001Z. Передающая часть трансивера содержит светодиод (LED), служащий для передачи тестового сигнала (Heartbeat-сигнала в терминологии Avago). Heartbeat-сигнал проходит по оптическому волокну и попадает на фотоприемник. Длина волны излучения LED (650 нм) соответствует минимуму затухания POF. Передатчик не имеет встроенного драйвера, что позволяет разработчику самостоятельно задавать параметры Heartbeat-сигнала.

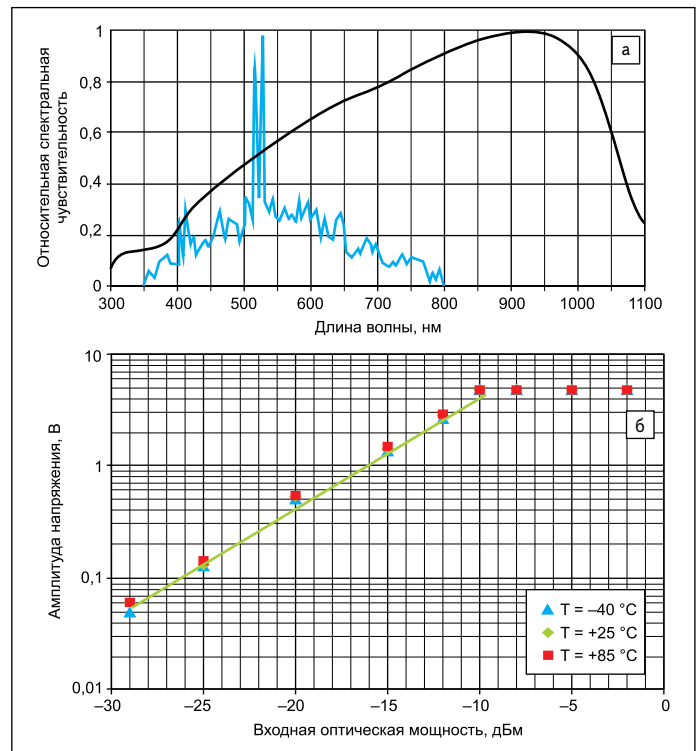


Рис. 5. Характеристики фотоприемника: а) спектральная характеристика фотодиода; б) зависимость амплитуды выходного сигнала от мощности оптического излучения

* 1 февраля 2016 года компания Avago Technologies Limited объявила о завершении сделки по приобретению компании Broadcom Corporation. Объединенная компания получила название Broadcom Limited.

Приемная часть трансивера представляет собой микросхему, состоящую из PIN-фотодиода и трансимпедансного усилителя (ТИА). Спектральная чувствительность фотодиода полностью перекрывает спектр излучения электрической дуги, гарантируя безошибочную работу (рис. 5а). Микросхема формирует аналоговый электрический сигнал, линейно зависящий от мощности оптического излучения вплоть до -10 дБм (рис. 5б). При мощности выше -10 дБм происходит насыщение фотоприемника. Однако поскольку для обнаружения электрической дуги значение имеет лишь амплитуда сигнала, а не его форма, рассматриваемый датчик безошибочно работает и при уровнях оптической мощности выше -10 дБм. Время нарастания выходного сигнала составляет 40 нс.

Отрезок собирающего волокна соединяется с трансивером при помощи POF-кабеля с непрозрачной огнестойкой оболочкой. Все компоненты системы соединяются коннекторами и соединительными розетками линейки Versatile Link («универсальное соединение»). Компоненты Versatile Link давно пользуются популярностью у разработчиков промышленных линий связи на основе POF, прежде всего благодаря привлекательной стоимости, высокой надежности и простоте монтажа.

Для тестирования возможностей набора компонентов Avago для создания датчика дуги выпускается отладочный набор AFBR-S10EB001Z.

Линейный ВОД на основе компонентов компании Avago отлично подходит для создания новых систем ЗДЗ, поскольку отличается высоким быстродействием, простотой работы, надежностью и невысокой стоимостью компонентов.

Заключение

Несмотря на большие успехи в разработке систем ЗДЗ, дуговые КЗ все еще остаются серьезной проблемой при эксплуатации электрических подстанций. Поэтому вопрос проектирования новых систем ЗДЗ и модернизации существующих остается актуальным и по сей день. Создание систем защиты КРУ от электрической дуги, включающих во-

локонно-оптические датчики на основе компонентов Avago, на данный момент представляется одним из наиболее эффективных решений. ■

Литература

1. Fiber Optic Sensor Systems for Arc Flash Detection. www.docs.avagotech.com/docs/AV02-4503EN
2. Нагай В. И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. М.: Энерго-атомиздат, 2002.
3. Батурлин С. Электробезопасность промышленных предприятий. Система защиты от дуги // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2013. № 1.
4. ГОСТ 14693-90 Устройства комплектные распределительные негерметизированные в металлической оболочке на напряжение до 10 кВ. Общие технические условия.
5. СТО 56947007-29.240.10.028-2009 Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ (НТП ПС). Стандарт ОАО «ФСК ЕЭС».
6. РД 34.20.501-95 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.
7. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Нагай В. И. Быстродействующие дуговые защиты КРУ. Современное состояние и пути совершенствования // Новости электротехники. 2003. № 5.
9. Шабад М. А. Максимальная токовая защита. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Право на жизнь имеют все виды дуговых защит // Новости электротехники. 2001. № 4.
11. Гуревич В. И. Принцип построения дуговой защиты распределительных устройств 6–10 кВ // Энергетика и электрификация. 1992. № 3.
12. Indra A. Using Fiber Optics in Arc Flash Detection Applications. www.electronicdesign.com/circuit-protection/using-fiber-optics-arc-flash-detection-applications
13. www.avagotech.com/products/industrial-fiber-optics/optical-fiber-sensors/arc-flash