

УДК 621.311, 621.383

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ УФ-ДЕФЕКТΟΣКОПОВ

Дефектоскопические возможности ультрафиолетовой инспекции высоковольтного оборудования привлекают все большее внимание эксплуатирующих организаций. Однако внедрение методик контроля оборудования сдерживается в том числе отсутствием качественной и надежной аппаратуры отечественного производства. Дефектоскопы «Филин-6», несмотря на высокое качество картин разрядов (эпограмм), надежность в эксплуатации, доступность и небольшую стоимость, уступают зарубежным УФ-камерам в способности работать при высокой фоновой освещенности контролируемого оборудования и даже в дневное время. В статье приведены характеристики и результаты полевых испытаний новых моделей дефектоскопов: «сумеречного» — «Ф6+» — и дневного — «Ф7». Последний по основным характеристикам практически не уступает лучшим зарубежным приборам.

АВТОРЫ:

Арбузов Р.С.,
АО «Электросетьсервис
ЕНЭС»

Жарич Д.С.,
Кандауров А.С.,
Масленников А.Л.,
Центр новых инженер-
ных технологий
в энергетике

Овсянников А.Г.,
Новосибирский госу-
дарственный техниче-
ский университет

#ультрафиолетовая
инспекция; #дефек-
тоскопы; #дефекты
оборудования; #коро-
на; #поверхностные
разряды



ВВЕДЕНИЕ

Одним из требований к оборудованию высокого напряжения является отсутствие видимой короны и разрядов на внешней изоляции в нормальных (без осадков) метеорологических условиях. Разрядные процессы увеличивают потери электроэнергии, акустические и радиопомехи, вызывают старение материалов и могут привести к повреждениям отдельных узлов конструкций. Возникновение или усиление разрядной активности, как правило, связано с дефектами оборудования и поэтому должно контролироваться. По сравнению с другими возможными методами обнаружения разрядов (электромагнитный, акустический и др.), оптический метод обладает наибольшей чувствительностью и пространственной разрешающей способностью. В основе ультрафиолетовой инспекции (УФИ) лежит регистрация оптического излучения короны и разрядов на поверхности изоляционных конструкций с последующим анализом картин, места и причины возникновения разрядов. Бурное развитие метода УФИ совпало с появлением в нашем веке дневных двухспектральных УФ-камер [1, 2]. С их помощью стало просто получить картину короны и разрядов, совмещенную с внешним видом оборудования и его дефектами [3–6]. В итоге УФИ заняла достойное место в арсенале дистанционных неинвазивных методов технического диагностирования высоковольтного оборудования. По общему признанию, контроль разрядной активности методом УФИ удачно дополняет хорошо освоенный метод термографического контроля оборудования.

В России исследования оптического метода профилактического контроля стартовали в 80-х годах прошлого века и были подкреплены серийным производством дефектоскопов «Филин-3». Приборы использовали в основе электронно-оптические усилители яркости света, чувствительность которых захватывала широкий спек-

ВНЕШНИЙ ВИД ДЕФЕКТΟΣКОПА «Ф6+» С ЦИФРОВОЙ НАСАДКОЙ PARD NV007



Рис. 1.

тральный диапазон с максимумом в видимой части спектра. По этой причине их можно было использовать только в темное время суток. Дефектоскопы «Филин-6», несмотря на добротное качество картин разрядов (эпограмм), высокую надежность в эксплуатации, доступность и небольшую стоимость, уступают зарубежным УФ-камерам в способности работать при высокой фоновой освещенности и даже в дневное время. Можно сказать, что внедрение УФИ сдерживается отсутствием отечественной аппаратуры для дневного режима работы. В данной статье приведены характеристики и результаты полевых испытаний новых моделей дефектоскопов: «сумеречного» — «Ф6+» — и дневного — «Ф7». Последний по основным характеристикам не уступает лучшим зарубежным УФ-камерам.

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТΟΣКОПЫ «Ф6+»

Модернизация дефектоскопов серии «Филин» ведется в двух направлениях. Первое касается оцифровки и записи регистрируемой информации. Для этой цели в дефектоскопе была усовершенствована система оптического переноса изображения с экрана на вход либо цифровой насадки, либо цифровой камеры. В обоих случаях указанные устройства выполня-

ют функции окуляра, диктофона и записывающего устройства, причем качество изображения несколько лучше у цифровой камеры. Оператор может наблюдать изображение через окуляр насадки и записывать фотоснимки или видеоклипы на карту памяти. В режиме видеозаписи насадка может синхронно записывать и речевой комментарий оператора. Внешний вид дефектоскопов «Ф6» и «Ф6+» с цифровой насадкой (рис. 1) практически одинаков.

Второе направление модернизации состояло в повышении чувствительности фотоприемника к УФ-части спектра излучения разрядов с одновременным увеличением допустимых фоновых освещенностей, реализованное в дефектоскопах «Ф6+». Главное новшество модели «Ф6+» состоит в резком увеличении чувствительности к излучению разрядов в ультрафиолетовой части спектра. Указанное преимущество, выраженное знаком «+» в марке дефектоскопа, достигнуто введением электронно-оптического преобразователя с фотокатодом из нитрида галлия (GaN), спектральная чувствительность которого сосредоточена в УФ-части спектра. На рис. 2 отражены спектральные характеристики фотокатодов и в целом обеих моделей приборов.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОКАТОДОВ И ДЕФЕКТОСКОПОВ

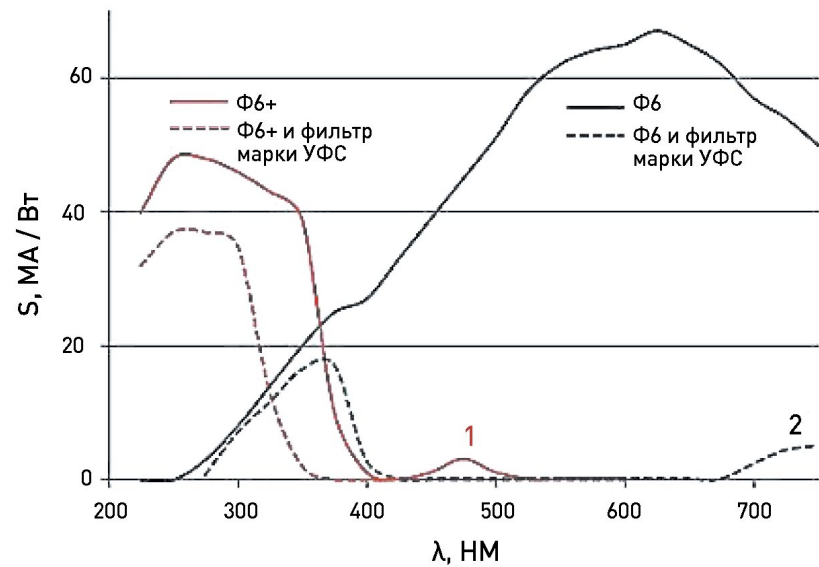


Рис. 2.

Видно, что в области спектра 250–350 нм чувствительность фотокаатода GaN и, соответственно, дефектоскопа «Ф6+» значительно выше, чем у прежней модели. Более того, за исключением небольшого (≤ 4 мА/Вт) пика 1 в диапазоне $\lambda = 450\text{--}500$ нм, новые фотокаатоды практически не чувствительны к видимой части спектра. В сочетании со светофильтрами из стандартных стекол УФС-2 [7], которые не пропускают свет в диапазоне 450–650 нм, дефектоскопы «Ф6+» обеспечивают работу в помещениях при искусственном и естественном свете, не содержащем ультрафиолетовую часть спектра (через застекленные окна) с освещенностью примерно до 300 лк в непрерывном режиме. В стробоскопическом режиме работы дефектоскоп «Ф6+» способен сохранять чувствительность к разрядам при фоновой освещенности вплоть до 1000 лк. Кроме того, для работы в испытательных лабораториях при небольших расстояниях до контролируемого оборудования была разработана компактная модель дефектоскопа «Ф6+ К». В результате модернизации прибор «похудел» на 0,4 кг и стал короче на 80 мм.

ЭПОГРАММЫ РАЗРЯДОВ НА ИЗОЛЯТОРЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИБОРАМИ «Ф6» (А) И «Ф6+» (Б) ПРИ ФОНОВОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ 30 ЛК (А) И 300 ЛК (Б)

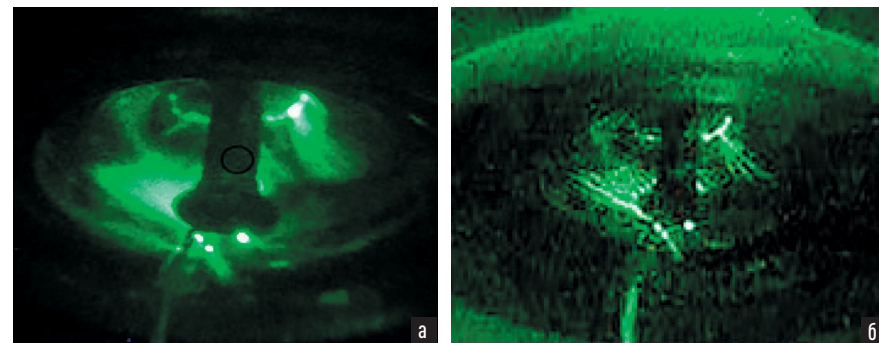


Рис. 3.

Достоинства новой модели «Ф6+» в сравнении с «Ф6» хорошо видны из сравнения эпограмм коронных и поверхностных разрядов на изоляторе ПС-120 А с разными фоновыми освещенностями (рис. 3). Визуальное восприятие картин почти одинаковое, но полученные с «Ф6+» каналы разрядов выглядят более четкими. Меньшая четкость изображения на экране «Ф6» объясняется большим временем экспозиции (1 с.), в то время как на «Ф6+» эпограммы записывались камерой с экспозицией 1/60 с. В итоге дефектоскоп «Ф6» фиксировал суперпозицию излучения десятков, а «Ф6+» — нескольких разрядов.

Эпограммы на рис. 4–7 получены дефектоскопом «Ф6+» в УФ-инспекциях в полевых условиях на открытом воздухе.

ЭПОГРАММЫ КОРОНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЛ 110 КВ

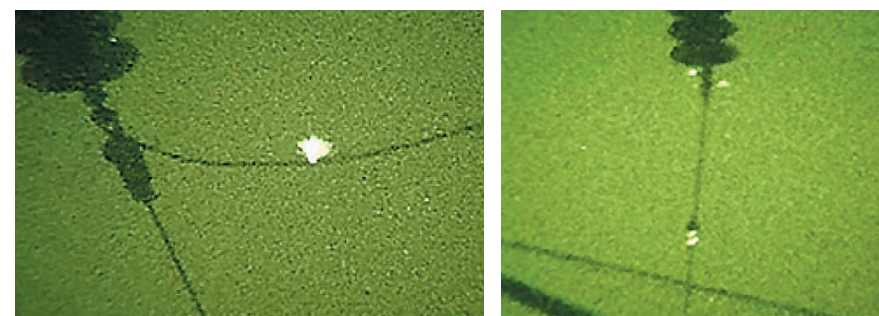


Рис. 4.

КОРОНА НА ПОВРЕЖДЕННОМ УЧАСТКЕ ПРОВОДА ШИНЫ ОРУ 500 КВ

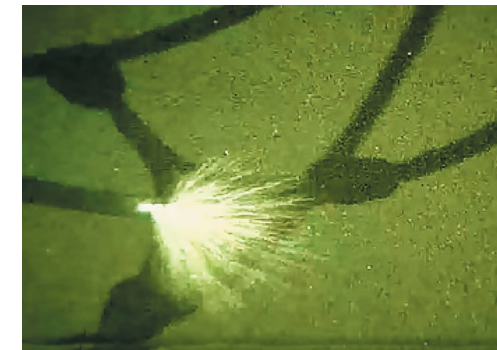


Рис. 5.

«МНОГИЕ КАМЕРЫ ИНДИЦИРУЮТ ЧИСЛО ПОДСЧЕТА УФ-СОБЫТИЙ (ФОТОНОВ) В КОРОННОМ РАЗРЯДЕ («CORONA COUNT»), ЧТО ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ПОПЫТКУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ И СИЛЕ РАЗРЯДОВ. ИНТЕНСИВНОСТЬ МЕНЯЕТСЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ И МНОЖЕСТВА ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЕДИНСТВЕННОЕ, НА ЧТО УКАЗЫВАЕТ ИНТЕНСИВНОСТЬ, — ЭТО НА ПОТЕРЮ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. ПАРАМЕТР ПОДСЧЕТА УФ-СОБЫТИЙ («COUNT») НЕ ИМЕЕТ НИКАКОГО ОТНОШЕНИЯ К МЕТОДИКЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ»

КОРОНА В УЗЛАХ ПОДВЕСКИ И РАЗРЯДЫ НА ИЗОЛЯТОРАХ ВЛ 110 КВ



Рис. 6.

ЭПОГРАММА РАЗРЯДОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКЕ (А) И ВНЕШНИЙ ВИД ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ (Б) НА КРЫШЕ ЗРУ 35 КВ

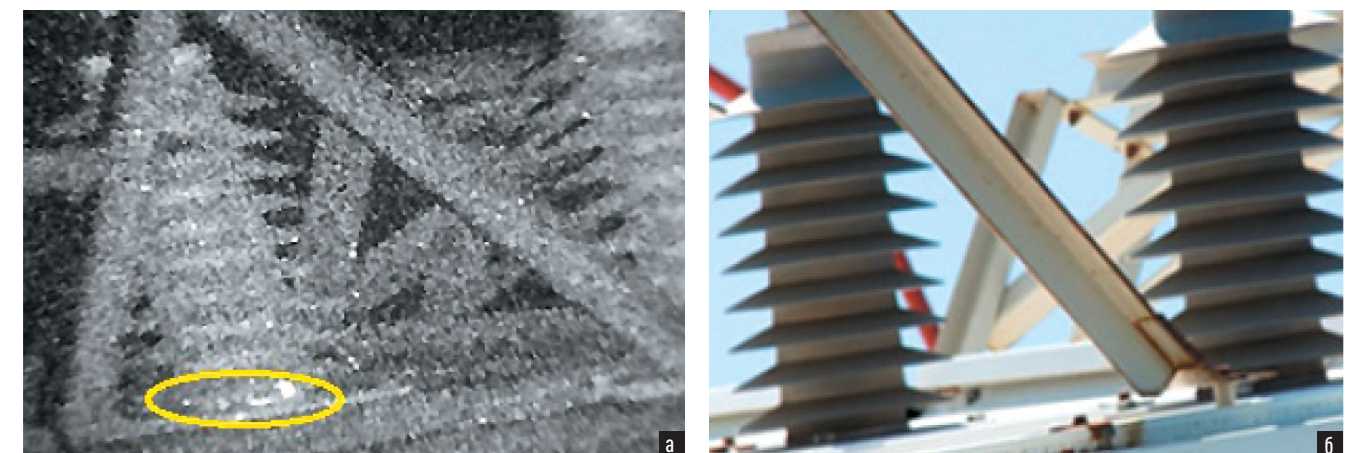


Рис. 7.

ВНЕШНИЙ ВИД ПРОТОТИПА ДЕФЕКТОСКОПА «Ф7»



Рис. 8.

Наилучшее качество изображения объекта и излучения разрядов получается при оптимальной освещенности, но, к сожалению, длительность этого периода наблюдений в полевых условиях не превышает 30 минут в вечернее и утреннее время суток. Так эпограммы коронных разрядов на поврежденном шлейфе (рис. 4 а), арматуре узла подвески и гасителе вибрации (рис. 4 б) ВЛ 110 кВ, а также короны на распорке провода ВЛ 500 кВ (рис. 5) были записаны при оптимальной фоновой освещенности.

В более темное время были получены эпограммы, приведенные на рис. 6 и 7 а. Их отличает высокая чувствительность к УФ-излучению короны, но плохая видимость объекта, усугубленная внутренними шумовыми сцинтилляциями, которые появляются при максимальном коэффициенте усиления ЭОП.

Тем не менее и эти результаты вполне годятся для оценки состояния изоляции и проводящих элементов оборудования. Более того, благодаря предельно высокой чувствительности

к УФ-спектру (на один-два порядка более высокой, чем у дефектоскопа «Ф6») у контролирующего персонала формируется убежденность в том, что все очаги разрядов были обнаружены и записаны для дальнейшего анализа, а при необходимости — тщательного визуального осмотра подозрительного места и даже дополнительных обследований. Заметим также, что период проведения УФ-инспекции дефектоскопом «Ф6+» в темное время можно при желании увеличить путем дозируемой подсветки контролируемого оборудования фонариками с УФ-светодиодами.

ДНЕВНОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ ДЕФЕКТОСКОП «ФИЛИН-7»

Предшественник дневной модели, дефектоскоп «Ф6+», показал отличные результаты в эксплуатации как «сумеречный» дефектоскоп при использовании вне помещений и полноценный прибор при работе в помещениях как с искусственным, так и с естественным дневным освещением через окна. Однако для создания «солнечно-слепого» дефекто-

скопа этого оказалось недостаточно. Непреодолимым препятствием было отсутствие светофильтра, надежно отсекающего излучения солнечного спектра и относительно прозрачного в области 250–290 нм. Решающим моментом в разработке двухспектрального УФ-дефектоскопа «Ф7», способного заменить импортные УФ-камеры фирм [1, 2], стало создание уникального светофильтра, запирающего солнечное излучение почти в миллиард раз. Внешний вид прибора приведен на рис. 8, а функциональная схема прибора — на рис. 9.

Фокусирующая система 1 обеспечивает одновременную фокусировку дневного и УФ-объективов при наблюдении разрядов на разных дистанциях. Объектив камеры видимого диапазона 2 и УФ-объектив 3 дефектоскопа расположены на одной оптической оси, что позволяет почти полностью избавиться от параллакса в видимом и УФ-каналах. Информация от УФ-объектива 3 через фильтр 4 передается на ЭОП 5 и УФ-камеру 6. Изображения видимого диапазона с камеры 2 и УФ-изображения с камеры 6 передаются в мини-компьютер 7, где

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ДЕФЕКТОСКОПА «Ф7»

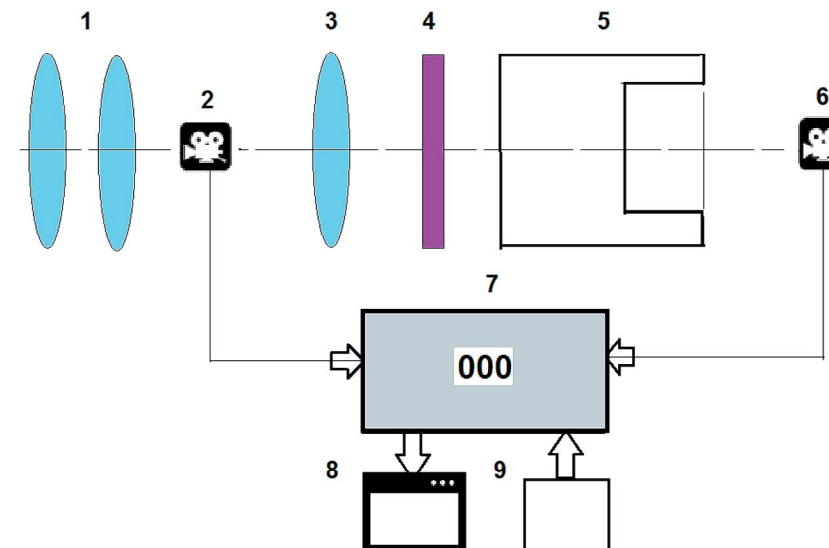


Рис. 9.

они обрабатываются, совмещаются и передаются на дисплей 8. Энкодер 9 обеспечивает регулировку яркости и контраста, вывод и управление сигнальной информацией. Одним из важнейших блоков является микрокомпьютер на базе Cortex-A53 процессора Broadcom BCM2837. Он осуществляет прецизионное «досведение» видимого и ультрафиолетового изображений программным способом, объединение изображений двух каналов, вывод графического интерфейса пользователя, а также прочие функции (сохранение изображений во внешнюю память, мониторинг заряда аккумуляторов). Основные технические характеристики дефектоскопа «Ф7» приведены в таблице.

Алгоритм работы прибора написан на языке программирования Python при помощи свободно распространяемой библиотеки машинного зрения OpenCV. На лицевой панели расположен дисплей и USB-разъемы для подключения внешней flash-памяти и зарядного устройства. На дисплей выводится значение оставшегося заряда аккумулятора, текущие дата и время, выбранные

лов» (Media), «Настройки» (Settings), перемещение по пунктам меню происходит путем прокрутки колесика управления. Элементы меню позволяют изменять режим работы прибора (смешанный, только УФ-канал, только дневной канал, усиление УФ-изображения: от 0% до 100%), совершать запись фото и видео, а также изменять некоторые настройки прибора.

Из приведенных данных видно, что по основным характеристикам (пп. 1–5 таблицы) дефектоскоп «Ф7» идентичен лучшим импортным УФ-камерам. Вместе с тем дефектоскоп пока уступает им в массогабаритных показателях и в наборе вспомогательных опций: запись звукового комментария; масштабирование видимого изображения; реализация накопительного режима УФ-изображения с малым усилением.

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ «Ф7»

Испытания прибора в полевых условиях были проведены на ОРУ-220 кВ. Первый объект — входная опора ВЛ 220 кВ с роговыми разрядниками

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОСКОПА «Ф7»

Таблица

№	Характеристика	Значение
1	Чувствительность к заряду короны, пКл	8 ¹
2	Спектральная чувствительность УФ-канала, нм	250-285
3	Фокусное расстояние объектива, мм	60
4	Разрешение фото и видео, пиксел	640×480
5	Частота кадров, кадр / с.	16
6	Рабочая температура, °С	-20...+ 35
7	Питание (4 Li-ion аккумулятора), U (В)×I (А)	3,7×3,8
8	Масса, кг	2,1
9	Габаритные размеры: Н×L×В, мм	91×275×180

Примечание: ¹ при частоте повторения вспышек 50 1/с и с расстояния 10 м

КОРОНА НА РОГОВОМ РАЗРЯДНИКЕ И ШЛЕЙФЕ ОПОРЫ ВЛ 220 КВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННАЯ ДЕФЕКТΟΣКОПАМИ «Ф7» (А) ДНЕМ И «Ф6» (Б) НОЧЬЮ



Рис. 10.

КОРОНА НА АППАРАТНОМ (А) И ОТВЕТВИТЕЛЬНЫХ ЗАЖИМАХ (Б)

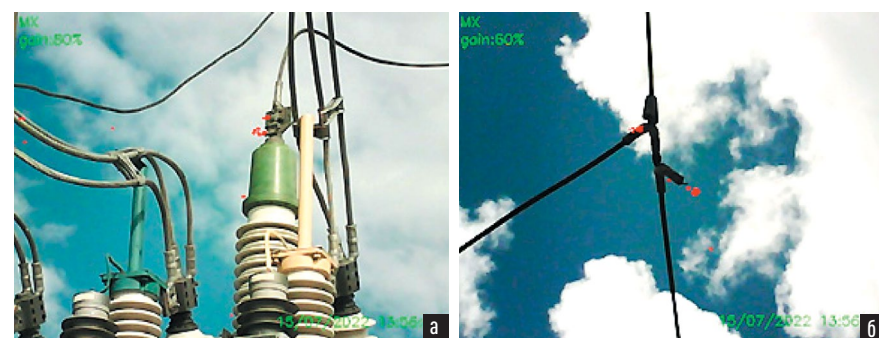


Рис. 11.

на проводах. Испытания проводились в полдень, в малооблачную погоду, при освещенности около 45000 люкс. Полученное в ходе испытания изображение приведено на рис. 10, а. Для сравнения на рис. 10, б показана зограмма того же объекта, записанная с дефектоскопом «Филин-6+» в темное время суток.

Коронные разряды на острых краях арматуры, шинах и изоляторах на рис. 11–13 получены в комбинированном режиме УФ- и видимого изображений.

В ближайшую перспективу совершенствования дефектоскопа «Ф7» входит реализация указанных выше вспомогательных опций. Задачи исследований и внедрения методических процедур включают разработку алгоритма и схемы количественной оценки интенсивности разрядов; поиск объективных критериев оценки состояния оборудования по результатам УФ-инспекции; создание экспертно-диагностической системы «УФИ» по классам напряжения 6–500 кВ и объектам «ВЛ» и «ПС»; и разработку стандарта организации «Методические указания

КОРОНА НА ШИНЕ (А) И ФЛАНЦЕ ОПОРНОГО ИЗОЛЯТОРА РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ (Б)



Рис. 12.

РАЗРЯДЫ В УЗЛЕ ПОДВЕСКИ ШИНЫ ПРИ УСИЛЕНИИ В УФ-КАНАЛЕ 30% (А) И 70% (Б)

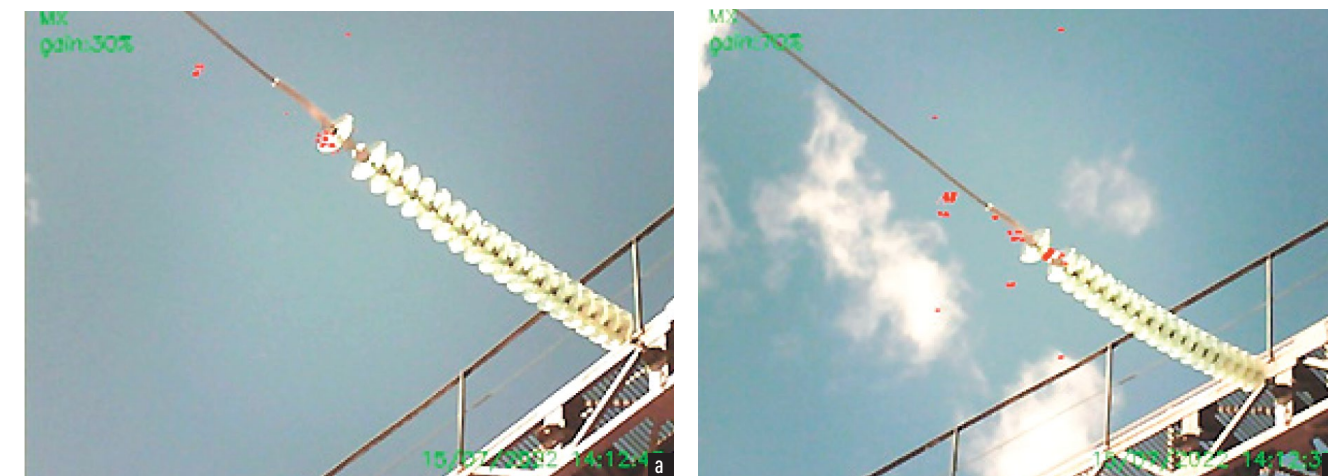


Рис. 13.

по УФ-инспекции ВЛ и ПС напряжением 10–500 кВ» в порядке замены действующего стандарта [8], дополнения к пп. 4.8, 4.20, 4.21 и 36.11 [9] и альтернативы ведомственным методическим документам [10, 11].

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моноспектральные электронно-оптические дефектоскопы «Ф6» и «Ф6+» обеспечивают реальное изображение картины разрядных процессов с детализацией вплоть до ветвления отдельных каналов стримерной короны. Модернизация конструкции дефектоскопов обеспечила функции окуляра и цифровой записи результатов инспекции голосового комментария, повысив производительность и достоверность УФ-инспекции. Дефектоскоп «Ф6+» и его компактный вариант наилучшим образом подходят для лабораторных испытаний с возможностью регулирования фоновой освещенности для оптимального качества изображения объекта и разрядов на нем. Полевые испытания двухспектрального дефектоскопа «Ф7» доказали его пригодность для дневного ультрафиолетового обследования электрооборудования. По основным техническим характеристикам прибор способен заменить импортные

УФ-камеры. Немаловажно, что все элементы дефектоскопа, кроме мини-компьютера и видеокамер, — российского производства.

ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность разработчикам электронно-оптических преобразователей и оптических светофильтров, уникальные характеристики которых обеспечили успех в разработке первого отечественного дневного дефектоскопа «Ф7».

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт фирмы OFIL Systems. URL: <https://www.ofilsystems.com/products/> (Дата обращения: 07.04.2023).
2. UViRCO Technologies. Ультрафиолетовые системы. URL: <http://www.panatest.ru/categorie?id=167> (Дата обращения: 08.04.2020).
3. Крупенин Н.В., Завидей В.И. Дистанционные методы контроля и системы дефектоскопии высоковольтной изоляции электрических аппаратов по оптическому излучению // Электротехника. 2011. № 9. — С. 12–15.
4. Вихров М.А., Петрович И.В., Милованов С.В. Оптический полиспектральный метод диагностики электроэнергетического оборудования // Энергия единой сети. 2015. № 2. — С. 50–55.

5. Дикой В.П., Левандовский А.А., Арбузов Р.С., Овсянников А.Г., Старцев В.В. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата // Энергия единой сети. 2014. № 2. — С. 16–25.
6. Овсянников А.Г., Арбузов Р.С. Ультрафиолетовая инспекция оборудования: желаемые и реальные возможности // ЭнергоЭксперт. 2020. № 2. — С. 14–21.
7. ГОСТ 9411–91. Стекло оптическое цветное. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 48 с.
8. 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.
9. Стандарт организации ПАО «Россети» СТО 34.01–23.1–001–2017 «Объем и нормы испытаний электрооборудования».
10. Методические рекомендации по раннему выявлению дефектов внешней изоляции, токоведущих частей электрооборудования АЭС с использованием средств ультрафиолетового контроля. МД 1.3.3.99–041–2009. ОАО «Концерн Энергоатом», 2009.
11. Производственная инструкция по проведению УФ-обследования внешней изоляции ВЛ и электрооборудования станций и сетей, АО «Техническая инспекция ЕЭС»: утв. 21.03.2019.