

СИЛОВОЙ КАБЕЛЬ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ СО ВСТРОЕННЫМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ

Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем, разработанный компанией TELE-FONIKA KABLE S.A., введен в эксплуатацию на первой кабельной линии такого типа в Польше. Система, в которой оптическое волокно является термодатчиком, известна как DTS (Distributed Temperature Sensing – распределенный температурный датчик).

Системы DTS обеспечивают объективный контроль температуры кабеля с целью обнаружения критических мест на трассе. Основное преимущество системы, в которой используется распределенный температурный датчик, заключается в ее мультиплексности, то есть контроль температуры в сотнях точек производится одним единственным датчиком, в то время как дискретная система обеспечивает передачу данных только из одной точки, и эти данные считаются средним показателем какого-либо конкретного участка.

Что такое система DTS?

Метод оптической рефлектометрии временной области (OTDR) лежит в основе измерения температуры. При использовании этого метода лазерный импульс посылается вдоль волоконно-оптического датчика и затем анализируется в отраженном пучке света. В системах DTS для измерения температуры используется так называемый эффект Рамана – эффект комбинационного рассеяния света. На рис. 1 показана схема инициирования и анализа обратного пучка рассеянного света. С помощью этой схемы генерируется видимый световой поток с различными длинами

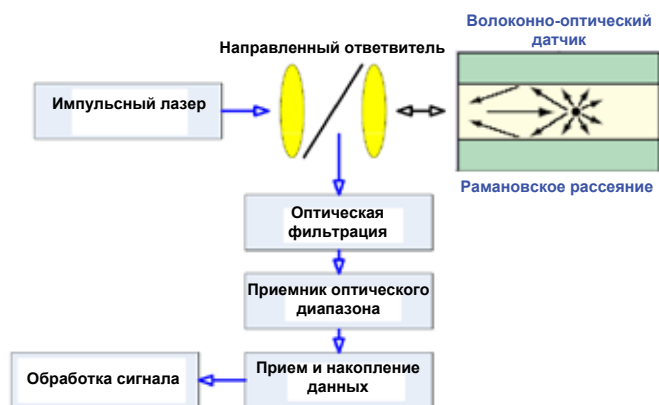


Рис. 1. Схема инициирования и анализа обратного пучка рассеянного света

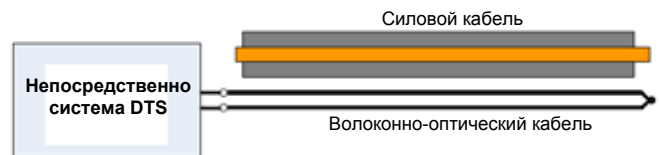


Рис. 2. Принцип работы системы DTS

волн. Эти новые диапазоны волн называются стоксовскими и антистоксовскими полосами частот. Стоксовская полоса не зависит от температуры оптического волокна в отличие от антистоксовской полосы. Именно антистоксовский сигнал несет информацию, касающуюся изменения температуры оптического волокна.

Локальная температура оптического волокна определяется по соотношению уровней интенсивности стоксовского и антистоксовского светового сигнала. Эта технология практически не зависит от возможных потерь на затухание в оптическом волокне и дает возможность измерить температуру. Принципиальная схема системы DTS показана на рис. 2. Для кабельных линий небольшой протяженности (до 10 км) используется многомодовое стандартное волокно с градиентным профилем показателя преломления. Пространственная разрешающая способность величины около одного метра возможна при двустороннем или одностороннем измерении. Для кабельной трассы большей протяженности (до 20 км), когда оптические потери при мониторинге становятся проблемой, используется одномодовое волокно с низкими потерями. При расстояниях до 20 км величина разрешения составляет 5 метров.

При помощи системы DTS можно производить односторонние и двусторонние измерения встроенного в кабель оптического волокна. Двустороннее измерение – это метод зондирования измерительного волокна с каждого конца. То есть с помощью петли волокна производится зондирование сигнала сначала с одного конца, а затем к другому концу петли подключается оптический квантовый генератор для выполнения второго измерения. После этого обрабатываются оба сигнала. При выполнении односторонних измерений один конец оптического волокна присоединяется к контрольному. Двусторонняя обработка сигнала обеспечивает более высокую точность измерения и быстрое действие в дополнение к уникальной системе восстановления в случае обрыва волокна.

Таким образом обеспечивается точное и непрерывное измерение температуры вдоль всей длины оптического волокна. После этого может быть определена приблизи-



Рис. 3. Конструкция силового высоковольтного кабеля с волоконно-оптическим модулем

тельная температура токопроводящей жилы кабеля при помощи системы RTTR (Real Time Thermal Rating – оценка температуры в режиме реального времени), что необходимо для эффективного контроля кабельной линии.

Какова же цель применения системы DTS? Стандартный способ измерения перепадов температуры в кабеле регламентирован стандартом МЭК 60287. Температурный режим на трассе кабельной линии изменяется, например, вследствие высыхания почвы. Поэтому уже много лет тому назад предпринимались попытки применить оптические волокна для мониторинга температуры кабеля с целью максимально эффективного использования его пропускной способности. Благодаря применению системы распределенного измерения температуры возможно следующее:

- мониторинг температуры кабеля вдоль всей длины кабельной линии;
- расчет на основании полученных данных допустимой пропускной способности кабельной линии;
- определение мест перегрева;
- управление кабельной линией на основе данных контроля.

Конструкция силового кабеля с волоконно-оптическим модулем

В соответствии со своим назначением кабель с волоконно-оптическим модулем должен обладать теми же эксплуатационными характеристиками, что и стандартный кабель без волоконно-оптического модуля. В расчет принимаются следующие граничные условия для кабеля:

- максимально допустимая температура токопроводящей жилы – 90 °С;
- максимально допустимая температура металлического экрана в режиме короткого замыкания – 350 °С;
- максимально допустимая температура оптического волокна при кратковременных перегрузках – 200 °С;

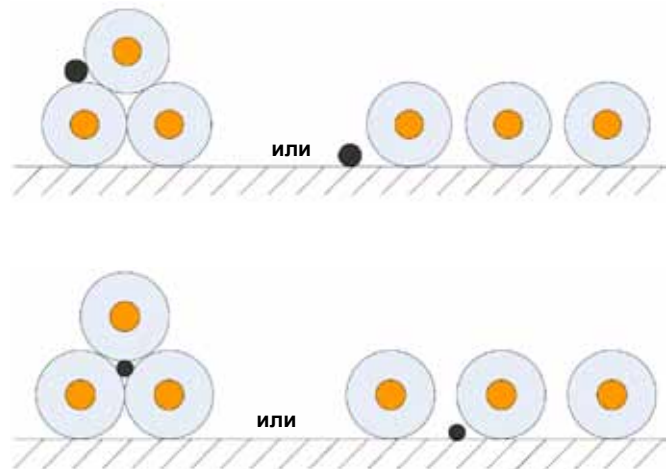


Рис. 4. Расположение волоконно-оптического модуля вне кабельной системы

- максимальное время короткого замыкания металлического экрана – 5 с.

На рис. 3 показана конструкция силового высоковольтного кабеля с волоконно-оптическим модулем. Толщина изоляции – 15 мм при производстве кабеля на линии непрерывной вулканизации. В качестве вулканизационной среды используется сухой азот. Металлический экран из меди (поперечное сечение 110 мм²). Волоконно-оптический модуль состоит из двух оптических волокон, помещенных внутри трубки из нержавеющей стали. Толщина наружной оболочки 3,3 мм; проводящий слой – из коллоидного графита. Наружный диаметр кабеля – 73 мм; масса – 7,1 кг/м. Для данного проекта использовался стандартный высоковольтный кабель (марка кабеля в Польше 2 × S (FI)2Y) сечением 300 мм² на напряжение 64/110 кВ. Максимальное тяжение при прокладке такого кабеля 15 кН, максимально допустимый радиус изгиба – 1500 мм, максимальная токовая нагрузка – 480 А, максимально допустимый ток короткого замыкания при длительности 1 с составляет 21,5 кА.

В кабельных системах, в которых применяется распределенное измерение температуры, волоконно-оптический модуль может быть расположен в различных местах. Так, волоконно-оптический модуль может быть расположен рядом с кабельной системой, но вне ее (рис. 4). Волоконно-оптический модуль может быть также расположен внутри кабельной системы. В этом случае волоконно-оптический модуль является элементом конструкции кабеля в различных вариантах:

- расположение под металлическим экраном;
- расположение под наружной оболочкой над металлическим экраном;
- как элемент в конструкции металлического экрана;
- как элемент конструкции токопроводящей жилы.

В качестве оптимального был выбран вариант, при котором оптический модуль является элементом конструкции кабеля. Оптическое волокно в рассматриваемом проекте является частью металлического экрана. Как уже указывалось, в конструкции металлического экрана размещена трубка из нержавеющей стали с двумя многомодовыми оптическими волокнами. Основные параметры оптического волокна приведены в табл. 1.

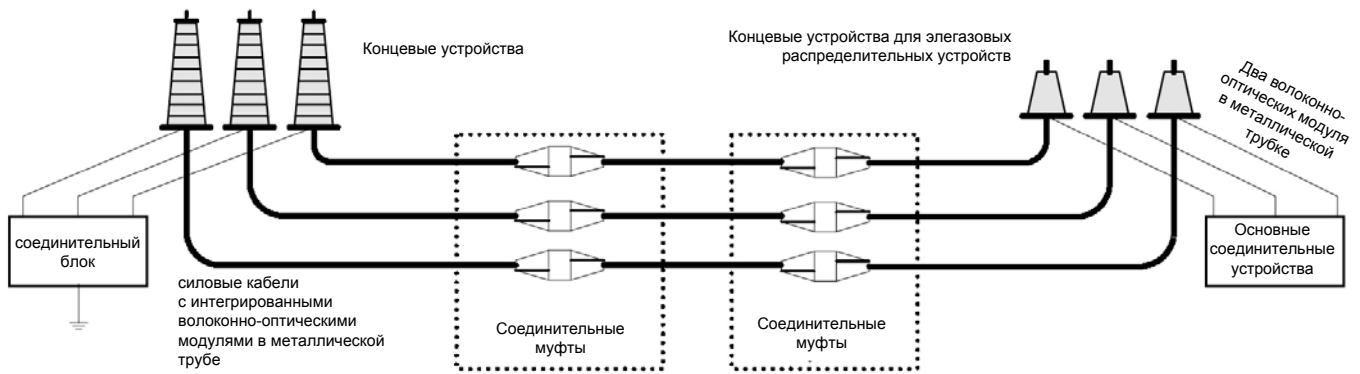


Рис. 5. Конфигурация кабельной линии на напряжении 64/110 кВ

Таблица 1

Параметры применяемого оптического волокна

Параметр	Значение/диапазон значений	Единицы измерения
Затухание		
$\lambda^* = 850$ нм	$\leq 2,4$	дБ/км
$\lambda^* = 1300$ нм	$\leq 0,6$	
Полоса пропускания		
$\lambda^* = 850$ нм	400–700	МГц·км
$\lambda^* = 1300$ нм	500–1200	
Температурный диапазон покрытия оптического волокна	$-60 \div 200$	°С

* λ – длина волны

Процедура проведения испытаний кабеля

С учетом действующих стандартов и рекомендаций была определена следующая процедура проведения испытаний кабеля:

- измерение затухания и его изменения в ходе процесса производства кабеля;
- испытание на изгиб с проведением измерений изменения затухания;
- электрические испытания с учетом измерения величины частичных разрядов и $tg \delta$ изоляции;
- циклы нагрева с приложением напряжения и перенапряжения и испытания переменным напряжением с проведением измерений затухания во время этих испытаний;
- механические и климатические испытания;
- электрическое испытание, воспроизводящее протекание номинального тока короткого замыкания через металлический экран.

В табл. 2 приведен перечень квалификационных испытаний, которым должен подвергаться кабель.

Испытания проводятся в условиях, когда приложена номинальная нагрузка токопроводящей жилы, то есть температура токопроводящей жилы составляет 90 °С.

Процесс производства кабеля с волоконно-оптическим модулем

Процесс производства кабеля соответствовал стандартной схеме:

- скрутка токопроводящей жилы;
- наложение покрытий методом экструзии (полупроводящий экран по жиле, изоляция из сшитого полиэтилена, полупроводящий экран по изоляции);
- наложение водоблокирующих лент, металлического экрана и металлической трубки с оптическим волокном;
- наложение наружной оболочки методом экструзии;
- наложение покрытия из коллоидного графита.

Наложение стального модуля с оптическими волокнами производится с использованием специального отдающего устройства. Наличие специального отдающего устройства предотвращает превышение допустимого тягового усилия и продольное закручивание стальной трубки. Для того чтобы обеспечить контроль затухания оптического волокна на каждом этапе наложения элементов конструкции кабеля, был предусмотрен мониторинг этого параметра.

Таблица 2

Квалификационные испытания кабеля

Характеристики, имитирующие воздействие окружающей среды	Механические характеристики	Электрические характеристики
Температурные циклы	Прочность на растяжение	Испытания по стандарту МЭК 6040 Испытание металлического экрана на стойкость к току короткого замыкания
Внешнее статическое давление	Испытание на удар	
Проникновение воды	Многократные изгибы	
Изгибы при низкой температуре	Испытание кручением	

Обобщенные данные мониторинга температуры при испытаниях кабеля на нагрев

Термопара	Место расположения термопары	Максимальная достигнутая температура, °С
1	Токопроводящая жила	98–101
2	Проволоки металлического экрана	225–238
3	Волоконно-оптический модуль в металлической трубке	195–202

Электрические испытания

Электрические испытания необходимы для того, чтобы воспроизвести опасные ситуации, которые возможны во время эксплуатации. Экстремальные обстоятельства для волоконно-оптического модуля возникают в условиях максимальной нагрузки, когда ток короткого замыкания протекает через экран кабеля, являющийся в данном случае обратным проводником. Используются методы испытаний для системы с двумя образцами в соответствии со стандартом EN 60794-1-2. Условия испытания:

- длина образца ≥ 10 м;
- исходная температура жилы – 100 °С;
- параметры короткого замыкания:
 - а) максимально допустимый ток короткого замыкания металлического экрана;
 - б) время короткого замыкания ≤ 1 с;
 - в) воспроизводимость результатов;
 - г) спад компоненты постоянного тока после третьего цикла воздействий;
- число коротких замыканий минимум – три.

Критериями оценки результатов испытаний являются:

- допустимые изменения затухания в многомодовых оптических волокнах 0,1–0,2 дБ/км, в одномодовых – приблизительно 0,1 дБ/км;
- отсутствие или незначительные повреждения модуля и элементов кабеля;
- температура модуля во время короткого замыкания не может превышать 300 °С.

Учитывая конструкцию кабеля, было принято решение о том, что в испытании на эластическую эрозию нет необходимости. Волоконно-оптический модуль расположен в металлическом экране, который как правило заземлен.

Результаты испытаний

Освоению производства высоковольтных силовых кабелей с волоконно-оптическими модулями предшествовала серия исследований и разработок. При проведении разработки конструкции, представленной в настоящей статье, испытанию на короткое замыкание был подвергнут опытный образец кабеля типа А 2 × S(F)2Y + ОТК 1 × 400/50 мм² 76/132 кВ со следующими параметрами:

- сечение алюминиевой токопроводящей жилы – 400 мм²;
- сечение обратного медного проводника – 50 мм²;
- допустимое значение тока при односекундном коротком замыкании 9,8 кА;
- максимальное значение тока, приводящего к нагреву жилы при окружающей температуре 15 °С – 871 А;
- толщина изоляции из сшитого полиэтилена – 16 мм.

Во время проведения испытания, при котором осуществлялся нагрев кабеля током 900 А в течение 17 часов, температура металлического экрана достигла 62 °С. Максимальные достигнутые температуры показаны в табл. 3.

Длина отрезка испытываемого кабеля – 25 м. Во время короткого замыкания при токе 10,1 кА в течение 0,94 с были достигнуты следующие значения:

- самая высокая температура металлического экрана – 238 °С;
- наиболее значительные изменения затухания в многомодовых оптических волокнах – плюс 0,074 дБ.

Предельные изменения затухания в многомодовых оптических волокнах для образца волокна с общей длиной 2 × 25 = 50 м составляли 0,100 дБ/км.

Приемочные испытания кабеля с волоконно-оптическим модулем проводятся в соответствии со стандартами МЭК 60840 и МЭК 62067. Дополнительно проверяется коэффициент затухания оптического волокна для каждого сегмента кабеля.

Проект кабельной линии

Как уже указывалось, компанией TELE-FONIKA KABLE S.A. введена в эксплуатацию первая кабельная линия на напряжение 64/110 кВ с интегрированным в кабель волоконно-оптическим модулем для измерения температуры кабеля. Протяженность трассы кабеля приблизительно 5 км. Конфигурация кабельной линии показана на рис. 5. Допустимая токовая нагрузка для кабельной системы была рассчитана для следующих условий прокладки:

- температура земли – 31 °С;
- глубина прокладки кабеля – 1,0 м;
- термическое удельное сопротивление земли – 1,5 к · м/Вт;
- температура воздуха – 31 °С.

Заключение

Технические решения, использованные в процессе производства кабеля с интегрированным волоконно-оптическим модулем в металлической трубке, сводятся к обеспечению соответствующей защиты волоконно-оптического модуля. Испытания, в основном, были направлены на оценку свойств волоконно-оптического модуля и включали следующие:

- механические испытания по определению возможных влияний технологического процесса производства на прочность модуля;
- испытания на воздействие окружающей среды с целью определения последствий возможных неблагоприятных воздействий в процессе эксплуатации;
- электрические испытания, связанные с протеканием тока короткого замыкания по обратному проводнику в условиях максимально допустимой нагрузки кабеля.

Основные критерии оценки параметров оптического волокна были основаны на стандартах МЭК и Европейского Союза. При разработке рекомендаций по силовому высоковольтному кабелю с волоконно-оптическим модулем были использованы специальные решения, связанные с защитой оптических волокон в местах расположения кабельных муфт.

