

Технические службы, занимающиеся обследованием электрооборудования (в первую очередь изоляторов на ВЛ), возлагают большие надежды на новые приборы и методики диагностирования. Увы, если персонал не получил специальных знаний, то ни один прибор и ни одна методика не помогут поставить точный диагноз оборудованию. Особенно это касается методов оптического, инфракрасного (тепловизионного) и ультрафиолетового контроля. Все приборы, используемые для такого контроля, требуют периодической проверки, что оказывается непростой задачей для эксплуатирующих организаций.

Своими знаниями о методиках проверки приемников ультрафиолетового излучения делятся наши новосибирские авторы.

СИСТЕМЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

О методиках проверки

Александр Овсянников, д.т.н.
Денис Браун, бакалавр
Новосибирский государственный
технический университет
Роман Арбузов, к.т.н.
Владимир Толчин, инженер
«Электросетьсервис ЕНЭС»,
г. Новосибирск

Небольшой опыт эксплуатации мобильных систем ультрафиолетовой (УФ) диагностики в службах электроснабжения железных дорог [1–2] и в электрических сетях [3] выявил проблему проверки (здесь и далее термин «проверка» касается работоспособности устройств, «поверка» – метрологических характеристик) работоспособности дорогостоящих УФ-камер зарубежного производства [4]. Аналогичная ситуация возникла и при внедрении отечественного дефектоскопа «Филин-6» [5].

СГОДНЯШНЯЯ СИТУАЦИЯ

В рекомендациях концерна «Энергоатом» [6] есть пункт 6.4: «Проверка технических параметров систем УФ-контроля выполняется в соответствии с инструкцией по эксплуатации на используемый тип приборных средств». В инструкции пользователя УФ-камерой DayCor Superb предписано для проверки прибор отправлять производителю. Понятно, какие трудности могут возникнуть на этом пути. Немногим лучше можно назвать и ситуацию с проверкой УФ-камер типа SonoCAM: их придется отправлять официальному дилеру – ООО «Панатест». О методике проверки этих камер речь пойдет ниже.

Определим, какие характеристики необходимо проверять? На наш взгляд, к числу обязательных нужно отнести две характеристики:

- порог чувствительности в УФ-части спектра излучения при некоторой фоновой освещенности объекта наблюдения в видимой части спектра;
- пространственное разрешение в поле наблюдения.

Кроме указанных, для УФ-камер в число обязательно проверяемых характеристик нужно включать и оценку погрешностей счета числа УФ-пятен при разных коэффициентах усиления.

Рассмотрим чувствительность фотоприемника, которая в соответствии с принципами УФ-инспекции во многом определяет успех регистрации разрядных процессов в начальной стадии развития дефекта контролируемого оборудования. Обычно проверку чувствительности производители УФ-камер детально оценивают только для головных образцов той или иной модели.

Так, например, в лаборатории компании RWE EUROTEST (Германия) для этого используется специальный высоковольтный стенд, где формируется «искусственный кажущийся заряд между металлическим шаром, заполненным элегазом, и электродом. Появление короны на электроде фиксируется УФ-камерой с определенного расстояния... В 2003 г. при испытаниях камеры DayCor компании OFIL (Израиль) при кажущемся заряде 1,5 пКл на расстоянии до камеры 8 м нижний порог чувствительности составлял 3×10^{-18} Вт/см²». Эту цитату мы взяли из [4]. Можно догадаться, что речь идет о проверке чувствительности камеры к излучению разрядов малой и контролируемой интенсивности. Неясно только, как осуществлен переход от электрической (измеряемой в пКл) к энергетической характеристике излучения (Вт/см²).

К сожалению, стабильность порога чувствительности в каждом отдельном приемнике УФ-излучения оставляет желать лучшего. Дело в том, что она сильно зависит от технологии изготовления и режимов питания элементов приемника.

В свое время для серийно выпускавшихся дефектоскопов «Филин-3» проверка была двухэтапной. Сначала выполнялась проверка чувствительности электронно-оптических преобразователей по пороговой освещенности фотокатода. Окончательная проверка чувствительности полностью собранных дефектоскопов проводилась при наблюдении излучения светодиода с минимальной интенсивностью излучения с расстояния 10 метров по простому критерию: «вижу – не вижу». По желанию покупателей приборов им обеспечивали наблюдение разрядных процессов на тарельчатом изоляторе при напряжении порядка 20 кВ на заводском испытательном стенде. И поныне при опробовании новых технических решений мы проверяем дефектоскопы, наблюдая корону или разряды на изоляторах в лаборатории или на городских линиях 110 и 220 кВ.

Но продолжим цитирование [4]: «В 2010 г. фирмой UViRCo Technologies был разработан способ метрологической проверки, не требующий сложного громоздкого и дорогостоящего высоковольтного оборудования». Проверку чувствительности УФ-камер предложено проводить по излучению абсолютно черного тела (АЧТ). В основе методики лежат законы Планка и Бугера-Бера:

$$E_0 = \frac{f(T, \lambda) \cdot S}{L^2}, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура поверхности;

λ – длина волны;

S – площадь поверхности АЧТ;

L – расстояние до проверяемой УФ-камеры.

Согласно закону Планка, если постепенно нагревать АЧТ, то можно зафиксировать минимальное значение температуры, при котором АЧТ начнет излучать ультрафиолетовый свет и УФ-камера начнет реагировать на излучение. Пороговое значение E_0 для данной температуры определяет минимальную чувствительность УФ-камеры.

Используя эту методику, ООО «Панатест» были проведены стендовые метрологические испытания для уточнения чувствительности камеры SonoCAM 6D. Было отмечено, что с ростом температуры АЧТ от 1100 °С и выше число импульсов счетчика резко (порой скачкообразно) возрастало, а разброс показаний составил от 100 до 150% и выше (от ста до нескольких тысяч импульсов в секунду).

В порядке обсуждения предложенной методики отметим, что чувствительность определялась не по яркости изображения на экране камеры относительно темного фона, как принято при оценке чувствительности электронно-оптических преобразователей (ЭОП), а по показаниям УФ-счетчика. Наверное, для оценки порога это допустимо: камера как бы «оживает», начиная с E_0 . Но с этого момента количественная характеристика явления – количество УФ-пятен (UV-spots) – становится еще более загадочной, чем это следует из описания камеры производителем.

Заметим, что в разных источниках эта характеристика имеет и другие названия: «световые импульсы» (light impulses); «события» (events); «электроразрядные процессы».

Так что это за характеристика? Количество фотонов или средняя сила света? Все ли пятна прибор считает: и мелкие, и крупные? Как связаны пятна со вспышками отдельных разрядов? с частотой их повторения? с зарядом или энергией? Чем обусловлен разброс показаний счетчика в упомянутых испытаниях камеры SogoCAM 6D? Учитывается ли, что с ростом температуры АЧТ меняется и сила света (энергия), и максимум в спектре его излучения? Как отделено влияние одного фактора от другого?

Возникают и принципиальные сомнения в корректности самих основ методики. Во-первых, излучение АЧТ постоянное во времени, а разрядные явления, подлежащие контролю, имеют импульсный характер. Во-вторых, спектр излучения разрядов линейчатый [7], т.е. резко отличается от спектра излучения АЧТ.

Наконец, воздух в пространстве между излучателем и приемником рассматривается как пассивная среда, что на самом деле не так, потому что спектр поглощения у воздуха тоже линейчатый.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для решения поставленных вопросов и поиска разумных альтернатив проверке чувствительности нами были проведены лабораторные испытания УФ-камеры DayCor Superb и дефектоскопа «Филин-6».

Часть первая

В первой части испытаний проверялось влияние частоты и мощности УФ-излучения на показания счетчика УФ-камеры. Источником излучения служил светодиод UVTOP260TO39FW, ток в котором формировался с помощью генератора прямоугольных импульсов напряжения Г5-54. Излучение светодиода имело максимум энергии на длине волны 260 нм [8], которая практически совпадала с максимумом спектральной чувствительности УФ-камеры (рис. 1). Расстояние между светодиодом и камерой составляло 2 м.

В первой серии опытов варьировалась длительность излучения светодиода. При длительности 1 мс, частоте повторения $N = 50$ имп/с (т.е. 3000 имп/мин) и минимальном токе питания светодиода 5 мА его изображение было настолько сильным, что коэффициент усиления камеры пришлось сделать минимальным: $K_{ус} = 10$. Но даже и при минимальном усилении среднее число измеренных событий было равным 4450, т.е. примерно в 1,5 раза больше действительного. При $t_{из} = 1$ мкс пришлось увеличить яркость излучения (ток через светодиод увеличили до 10 мА), чтобы получить примерно то же количество событий, но уже при $K_{ус} = 80$ (рис. 2).

В основной части этой серии экспериментов длительность импульсов была выбрана равной 0,1 мкс, что примерно соответствует длительности отдельных вспышек стримерной короны на элементах оборудования. Ток через светодиод был увеличен до 20 мА. Результаты измерений приведены на рис. 3. Видно, что более или менее разумные погрешности счета импульсов света достигались при коэффициенте усиления УФ-камеры порядка 130.

Часть вторая

Во второй серии экспериментов источником УФ-излучения служили разряды на поверхности изолятора ПС 120 А. Испытания проводились в лаборатории при расстоянии между приемниками и испытуемым изолятором около 4 м (рис. 4). Фоновая освещенность составляла примерно 200–300 лк без электрического освещения и около 600 лк при включении лампы накаливания в помещении. Испытания проводились при той и другой фоновой освещенности, при температуре 23 °С и относительной влажности воздуха 43 %. Наблюдение за поверхностными разрядами проводилось с расстояния 3,5 метра при напряжениях $U = 16, 18$ и 20 кВ_{эфф}. Изображения испытуемого изолятора с разрядами, полученные при одинаковой внешней освещенности, приведены на рис. 5.

Зависимости числа УФ-пятен от коэффициента усиления и напряжения на изоляторе приведены на рис. 6.

Часть третья

В третьей серии чувствительность фотоприемников оценивалась по излучению короны с контролируруемыми параметрами по кажущемуся заряду и частоте следования импульсов тока.

Рис. 1 • Спектральные характеристики чувствительности УФ-камеры (а) и излучения УФ-светодиода (б)

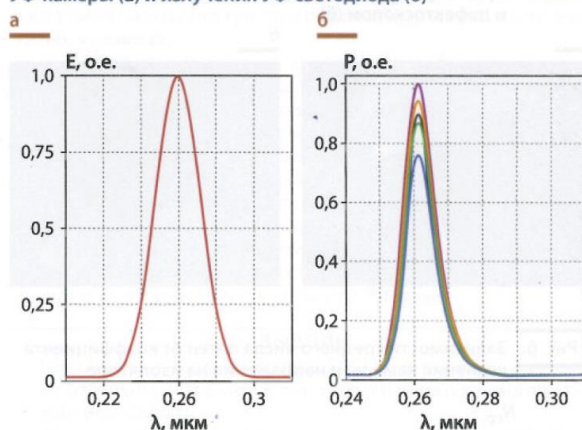


Рис. 2 • Зависимости среднего числа пятен от коэффициента усиления камеры при длительности световых импульсов 1 и 10 мкс и частоте следования $N = 3000$ имп/мин

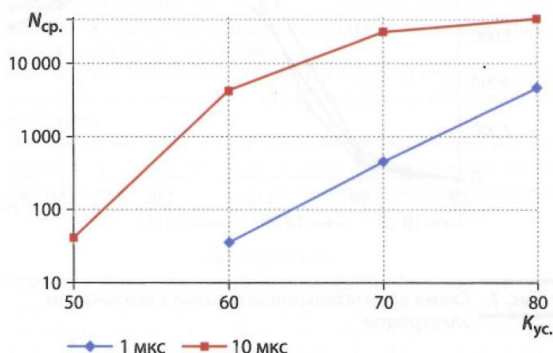


Рис. 3 • Зависимости среднего числа пятен от коэффициента усиления камеры при длительности световых импульсов 0,1 мкс и частоте повторения $N = 3000, 6000$ и 12000 имп/мин

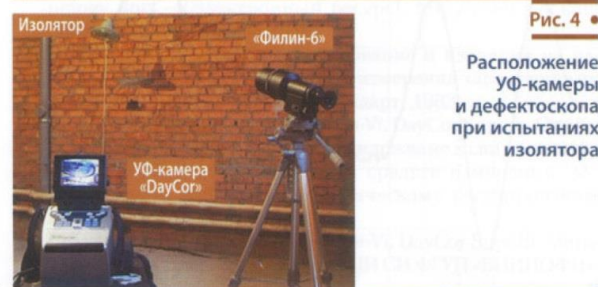
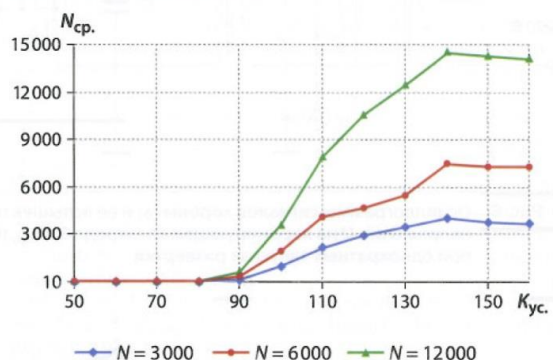
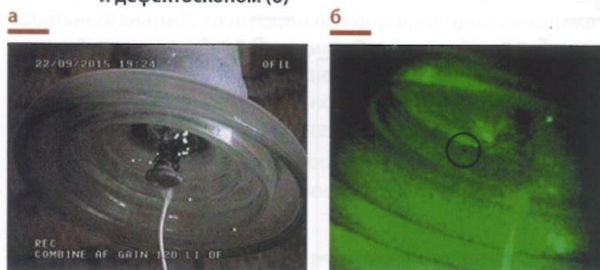
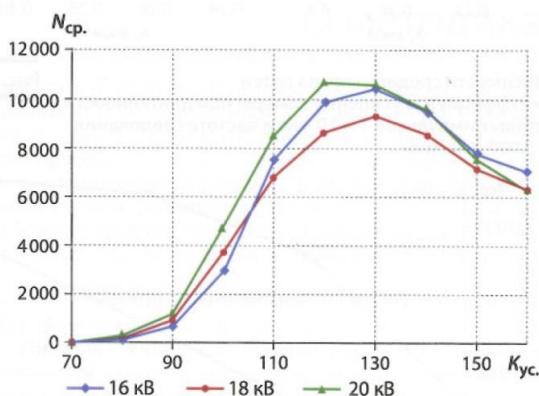


Рис. 4 • Расположение УФ-камеры и дефектоскопа при испытаниях изолятора

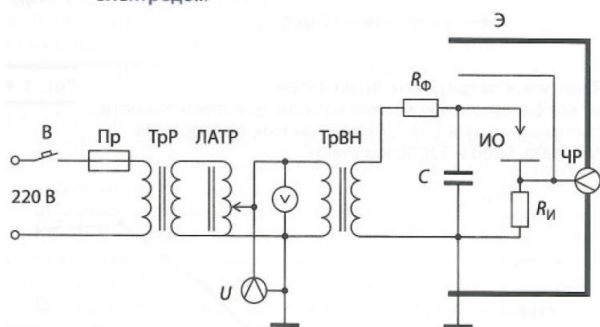
• Рис. 5. Изображения разрядов на изоляторе при напряжении 16 кВ, полученные УФ-камерой (а) и дефектоскопом (б)



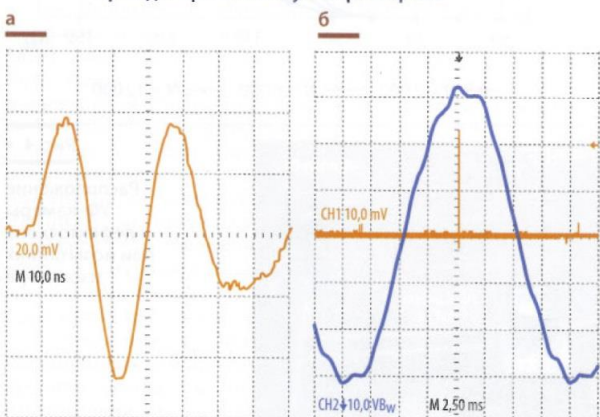
• Рис. 6. Зависимости среднего числа пятен от коэффициента усиления камеры и напряжения на изоляторе



• Рис. 7. Схема испытательной установки с игольчатым электродом



• Рис. 8. Осциллограммы сигналов короны (а) и ее всплеск при напряжении U на коронирующем электроде 3 кВ_{макс} (б) при однократных запусках развертки



► Для измерения импульсов тока короны в схему был введен конденсатор связи C емкостью 180 пФ и измерительное сопротивление $R_{\text{и}}$ (рис. 7). Для измерений использовался цифровой осциллограф TDS 2024B с верхней частотой измерения 200 МГц.

Корона возбуждалась на высоком напряжении промышленной частоты, которое прикладывалось к игольчатому электроду. Напряженность поля на острие с радиусом кривизны r , отстоящим на расстоянии H от заземленной плоскости, составляет

$$E_{\text{max}} = 2U / (r \cdot \ln(4H/r)), \quad (2)$$

где U – величина напряжения.

В соответствии с (2), уменьшая радиус кривизны, можно значительно снизить и напряжение возникновения короны. Такого же следует ожидать и для заряда в отдельных вспышках короны. В нашем случае напряжение возникновения короны на острие U составляло 3,2 кВ_{макс}. Заряд отдельных вспышек оценивался по осциллограммам сигналов отдельных вспышек короны (рис. 8а) в соответствии со стандартной методикой градуировки схемы регистрации [9] и составлял 8 ± 3 пКл. При напряжении, близком к напряжению потасания (3 кВ), корона на острие вспыхивала только вблизи амплитудного значения положительной полярности, и потому частота вспышек короны была близка к 50 имп/с (рис. 8б).

Излучение короны с указанными характеристиками УФ-камера и дефектоскоп регистрировали с расстояния 8 метров при фоновой освещенности около 50 лк. При увеличении фоновой освещенности до сотен люкс дефектоскоп резко терял чувствительность, а УФ-камера, как и ожидалось, сохраняла ее практически неизменной. Показания счетчика камеры варьировали в диапазоне $N = (1560 - 3100)$ имп/мин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Сначала затронем частные вопросы, касающиеся особенностей применения УФ-камер. Из рис. 3 видно, что более или менее точные результаты получаются при коэффициенте усиления, равном 120–130.

Весьма любопытным оказался факт снижения числа регистрируемых пятен при увеличении коэффициента усиления со 130 до 160 (рис. 3 и 6). По-видимому, в этом диапазоне усиления включается излишне сильная отрицательная обратная связь, что и приводит к минимуму снижению числа событий.

Импульсные разряды

Также можно только догадываться о том, почему число импульсов в каждом отдельном измерении было кратным 20. Наверное, реальные измерения прибором проводятся в интервале 3 секунд, а потом результат умножается на 20 электронной схемой, чтобы получить число «имп/мин».

Переходя к достоверности счета, можно предположить, что в большинстве практически важных случаев диагностирования оборудования оператор имеет дело с короткими по длительности и неявными вспышками короны, когда результат счета пятен более или менее однозначно связан с частотой повторения разрядов, а возможно, с видом и стадией развития дефекта. Однако надо помнить о сильной зависимости числа пятен от длительности излучения и яркости излучения, а в конечном счете от энергии излучения или силы света. Поэтому при оценке опасности дефекта по количеству пятен нужно строго следить за интенсивностью и площадью изображения пятен, не допуская перегрузки УФ-приемника прибора по силе света на входе.

Особенно это важно при обследовании загрязненной и увлажненной изоляции. Дело в том, что при сильном загрязнении ток утечки приобретает непрерывный характер и длительность поверхностных дужек может достигать десятка миллисекунд, а перед загоранием каждой дужки возникает пачка импульсных разрядов с длительностью и силой света значительно меньшими, чем у дужек. Поэтому, снижая чувствительность камеры при регистрации дужек, оператор должен понимать, что прибор теряет чувствительность к импульсным разрядам. Наоборот, подстраиваясь под импульсные разряды, УФ-приемник прибора окажется перегруженным при возникновении дужек. В итоге следует ожидать значительных погрешностей

в оценке разрядной активности, а следовательно, и в оценке степени загрязнения. По-видимому, с этим сталкивались авторы [3], говорившие о необходимости особого подхода к интерпретации результатов оценки загрязнения.

Разрешающая способность

Вернемся к еще одной важной характеристике, требующей проверки, – пространственной разрешающей способности. Применительно к дефектоскопам она определяется способностями объектива и электронно-оптического преобразователя. Обе характеристики можно оценить с помощью стандартных методов измерений с использованием коллиматоров и оптических микровидеокамер. Таким же образом оценивается и пространственная разрешающая способность дефектоскопа в целом. Как правило, она близка к разрешающей способности электронно-оптического преобразователя и составляет около 30 штрих/мм в центральной части экрана. В поле наблюдения реального объекта с расстояния 25 м при фокусном расстоянии объектива 130 мм разрешающая способность оказывается порядка 1 см. При этом она сохраняется почти неизменной в видимой УФ-части спектра, что позволяет идентифицировать и место возникновения, и тип разряда (коронный, поверхностный, искровой).

Для УФ-камер разрешающая способность в видимой части спектра обеспечивается объективом и фотоприемной матрицей видеокамеры. Качество видимого изображения в итоге оказывается более чем удовлетворительным из-за большего, чем у дефектоскопов «Филин-6», фокусного расстояния входного объектива.

Однако о качестве УФ-изображения разрядных процессов на контролируемой изоляции говорить по меньшей мере затруднительно. Фактически УФ-канал камер гарантирует только обнаружение разрядных процессов в виде светлых пятен на видимом изображении (сравните изображения на рис. 5), причем область возникновения этих пятен даже при оптимальном коэффициенте усиления камеры достаточно большая. Эта особенность УФ-камер не помешала аттестовать их как средство измерения [10] геометрических характеристик.

В методике поверки [11] в качестве источника УФ-излучения выбрана ртутная лампа второго разряда по ГОСТ Р 8.763-2011. Поверке подвергается «диапазон позиционирования дефекта» и «совмещение видимого и УФ каналов наблюдения». Судить о разрешающей способности фотоприемников по указанным характеристикам достаточно трудно.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕРКИ

• Стоит ли всерьез требовать государственной аттестации и соответственно ежегодных поверок УФ-камер? Недостаточно ли одной проверки чувствительности силами собственных метрологических подразделений? Ведь оценка опасности дефекта проводится экспертным образом, т.е. по определению всегда субъективна.

• В каких единицах формулировать требования к чувствительности? Строго говоря, это надо делать именно так, как это делают производители УФ-камер, т.е. в величинах заряда при некотором расстоянии от источника электрического разряда до камеры. Заметим, что «зарядная» терминология уже более века используется исследователями газового разряда и около полувека – в нормативных документах по внутренним частичным разрядам. Поэтому оценка чувствительности к излучению внешних разрядных процессов в величинах заряда представляется вполне уместной.

Напомним, что в первой редакции стандарта МЭК 60270 для целей градуировки схем регистрации частичных разрядов был рекомендован простейший имитатор – коронирующий игольчатый электрод, установленный по центру заземленной полусферы. Заметим также, что источники высокого напряжения есть в существующих испытательных лабораториях сетевых предприятий и служб электроснабжения железных дорог. Есть и операторы, допущенные к работе на этих установках. Поэтому проблема оснащения «сложным громоздким и дорогостоящим высоковольтным оборудованием» возникает только у дилеров – поставщиков УФ-камер.

К нормам на величину регистрируемого заряда и дистанцию для их регистрации, по нашему мнению, необходимо добавить еще частоту следования импульсов, например в диапазоне (50–100) имп/с, и фоновую освещенность. Послед-

няя характеризует способность приемника регистрировать УФ-излучение разрядных процессов при фоновой засветке в видимой части спектра, что почти всегда имеет место в полевых условиях.

• Можно ли для поверки характеристик фотоприемников использовать УФ-светодиоды, что весьма заманчиво и вполне реально? В пользу светодиодов говорит контролируемость и стабильность характеристик излучения, возможность регулирования энергии, длительности и частоты повторения импульсов излучения в широком диапазоне. В свою очередь это обеспечивает возможность проверки встроенного в камеру счетчика. Поверку спектральной чувствительности также легко сделать, применяя набор светодиодов с разной длиной волны излучения. Есть перспектива применения светодиодов и для поверки разрешающей способности УФ-камер.

ВЫВОДЫ

- Созданные методики поверки УФ-камер ставят целью оценку отдельных характеристик камер и имеют принципиальные недостатки.
- Для декларирования чувствительности УФ-камер в единицах кажущегося заряда необходимо использовать источник реальных разрядных процессов со схемой регистрации их тока или заряда. Можно рекомендовать в качестве источника разрядов коронирующий игольчатый электрод. При радиусе скругления острия 10–20 мкм напряжение возникновения короны составит несколько киловольт, а заряд отдельных вспышек короны – до 10 пКл.
- Для экспресс-поверки УФ-камер применение УФ-светодиодов видится наиболее универсальным и эффективным действием.
- Обе проверки могут проводить метрологические подразделения предприятий, проводящих УФ-инспекции своего оборудования. Разумеется, для этого методики проверки должны быть утверждены в установленном порядке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хананов В.В., Мизинцев А.В. и др. Мобильная система диагностики изоляторов контактной сети по ультрафиолетовому излучению // Железные дороги мира. 2006. № 9.
2. Плотников Ю.И., Федоришин Ю.М., Демидов С.В. Ультрафиолетовая диагностика изоляции контактной сети: модернизация мобильной системы // Железные дороги мира. 2009. № 5.
3. Ильина Е.В., Растегияев Д.Ю. Опыт применения приборов ультрафиолетового контроля в электросетевой компании (на примере МОЭСК) // ЭнергоЭксперт. 2014. № 4.
4. Железнов Ф.Д., Акулов В.А. и др. Методы и средства повышения достоверности ультрафиолетовой диагностики изоляции контактной сети. Часть 1 // Железные дороги мира. 2011. № 5.
5. Электронно-оптический дефектоскоп (ЭОД) «Филин-6» [Электронный ресурс]. <http://www.cnite.ru/index.html> (дата обращения 30.07.2015).
6. МД 1.3.3.99-041-2009. Методические рекомендации по раннему выявлению дефектов внешней изоляции, токоведущих частей электрооборудования АЭС с использованием средств ультрафиолетового контроля. ОАО «Концерн Энергоатом», 2009.
7. Gallimberti I., Hepworth J.K., Klewe R.C. Spectroscopic investigation of impulse corona discharge // J. Phys. D: Applied Physics. 1974. № 7.
8. UVTOP-catalogue. Веб-сайт компании SensorElectronicTechnology, Inc. – [Электронный ресурс]. <http://www.s-et.com> (дата обращения 30.05.2016).
9. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и изоляция на напряжение свыше 1000 В. Методы измерения характеристик частичных разрядов. М.: Госстандарт, 1983.
10. Дефектоскопы оптические UVolle-Vi, DayCor Superb. Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству № 54202 об утверждении типа средств измерений. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2014.
11. Дефектоскопы оптические UVolle-Vi, DayCor Superb. Методика поверки. МП 28.Д4-12. М.: ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИОФИ», 2013.