УФ-ИНСПЕКЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ: ЛУЧШЕ ОДИН РАЗ УВИДЕТЬ

ОВСЯННИКОВ А.Г., АРБУЗОВ Р.С., ТОЛЧИН В.М., ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» – СПБ «Электросетьремонт»

Для большинства видов высоковольтного оборудования отсутствие короны на металлических элементах и поверхностных частичных разрядов на внешней изоляции является необходимым, а иногда, и достаточным признаком нормальной работы. Поэтому требования по отсутствию видимой короны или на уровень радиопомех при наибольшем рабочем напряжении и нормальных атмосферных условиях испытаний присутствуют в технических условиях на многие виды высоковольтного оборудования.

Однако на оборудовании, работающем на открытом воздухе, например, на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) и на открытых распределительных устройствах (ОРУ), возникновение короны и разрядов на поверхности изоляции исключить полностью невозможно. Но и в этих случаях интенсивность разрядных процессов увеличивается по мере снижения изолирующей способности конструкции вследствие появления дефектов или загрязнения поверхности изоляции с последующим увлажнением ее туманом, росой или дождем. Таким образом, возникновение и увеличение интенсивности разрядных процессов можно использовать для оценки изолирующей способности и обнаружения дефектов.

Разрабатываемые количественные способы регистрации разрядов основываются на характерных особенностях излучения в различных частотных диапазонах. Принципиально существуют три возможных метода регистрации разрядов: акустический, электромагнитный и оптический.

Акустический способ состоит в измерениях акустического шума, генерируемого разрядными процессами, в основном, в ультразвуковой области спектра [1]. Этот способ применительно к диагностике ВЛ нашел ограниченное применение из-за недостаточной пространственной разрешающей способности, низкой помехозащищенности и чувствительности. Область его применения ограничивается оборудованием классов напряжения 3...22 кВ, т.е. там, где контроль конструкций можно проводить с близкого расстояния.

Попытки использовать электромагнитное излучение разрядных процессов для целей профилактического контроля изоляции воздушных линий электропередачи предпринимались с давних пор. Несколько приборов, использовавшихся и в нашей стране, были разработаны в ГДР [2]. Известен, также дефектоскоп Д-9 разработки ОРГРЭС [3], предназначенный для поиска пробитых фарфоровых изоляторов. Следует отметить, что простота и удобство регистрации электромагнитного излучения разрядов сочетаются с принципиально низкой устойчивостью измерительных приборов к различного рода сторонним помехам от радио- и телевизионных станций, электросварки, ВЧ-связи по проводам и др.

Из возможных способов регистрации разрядных процессов для диагностических целей оптический способ отличается наибольшей чувствительностью и пространственной разрешающей способностью [1]. Поскольку излучение разрядных процессов преимущественно сосредоточено в ультрафиолетовой части спектра, обсуждаемый метод диагностики получил за рубежом название «УФ-инспекция». Будем придерживаться этого термина и мы.

Вспоминается русская пословица о том, что лучше один раз увидеть, чем много раз услышать, хотя смысл, заложенный в пословице, был иным. А применительно к задачам диагностирования действительно важно видеть разрядные процессы, хотя бы с точки зрения защиты от сторонних помех. При этом желательно получать качественное изображение и разрядов, и контролируемого объекта, чтобы определить место расположения очага разрядной активности и, самое главное, по виду оптической картины разобраться в причинах возникновения разрядов, установить вид дефекта и спрогнозировать степень его развития и опасности для дальнейшей эксплуатации оборудования.

Разработка аппаратуры для УФ-инспекции началась более 30 лет назад. В 1985 г. был освоено производство электронно-оптических дефектоскопов «Филин-3». Они были первыми отечественными приборами гражданского назначения. Заводом «Гран» во Владикавказе было произведено более 1000 приборов. Около половины из них попало в энергосистемы и электрифицированные железные дороги страны. Другая половина разошлась по многим организациям различных отраслей промышленности и науки.

Разработка методик УФ-инспекции стартовала параллельно с выпуском приборов [4], однако по разным причинам методические указания были утверждены значительно позднее [5].

В настоящее время на российском рынке диагностической аппаратуры присутствуют дефектоскопы «Филин-6» [6] и зарубежные модели ультрафиолетовых камер [7]. Последние

Рис. 1. Корона на каплях воды (врезанный фрагмент) и на проводах линии 500 кВ в моросящий дождь (видно примерно 7–8 пролетов линии)

Рис. 2. Внешний вид короны на распорке (а) и экранах (б) воздушной линии электропередачи 330 кВ

могут работать при дневном освещении, что и дает им бесспорное преимущество при аэроинспекциях ВЛ [8]. К сожалению полного сравнения обсуждаемых приборов провести невозможно, но по некоторым параметрам такое сравнение приведено в таблице.

Если сравнивать два прибора для целей наземного обследования ВЛ, то, конечно, УФ-камера обеспечивает большее удобство и безопасность передвижения по трассе ВЛ, но уступает дефектоскопу в качестве изображения дефектного места и разрядов. В ряде случаев нам приходилось повторять ночью осмотр дефектоскопом тех мест ВЛ, в которых днем УФ-камерой была зафиксирована разрядная активность, но не была установлена причина ее возникновения. Ну, а на подстанциях обследование оборудования можно проводить и в темное время суток, а соответственно, применять для этой цели значительно более дешевый и надежный отечественный прибор.

Теперь поговорим о методиках УФ-инспекции. В методических указаниях [5] по оптическому контролю изоляции дефектоскопами предлагаются методы решения следующих задач:

- регистрация коронных разрядов и определение причин их возникновения;
- обнаружение полимерных изоляторов с развитыми дефектами;
- обнаружение опорных фарфоровых изоляторов с трещинами и внутренним увлажнением;
- определение степени загрязнения поверхности изоляции;
- обнаружение пробитых (нулевых) подвесных фарфоровых изоляторов.

В [7] те же области применения почти повторяются, но, по нашему мнению, они характеризуют скорее потенциальные возможности УФ-инспекции, которые могут остаться в ранге деклараций без получения качественной визуальной информации о разрядных процессах на контролируемых объектах и без заключения по ней квалифицированного эксперта о виде дефекта.

Таблица. Сравнительные характеристики приборов

№	Характеристика	Прибор	
		DayCorII™	Филин-6
1	Внешняя освещенность, лк	100 000	20–100[1)]
2	Чувствительность к разрядам	Одинаковая[2)]	
3	Разрешающая способность[3)]	?	1 см
4	Электропитание	12 В; 1 А	3 В; 50 мА
5	Масса, кГ	4	2
6	Относительная стоимость	10	1
7	Методические опции	нет	5 методик
	Предпочтительное применение	Аэроинспекции ВЛ	ОРУ, ЗРУ

Примечания.

[1] 20 Лк при естественном, 100 Лк при электрическом освещении.

[2] при внешней освещенности не более 20 Лк.

[3] в поле наблюдения разрядов с расстояния 25 м.

В настоящей статье мы сосредоточимся только на первой методике, чтобы показать, насколько важно видеть качественную картину разрядных явлений и понимать суть увиденного на экране того или иного прибора.

По нашему опыту, подавляющее большинство коронных разрядов не связано с возникшими в процессе эксплуатации дефектами. По тем или иным причинам оборудование (даже новое) просто «обречено» на возникновение короны.

ПРИМЕРЫ КОРОНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ВЛ

Наиболее понятный пример – корона на проводах во время дождя. Повышенная напряженность поля, инициирующая корону, возникает на каплях дождя (см. фото во фрагменте в центре рис. 1) и охватывает весь провод чехлом большого размера.

Приведенные на рис.1 и на всех последующих рисунках изображения разрядных процессов были получены с помощью электронно-оптических дефектоскопов «Филин», преимущественно «Филин-6».

В сухую погоду корона возникает в местах неправильно спроектированных или смонтированных проводов и арматуры:

- дистанционные распорки расщепленных проводов (рис. 2, а);
- провода с поврежденными во время монтажа, транспортировки или в процессе эксплуатации верхними слоями (см. очаг короны на проводе, правее распорки на рис. 2,а);
- неправильно смонтированная или деформированная арматура и экраны, составляющие расщепленных проводов ВЛ (рис. 2, б);
- места сварки шлейфов на анкерных опорах;

Рис. 3. Корона на экранах натяжных гирлянд изоляторов анкерно-угловых опор ВЛ 500 кВ

Рис. 4. Корона на острых кромках и болтах конденсатора связи (а) и на такелажной проволоке верхнего модуля трансформатора напряжения 220 кВ (б)

Рис. 5. Коронирование шлейфов в ячейках измерительных трансформаторов напряжения 220 кВ (а) и 500 кВ (б)

- ремонтные муфты (бандажи) проводов;
- искровые защитные промежутки на концевых опорах ВЛ.

Все перечисленные дефекты не представляют опасности и могут существовать весь срок службы линии, хотя и вносят свою маленькую долю в общую сумму потерь и радиопомех. Почему они возникли? Да потому что разработчик при выборе сечения проводов и, соответственно, рабочей напряженности электрического поля на поверхности проводов ориентировался на величины экономической плотности тока и напряженности начала общей короны, а локальные усиления поля на арматуре он не учитывал. Производители арматуры тоже, по-видимому, не задумывались. Это можно утверждать из российского опыта электросетевого строительства.

За рубежом можно увидеть обратные примеры. Так, при осмотре двухцепной линии 765 кВ в Южной Корее авторы статьи поразились отсутствию треска короны, столь привычного для наших линий, начиная с класса напряжения 220 кВ. Все оказалось просто: и провода большего сечения, и арматура сделана так, что острых углов на ней нет, и ни один болт, гайка или шплинт не торчит. Все детали зажимов и другой арматуры сглажены, а головки болтов и шплинты «утоплены» в тело детали и экранированы им.

К другой группе коронирующих дефектов на линии следует отнести дефекты, приобретенные в процессе эксплуатации:

- провода (шлейфы) и арматура, обожженные дугой перекрытия;
- расплетения проволок верхнего повива провода или грозозащитного троса;
- наброcы проволоки на провода и гирлянды изоляторов.

Заметим, что обнаружение очагов короны на проводе или на лодочке зажима помогает найти место перекрытия изоляции линии, а в некоторых случаях установить причину перекрытия и отключения линии. Специфическим признаком короны в местах перекрытия является почти диффузный вид, формируемый множеством микроповреждений поверхности провода или лодочки от действия дуги короткого замыкания.

Два других типа дефектов могут представлять скрытую угрозу для нормальной эксплуатации линии, потому что расплетение проволок верхнего повива или наброс проволоки большой длины может привести к перекрытию на другой фазный провод или на землю (на дерево).

Отметим также, что источники мощной короны могут генерировать радиопомехи недопустимо высокой интенсивности, и поэтому есть резон обращать на них внимание эксплуатации. Источниками мощной короны могут быть сломанные внутрифазовые распорки расщепленных проводов или экраны на анкерно-угловых опорах. На старых линиях 500 кВ они выполнялись из трех сегментов. В нормальном состоянии сегменты должны находиться в одной плоскости, образуя кольцо, но из-за поворота ВЛ они расходятся из плоскости, и конец одного из сегментов оказывается напротив третьего – четвертого изоляторов соседней гирлянды, что и приводит к усилению поля и зажиганию мощных вспышек коронных разрядов.

И совершенно парадоксальным кажется на первый взгляд критерий от-

браковки полимерных линейных изоляторов, сформировавшийся при обследовании ВЛ 220 кВ «Мутновская ГеоЭС – ПС Авача». Обследование проводили Гайворонский А.С. (СибНИИЭ) и Толчин В.М. (Электросетьсервис ЕНЭС»). При обследовании использовался тепловизор и дефектоскоп «Филин-6». На дисковых экранах большинства изоляторов наблюдалась корона. По-видимому, производитель изоляторов сэкономил на изготовлении экранов, в результате чего на них и возникала корона в нормальных условиях эксплуатации. Однако на некоторых изоляторах корона на экранах отсутствовала. Зато регистрировались разряды на поверхности оболочки выше оконцевателя, а иногда тепловизором фиксировался и небольшой перегрев в тех же местах. Оказалось, что в этих изоляторах была нарушена герметичность оболочки, влага проникла в стеклопластиковый стержень и поднялась по нему на некоторую высоту. В итоге увлажненный стержень становился проводящим и снижал напряженность электрического поля на экране, подавляя, тем самым, формирование коронных разрядов на его краях. Таким образом, изоляторы с предаварийными дефектами были отбракованы по отсутствию (!) короны.

ПРИМЕРЫ КОРОНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ОРУ

Также как и на линиях большинство оборудования было «обречено» на коронирование вследствие недосмотра проектировщика, недобросовестного монтажа или халатности оперативного персонала. Также как и на линиях, эти дефекты не несут каких-либо угроз для эксплуатации оборудования, но вносят свою лепту в уровень радиопомех и потерь энергии. Источниками короны на ОРУ могут быть:

- острые фланцы, болты, рым-болты, гайки и даже куски проволочных стропов, оставшихся со времени монтажа (рис. 4);
- заниженное сечение шлейфов, нередко встречающееся в ячейках измерительных трансформаторов напряжения (рис. 5);
- ответвительные зажимы на шинах, смонтированные впрок (рис. 6);

Рис. 6. Ответвительные зажимы на шинах 500 кВ (а) и корона на них (б)

Рис. 7. Шины с повреждением верхнего повива и корона на них

Рис. 8. Коронирующие набросы проволоки на шины

Рис. 9. Мощная корона на разомкнутых ножах разъединителя 500 кВ и на экране трансформаторного ввода 500 кВ

Рис. 10. Внешний вид поворотной колонки разъединителя 500 кВ (а) и корона на фланце опорного изолятора в ней (б)

Рис. 11. Мощная корона на нижнем фланце опорного изолятора с «водонаполненным» фарфором и термограмма этого изолятора

- шины с поврежденными во время монтажа, транспортировки или из-за коррозии в процессе эксплуатации верхними слоями (рис. 7);
- набросы проволоки (рис. 8);
- разомкнутые ножи разъединителей (рис. 9, а);
- экраны трансформаторных вводов высокого напряжения (рис. 9, б);
- фланцы разновысоких опорных изоляторов в поворотной колонке разъединителя 500 кВ (рис. 10) и др.

На рис. 11 приведен достаточно редкий случай возникновения короны на нижнем фланце одного из верхних опорных изоляторов разъединителя 500 кВ. На соседних изоляторах этого не наблюдалось. Естественно, возник вопрос: почему на одном изоляторе корона возникает, а на двух других, находящихся в тех же условиях, ее нет? Обследование конструкции тепловизором выявило нагрев верхней части изолятора. Этот достаточно редкий дефект на профессиональном жаргоне производителей изоляторов называется «водонасыщенным» фарфором. По-видимому, по какой-то причине этот изолятор не прошел должной термической обработки, и влага осталась в фарфоровом теле. Возможно также, что фарфор был пористым и «насосал» влагу через армировочный шов. Так или иначе, но вследствие низкой изолирующей способности на нижний фланец изолятора выносился высокий потенциал, что и приводило к высокой напряженности электрического поля на фланце и возникновению коронных разрядов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специалисты, занимающиеся обследованием оборудования, зачастую возлагают необоснованно большие надежды на новые приборы и методики диагностирования. Увы, без специальных знаний ни один прибор или методика не гарантируют постановку точного диагноза. Особенно это касается методов оптического контроля (в том числе, и тепловизионного). В них роль эксперта остается решающей, о чем и свидетельствуют приведенные в статье примеры.

Подчеркнем также, что эксперту важно иметь качественную изображение разрядных процессов и контролируемого оборудования. Поэтому в УФ-инспекции электронно-оптические дефектоскопы продолжают занимать достойное место из-за лучшего, чем в УФ-камерах, пространственного разрешения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *H.Zhultz, H. Zimmer.* Erfassung auberer Tailentladungen mit Restlightverstarkern und Ultrashildetectoren // Elektrizittswirtschift. – 1980. – N 19. – С. 704–708.

2. *Koske B.* Hochspannung – Isolatios – Prufftechnic. – Berlin: VEB Verlag Technic. – 1954. – 96 с.

3. *Сви П.М.* Приборы для контроля изоляции методом высокочастотной дефектоскопии // Электрические станции. – 1961. – № 12. – С. 34–36.

4. *Овсянников А.Г., Сибиряков В.Г.* Дистанционный оптический контроль дефектной изоляции ВЛ // Энергетик. – 1986. – 10. – С. 24–26.

5. Стандарт организации СТО 56947007-29.240.003-2008. Методические указания по дистанционному оптическому контролю изоляции воздушных линий электропередачи и распределительных устройств переменного тока напряжением 35–1150 кВ:/ Утв. ОАО «ФСК ЕЭС» 28.06.2005.

6. Электронно-оптический дефектоскоп (ЭОД) «Филин-6» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cnite.ru/index.html (Дата обращения 30.07.2015).

7. *Ильина Е.В., Д. Растегняев Д.Ю.* Опыт применения проборов ультрафиолетового контроля в электросетевой компании (на примере МОЭСК) // Энергоэксперт. – 2014. – 4. – С. 70–71.

8. *Дикой В.П., Левандовский А.А.* и др. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата // Энергия Единой Сети. – 2014. – № 2. – С. 16–25.