ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ В СЕТЯХ РФ АРМАТУРЫ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

АВТОРЫ:

С.С. ВЕТЛУГАЕВ,
К.Т.Н.,
ОАО «ВНИИКП»

А.А. КРЮЧКОВ,
К.Х.Н.,
ОАО «ВНИИКП»

Л.Е. МАКАРОВ,
К.Т.Н.,
ОАО «ВНИИКП»

Ю.В. ОБРАЗЦОВ,
К.Т.Н.,
ОАО «ВНИИКП»

П.В. ФУРСОВ,
К.Т.Н.,
ОАО «ВНИИКП»

М.Ю. ШУВАЛОВ,
Д.Т.Н.,
ОАО «ВНИИКП»

Несмотря на высокое качество муфт для кабелей высокого напряжения, отдельные экземпляры таких муфт в процессе эксплуатации выходят из строя. При относительно небольшой стоимости самих муфт (не более 10% от стоимости всей кабельной линии) последствия выхода из строя такой линии из-за их повреждений может привести к серьезным финансовым потерям, связанным с отключением потребителей, дополнительными раскопками и перемонтажом. Именно поэтому особенный интерес представляют исследования причин выхода муфт из строя с целью дальнейшего совершенствования конструкции и технологии монтажа.

Ключевые слова: кабельная линия; концевые, соединительные муфты; эластомерные элементы; монтаж, выравнивающий конус; электрический пробой изоляции.

Испытательный зал
ОАО «ВНИИКП»

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сетях РФ эксплуатируются концевые и соединительные муфты 11 ведущих европейских и азиатских фирм — производителей арматуры для кабельных линий (КЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 500 кВ.

Несмотря на качественное изготовление муфт для кабелей высокого напряжения, которое подтверждается положительными результатами приемосдаточных испытаний 100% выпускаемых муфт, их отдельные экземпляры в процессе эксплуатации выходят из строя. Причинами повреждений муфт могут являться недостатки их конструкций, попадание внешних загрязнений в разрядный промежуток и некачественный монтаж. Международная организация СИГРЭ в разные годы проводила опросы энергосистем по ситуации с повреждением кабелей и муфт. По результатам опроса 73 организаций из 23 стран [1], эксплуатирующих КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 69–220 кВ, повреждаемость кабеля на 100 км цепи в год составляет 0,085, повреждений соединительных муфт на 100 шт. в год было 0,007, а концевых муфт на 100 шт. в год — 0,011. При относительно небольшой стоимости муфт — до 10% стоимости КЛ, ликвидация последствий выхода из строя КЛ по причине их повреждения может приводить к серьезным финансовым потерям, связанным с отключением потребителей, дополнительными раскопками и перемонтажом.

Представляет интерес исследование причин выхода муфт из строя с целью дальнейшего совершенствования конструкции и технологии монтажа, а также учета условий их эксплуатации.

ОАО «ВНИИКП» проведена экспертиза более 50 муфт высокого напряжения 110–220 кВ, демонтированных из КЛ в энергосистемах по причине электрического пробоя изоляции. Все отказы муфт произошли в период приработки (0,5–5 лет эксплуатации). При этом проведена последовательная разборка муфт в лабораториях института с фотофиксацией, отбором проб электроизоляционной жидкости из концевых муфт и вырезанием образцов материалов из эластомерных элементов муфт. Правильность монтажа проверялась в соответствии с монтажными инструкциями фирм — производителей арматуры при последовательной разборке муфт.

КАРТИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫРАВНИВАЮЩЕГО КОНУСА КОНЦЕВОЙ МУФТЫ, СВЯЗАННОГО С НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ

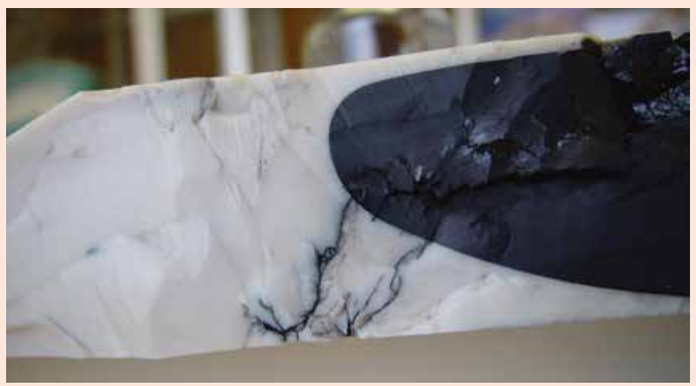

Рис. 1

КОНЦЕВЫЕ МУФТЫ

В обзорах СИГРЭ отмечена большая повреждаемость концевых муфт в сравнении с соединительными (различие более чем на 50%). В обследованных во ВНИИКП повреждениях арматуры большая доля (до 70%) также приходилась на концевые муфты. Все рассматриваемые случаи повреждений концевых муфт связаны с нарушениями положений монтажных инструкций, попаданием воды в разрядный промежуток муфты и недостатками конструкций.

Нарушения монтажных инструкций в основном связаны с некачественной обработкой изоляции кабеля при монтаже, когда на поверхности изоляции кабеля под выравнивающим конусом остаются повреждения (неровности, царапины или следы от остановки ножа для снятия экрана). При этом образуются выступы и углубления, которые приводят к снижению давления изоляции выравнивающего конуса на поверхность изоляции кабеля. В сформиро-

ванных при монтаже микрополостях возникают частичные разряды (ЧР), которые приводят к образованию триинга, прорастающего с поверхности изоляции до жилы кабеля, и пробою изоляции кабеля и выравнивающего конуса с выходом на регулирующий электрод, как показано на рис. 1.

Процесс развития электрического пробоя при этом может продолжаться длительное время: от нескольких месяцев до трех лет [2]. Длительность развития электрического пробоя зависит от скорости миграции кремнийорганической смазки, заполняющей микрополости, сформированные на поверхности изоляции кабеля под выравнивающим конусом.

При попадании загрязнений или влаги в заполняющую муфту электроизоляционную жидкость электрический пробой, как правило, развивается по поверхности выравнивающего конуса. Вода попадает в полость концевой муфты по причине отсутствия герметичности, что может быть связано как с недостатками конструкции, так и с нарушениями разделов монтажной инструкции или неоднозначностью трактовки пунктов в части подготовки масла для заполнения муфты. Эмульгированная вода или лед скапливаются в местах наибольшей напряженности электрического поля — на поверхности выравнивающего конуса. Из-за высокой продольной напряженности электрического поля в области окончания электропроводящего электрода на поверхности конуса и изоляции кабеля в загрязненном/увлажненном масле возникают скользящие разряды. Интенсивные скользящие разряды приводят к нагреву и разложению масла на поверхности изоляции кабеля (рис. 2) и увеличению тока в канале разряда, что способствует дальнейшему развитию электрического пробоя.

Факт увеличения температуры в поверхностных слоях изоляции кабеля из-за критических скользящих разрядов в области, отмеченной цифрой 2 на рис. 2, косвенно подтверждается тем, что инфракрасные (ИК) спектры, снятые с поверхности изоляции в этой области, характеризуются заметно меньшей интенсивностью полосы поглощения карбонильной группы ν(C=O) = 1742см$^{-1}$ антиоксиданта (рис. 3), что можно объяснить его повышенным расходом. ИК спектры были получены на фурье-спектрометре «ИнфраЛЮМ ФТ-801» с приставкой МНПВО.

Еще одной особенностью ИК спектров поверхностных слоев изоляции является наличие полос поглощения при 908 и 965 см$^{-1}$, относящихся к винильным группам; известно, что винильные группы в полиэтилене образуются при температуре выше 300 °С [3]. Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что поверхностные слои изоляции (на глубину менее 1 мм) подвергались кратковременному, возможно, менее 1 с, тепловому воздействию, эффективная температура которого значительно превышала 300 °С.

В представленном на рис. 4 случае электрический пробой изоляции муфты связан с попаданием воды в электроизоляционную жидкость. Еще в трех случаях попадания воды в концевую муфту наблюдалась подобная картина развития электрического разряда по поверхности выравнивающего конуса, которая характеризуется разветвленностью следов разряда. При наличии воды в электроизоляционной жидкости не всегда удается стандартными методами определить ее электрические характеристики ($E_{пр}$, tanδ) из-за значительных токов утечки. Содержание влаги для муфты с выравнивающим конусом, показанным на рис. 4, оценивалось методами термического анализа (ТГА, ДСК).

СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КАБЕЛЯ В ЗОНЕ УСТАНОВКИ ВЫРАВНИВАЮЩЕГО КОНУСА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ (1 — СЛЕДЫ МЕДНОЙ СЕТКИ ЭКРАНА; 2 — ОБЛАСТЬ СКОЛЬЗЯЩИХ РАЗРЯДОВ)

Рис. 2

ИК СПЕКТРЫ ИЗОЛЯЦИИ В ОБЛАСТИ 2 (ЧЕРНЫЙ — ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ, ФИОЛЕТОВЫЙ — НА РАССТОЯНИИ 1 ММ ВГЛУБЬ ОТ ПОВЕРХНОСТИ)

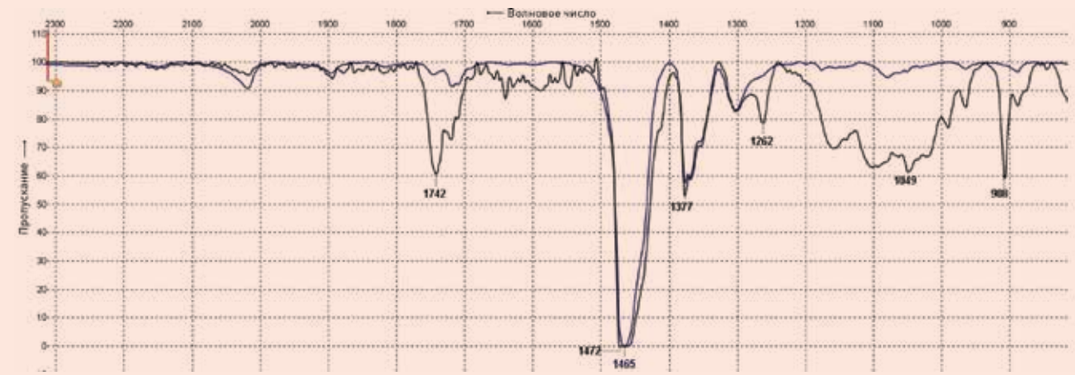

Рис. 3

КАРТИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫРАВНИВАЮЩЕГО КОНУСА КОНЦЕВОЙ МУФТЫ, СВЯЗАННОГО С ПОПАДАНИЕМ ВОДЫ В ИЗОЛЯЦИОННУЮ ЗАПОЛНЯЮЩУЮ МУФТУ

Рис. 4

Согласно данным анализа, содержание влаги в масле пробитой муфты составило 1,0%.

Вода в электроизоляционной жидкости может быть в трех физических состояниях: а) растворенном; б) в виде коллоидного раствора (эмульсии); в) в виде макровключений произвольного размера. Вода в жидком диэлектрике может переходить из одного состояния в другое при изменении температуры: при понижении температуры растворимость снижается, устойчивость коллоидного раствора утрачивается, и эмульгированная вода выделяется в виде макроскопической фазы, которая при дальнейшем понижении температуры может образовывать микрокристаллы льда. Поэтому большинство подобных случаев электрического пробоя изоляции концевых муфт произошли в холодное время года. Для исключения попадания влаги в полость концевых муфт авторами было предложено внести изменения в инструкцию по монтажу муфт, касающиеся режи-

ма термической обработки заполняющей жидкости, а также отбора проб жидкости из муфт.

Примером неудачного технического решения, принятого в концевой муфте, можно считать использование металлических хомутов для закрепления выравнивающего конуса внутри муфты, которые устанавливаются в зоне Б (рис. 5а). При этом, как показывают результаты расчета продольной напряженности электрического поля, напряженность в области Б (рис. 5б) возрастает более чем в 2,5 раза в сравнении с максимальной напряженностью в точке А на выравнивающем конусе. Такое увеличение напряженности электрического поля является критическим для разрядного промежутка концевой муфты, а в случае появления влаги и загрязнений в масле приводит к электрическому пробою изоляции муфты.

ВЫРАВНИВАЮЩИЙ КОНУС КОНЦЕВОЙ МУФТЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ 220 КВ (А) И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ЗАКРЕПЛЕНИЯ КОНУСА МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ХОМУТОМ В ОБЛАСТИ Б

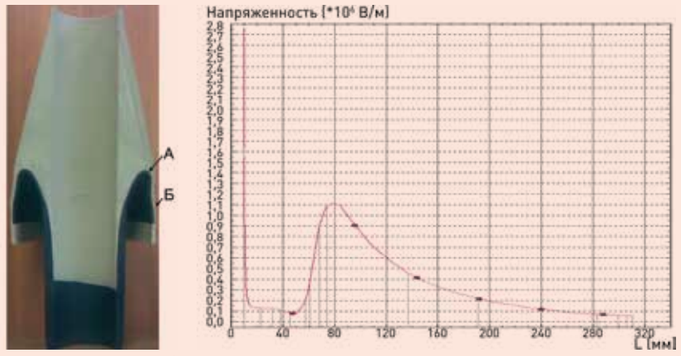

Рис. 5

СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ МУФТЫ

Во всех исследуемых во ВНИИКП повреждениях соединительных муфт электрический пробой изоляции муфт связан с ошибками и нарушениями монтажных инструкций, заводскими дефектами в изоляции муфт (один случай), а также недоработками проектных решений по применению защитных кожухов муфт.

Основной изоляционный элемент современных соединительных муфт кабелей высокого напряжения отливается из жидкой кремнийорганической резины типа LSR или резины комнатной вулканизации типа RTV и проходит приемосдаточные испытания в заводских условиях. Монтаж эластомерных элементов муфт проводят в полевых условиях на подготовленных в соответствии с монтажной инструкцией концах соединяемых кабелей. Эластомерный элемент устанавливают с натягом на кабель, и электрическая прочность границы «эластомерный элемент — изоляция кабеля» определяется давлением элемента на изоляцию кабеля. При проведении экспертизы причин повреждения соединительных муфт были выявлены следующие нарушения монтажных инструкций: недостаточное выпрямление концов кабеля, некачественная обработка поверхности изоляции кабеля и отсутствие герметизации кожуха соединительной муфты. Установка эластомерного элемента на изогнутом участке кабеля или изгиб кабеля после укладки муфты приводят к снижению давления эластомерного элемента муфты на поверхность изоляции кабеля на внутренней части радиуса изгиба на поверхности изоляции муфты. Соответственно снижение давления уменьшает электрическую прочность границы «эластомерный элемент — изоляция кабеля». В результате развития скользящих разрядов на границе «эластомерный элемент — изоляция кабеля» происходит электрический пробой изоляции, как правило, с полным перекрытием промежутка между электродами, как показано на рис. 6.

Дефекты из-за некачественной обработки поверхности изоляции кабеля и/или попадание влаги на поверхность раздела при монтаже либо эксплуатации муфты из-за плохой герметизации кожуха соединительной муфты также снижают электрическую прочность границы раздела. Если такие дефекты находятся в области края регулирующего электрода муфты 1 (рис. 7), где продольная составляющая напряженности электрического поля на поверхности изоляции кабеля является максимальной, то снижение электрической прочности поверхности раздела «изоляция кабеля — изолятор муфты» приводит к возникновению ЧР и образованию электрического триинга в изоляции кабеля. Прорастание триинга сквозь изоляцию кабеля приводит к пробою изоляции муфты и замыканию электрической дуги на регулирующий электрод.

СЛЕДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛАСТОМЕРНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ 110 КВ

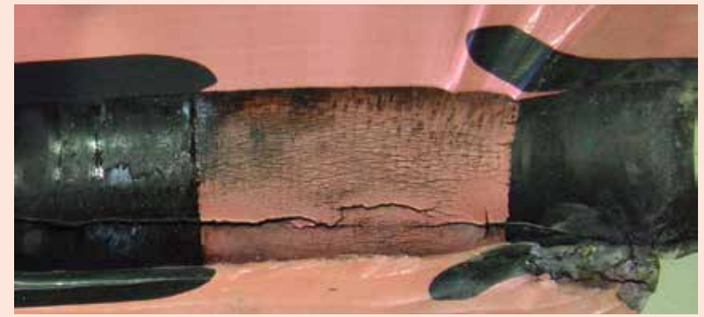

Рис. 6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ИЗОЛЯЦИИ У КРАЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА (ОБОЗНАЧЕН 1) В СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ 110 КВ

Рис. 7

Технологический дефект, выявленный при исследованиях изоляции соединительных муфт, связан с отслоением изоляции (обозначено стрелкой на рис. 8) от регулирующего электрода в соединительной муфте на напряжение 220 кВ. В практике производства соединительных муфт подготовка электродов под заливку электроизоляционной композицией (механическая обработка и тщательный осмотр) занимает значительную часть времени. Но в приведенном на рис. 8 случае, по-видимому, был допущен пропуск необработанного места, и, как следствие, адгезия материалов при заливке электроизоляционной композиции отсутствовала.

Принятая в ОАО «ВНИИКП» практика проведения экспертных исследований эластомерных элементов муфт предусматривает определение механической прочности при разрыве лопаток, содержащих границу раздела «электропроводящая — электроизоляционная резина» (рис. 9). Лопатки для оценки адгезии вырезают из эластомерных элементов муфт на границе перехода двух резин. Накопленная информация по испытаниям лопаток, содержащих границу из электроизоляционной и электропроводящей резин, используется при комплексной оценке качества эластомерных элементов муфт.

В каталогах зарубежных фирм предусматривается применение полимерных (термоусаживаемых),

ОТСЛОЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОТ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА В СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ 220 КВ (ПОКАЗАНО СТРЕЛКОЙ)

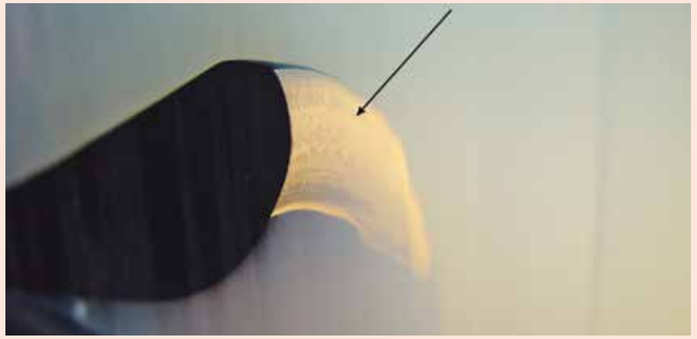

Рис. 8

ИСПЫТАННЫЙ ОБРАЗЕЦ В ВИДЕ ЛОПАТКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА «ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩАЯ РЕЗИНА — ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ РЕЗИНА»

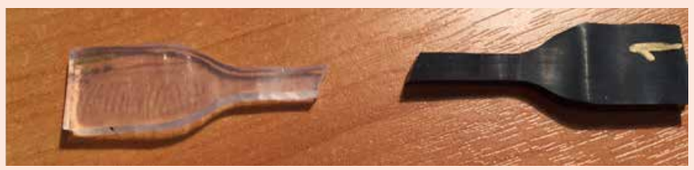

Рис. 9

а также металлических и стеклопластиковых кожухов соединительных муфт в зависимости от условий прокладки. При проведении исследований поврежденных соединительных муфт кабелей высокого напряжения эксперты ОАО «ВНИИКП» столкнулись с ситуацией ошибочных технических решений, связанных с использованием различных защитных кожухов. Так, в жестких условиях каменистого грунта соединительные муфты устанавливают без дополнительного защитного кожуха. Из-за отсутствия соответствующей внешней защиты внешнее давление от грунта, плиты и т.д. передается на изолятор муфты, что приводит к ослаблению его давления на поверхность изоляции кабеля в направлении, перпендикулярном направлению приложения внешнего усилия, и, как следствие, к пробою границы «эластомерный элемент — изоляция кабеля».

Для исключения подобных ошибок ОАО «ВНИИКП» были внесены дополнения в первую редакцию разрабатываемого АО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» национального стандарта «Кабельные линии напряжением от 6 до 500 кВ. Требования к техническому проектированию», учитывающие различные исполнения соединительных муфт.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что для увеличения надежности работы концевых и соединительных муфт кабелей высокого напряжения необходимо:

1. повышать квалификацию монтажного персонала, проводить периодическую переаттестацию персонала и обеспечивать шефнадзор за монтажными работами;
2. предусмотреть отбор проб электроизоляционного масла из концевых муфт, накапливать и анализировать информацию о показателях масла;
3. совершенствовать качество технической документации на муфты и в первую очередь монтажных инструкций с целью сделать их более четкими и однозначными для понимания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Update of service experience of HV underground and submarine cable systems, WG B1.10. April 2009. Technical Brochure 379 CIGRE.
2. Maanen V., Plet C., Wielen V. der, Meijer S., Wild F. de, Steennis F. Failures in underground power cables-return of experience, Jicable 15, Versailles 21–25 June, 2015, p. 265–269.
3. С. Мадорский. Термическое разложение полимеров. М.: Мир, 1967.