

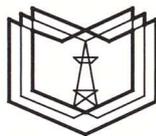


ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ, КОНТРОЛЬ, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ

Сборник статей по материалам конференции

Международная
научно-практическая конференция
и XXVIII Пленарное заседание
общественного Совета специалистов
по диагностике силового электрооборудования
при ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»

Казань
2023



**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»**

**Общественный Совет специалистов по диагностике силового
электрооборудования при
ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»**

**ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ, КОНТРОЛЬ,
ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ**

Международная научно-практическая конференция и
XXVIII Пленарное заседание общественного Совета специалистов
по диагностике силового электрооборудования при
ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»
(Казань, 12-14 сентября 2023 г.)

Сборник статей по материалам конференции

Казань
2023

УДК 621.315.61
ББК 31.234
Э45

Рецензент:

д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» ФГБОУ ВО «КГЭУ» М.Ш. Гарифуллин

Редакционная коллегия:

Э.Ю. Абдуллазянов, ректор ФГБОУ ВО «КГЭУ», канд. техн. наук;
И.Г. Ахметова, проректор по развитию и инновациям ФГБОУ ВО «КГЭУ», зав. кафедрой «Экономика и организация производства», д-р техн. наук;

В.Н. Осотов, канд. техн. наук, гл. специалист, эксперт ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг», член общественного Совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»;

А.З. Славинский, д-р техн. наук, председатель Совета директоров ООО «Масса» – завод «Изолятор», председатель Подкомитета D1 РНК СИГРЭ, представитель РФ в комитете D1 СИГРЭ, член общественного Совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»;

А.Е. Утепов, технический директор ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг», председатель общественного Совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»;

В.В. Максимов, зав. кафедрой «Электроэнергетические системы и сети» ФГБОУ ВО «КГЭУ», канд. техн. наук;

Р.С. Воркунов, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» ФГБОУ ВО «КГЭУ», канд. техн. наук.

Э45 Электроизоляционные материалы: производство, эксплуатация, контроль, импортозамещение: материалы международной научно-практической конференции и XXVIII пленарного заседания общественного Совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг» (Казань, 12-14 сентября 2023 г.) / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2023. – 224 с.

ISBN 978-5-89873-646-0

В сборнике представлены статьи по материалам международной научно-практической конференции «Электроизоляционные материалы: производство, эксплуатация, контроль, импортозамещение». Материалы охватывают широкий спектр тем, начиная от новых методов производства электроизоляционных материалов и сырья до вопросов контроля качества и эффективности их эксплуатации. Отдельное внимание уделено аспектам импортозамещения.

Предназначен для научных работников, преподавателей, студентов, магистрантов, аспирантов, специалистов и для всех, кто интересуется данной предметной областью и стремится быть в курсе последних тенденций и разработок.

Статьи публикуются в авторской редакции. Ответственность за содержание статей возлагается на авторов.

УДК 621.315.61
ББК 31.234

ISBN 978-5-89873-646-0

© ФГБОУ «Казанский государственный
энергетический университет», 2023

Оглавление

Синица М.К., Хренников А.Ю., Михайлов С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ СОГЛАСНО ПРАВИЛУ МОНТЗИНГЕРА И ЗАКОНУ АРРЕНИУСА.....	5
Дарьян Л.А., Гаврилюк В.Н. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОДГОТОВКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ.....	11
Чернышев В.А., Образцов С.А., Зинченко К.А. РЕАЛИЗАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПЕКТРА ЗНАЧЕНИЙ ВОЗВРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРА ТОКОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АБСОРБЦИИ.....	18
Козлов В.К. МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ И МЕТОДЫ ИХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ.....	28
Овсянников А.Г., Шмаков И.В., Лавров В.Ю. ПЕРЕВОД СИГНАЛОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ЗНАЧЕНИЯ КАЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА.....	37
Суханов А.Ю. ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛУЧШЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ.....	45
Быкова А.М., Жуйков А.В., Матвеев Д.А., Никулов И.И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СЛОЕВОЙ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ.....	54
Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н., Бикзинуров А.Р., Вандюков А.Е., Гиниатуллин Р.А., Чернышов В.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИК СПЕКТРОСКОПИИ ПРИ КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ МАСЛЯНОЙ И БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ.....	63
Лютикова М.Н. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ.....	86
Шутов А.А., Китанин А.В., Геворкян Н.Ю. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ, ВЫПУСКАЕМЫХ НА ОСНОВЕ ГИДРОПРОЦЕССОВ.....	91
Юдина А.А., Хренников А.Ю., Михайлов С.А., АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	95
Осотов В.Н., Утепов А.Е. ОБ ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	98
Высогорец С.П. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТИПА TRANSEC НА СИЛОВЫХ (АВТО) ТРАНСФОРМАТОРАХ РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ.....	103
Александров Н.М., Хренников А.Ю., Михайлов С.А. ДИАГНОСТИКА ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА (SFRA).....	115
Басенко В.Р., Ившин И.В. ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	123

Славинский А.З. СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ САНКЦИЙ – ШАГ К РЕАЛЬНОМУ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЮ.....	134
Славинский А.З., Филиппов А.А. РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ НА ПРИМЕРЕ КОНЦЕВОЙ МУФТЫ СУХОГО ИСПОЛНЕНИЯ 220 КВ.....	140
Ширковец А.И., Михайловский Г.Г. ПРОБЛЕМАТИКА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 35 КВ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА.....	145
Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А. ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	158
Овсянников А.Г., Кандауров А.С., Жарич Д.С., Швец Н.А. ТРЕБОВАНИЯ К ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УФ-ДЕФЕКТОСКОПОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ.....	164
Зарипов Д.К., Закиров Д.Ф., Захаров А.В. ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ РАЗРЯДОВ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ УВЛАЖНЕНИЯ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК.....	172
Ильинский И.Л. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ 1- 220 КВ, В Т.Ч. ИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЭПОКСИДНЫХ КОМПАУНДОВ	179
Кубарев А.Ю., Усачев А.Е., Бапфутвало Луи АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	182
Тукачев И.Г., Комар С.С. МЕТОДИКИ НПО «ЛОГОТЕХ» ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	188
Ярославский Д.А. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДОВ ВЛЭП И МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....	191
Зинченко К.А., Чернышев В.А., Образцов С.А. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕТАЛОБУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ МБГЧ, СОСТАРЕННЫХ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ.....	196
Завидей В.И., Ларин В.С., Зененко А.С., Солуянов Г.В. К ПРИМЕНЕНИЮ НОВОГО МЕТОДА ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И АППАРАТОВ.....	204
Кудратиллаев А.С., Райимов Р.О. ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ И ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ...	213
Монастырский А.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ГАЗОВ ИЗ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА.....	220

ТРЕБОВАНИЯ К ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УФ-ДЕФЕКТОСКОПОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Овсянников А.Г.^{1,2}, Кандауров А.С.², Жарич Д.С.², Швец Н.А.¹

1 – Новосибирский государственный технический университет

2 – Центр новых инженерных технологий в энергетике

Введение

Последние годы отмечены развитием ультрафиолетовой (УФ) инспекции дистанционным неинвазивным методом контроля внешней изоляции и проводящих элементов высоковольтного оборудования. В основе метода лежит регистрация разрядных процессов, возникающих вследствие появления дефектов на стадиях производства и монтажа или в процессе эксплуатации оборудования.

Основной трудностью при разработке УФ-дефектоскопов является подавление засветок внешними источниками, особенно, солнцем. Спектр солнечного излучения распространяется и в УФ-диапазон, вплоть до 291 нм на уровне земли. Солнечно-слепые дефектоскопы содержат два приемника, работающих в двух участках спектра. В УФ-канале излучение разрядов попадает на вход электронно-оптического преобразователя (ЭОП) после светофильтра (рис. 1), который запирает солнечное излучение почти в миллиард раз, но пропускает излучение в диапазоне $\lambda = 240-280$ нм. Далее изображение с экрана ЭОП переносится на детектор излучения, в качестве которого используется матрица приемников с зарядовой связью (ПЗС) [1] или КМОП-матрица (комплементарный металл - оксидный полупроводник). Во втором канале (на рис. 1 не показан) обычная видеокамера в видимом спектре света фиксирует изображение оборудования. Два изображения в видимом и ультрафиолетовом спектре совмещаются по специальной программе в электронной плате с хорошей геометрической точностью и передаются на дисплей, на котором наблюдается совмещенное изображение, чтобы контролирующий персонал мог определить, в каком месте оборудования возникли разряды.

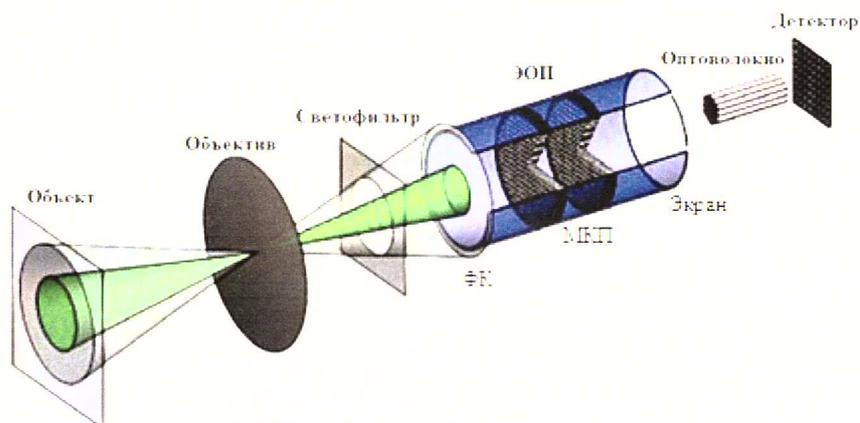


Рис. 1. Блок-схема УФ-канала с усилителем изображения (ICCD)

Понятно, что для надежной регистрации разрядов нужно иметь высокую чувствительность. Чтобы ее обеспечить, нужно добиться максимального значения отношения «сигнал – шум». С самым мощным «шумом», т.е. солнечным излучением борются запирающими светофильтрами и подбором спектральной чувствительности фотокатода (ФК) ЭОП. К сожалению, спектр излучения разрядов в атмосферном воздухе имеет максимальную интенсивность в линиях сероса возбуждения молекул азота (337,1 нм

357,7 нм), попадающих в отсекаемый спектр солнечного излучения. К тому же в рабочем диапазоне спектра 240-280 нм интенсивность излучения разрядов сосредоточена также в линиях с длинами волн 248, 256, 259, 264, 268, 272, 276, 282 нм, но с амплитудами на два порядка меньше максимальных, что видно из спектра излучения (рис. 2), измеренного с высоким разрешением на спектрофлуориметре авторами [2].

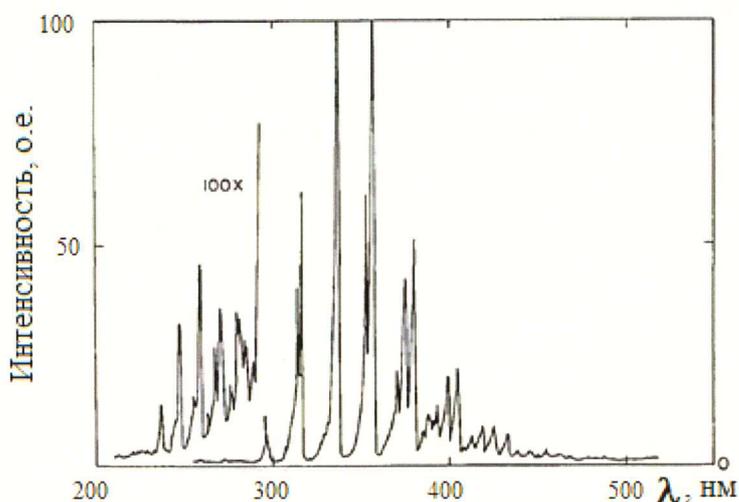


Рис. 2. Спектр излучения короны в воздухе в диапазоне 210-500 нм

Данное обстоятельство требует еще большего коэффициента усиления в ЭОП. В УФ-камерах зарубежного производства и в отечественном УФ-дефектоскопе «Филин 7» [3] оптимальное усиление достигается включением в состав ЭОП сборки из двух последовательно соединенных микроканальных пластин (МКП). При этом для оптимизации отношения «сигнал-шум» напряжение питания МКП устанавливается по умолчанию немного ниже максимального значения, при котором внутренние шумы ЭОП становятся сопоставимыми с полезными сигналами от излучения разрядов.

Основной причиной внутреннего шума в ЭОП является ионизация молекул остаточной атмосферы в объеме ЭОП и поверхностных загрязнений внутри каналов МКП. Вылетевшие из фотокатода и ускоренные напряжением питания электроны вызывают ударную ионизацию этих примесей, а образованные положительные ионы двигаются в сторону фотокатода и выбивают из него пачки вторичных электронов, которые смешиваются с исходными фотоэлектронами. В итоге в случайных местах экрана ЭОП возникают сцинтилляции, которые усложняют интерпретацию картины излучения разрядов и идентификацию дефекта.

Методики проверки чувствительности дефектоскопов

Принципиально возможны и применяются три методики оценки чувствительности, использующие в качестве эталонных излучателей светодиоды, абсолютно черное тело (АЧТ) и коронные разряды с контролируемым зарядом.

Наиболее проста оценка чувствительности УФ-приемников по излучению полупроводникового светодиода, в паспорте которого указываются практически все необходимые светотехнические характеристики. Для проверки работоспособности первых электронно-оптических дефектоскопов «Филин-3» (ночного типа) на заводе-изготовителе использовались светодиоды видимого спектра излучения с минимальным током и расстоянием обнаружения около 10 м. В [4] мы продемонстрировали возможности использования УФ-светодиодов для проверки работоспособности камеры DayCor Super B. В экспериментах варьировалась амплитуда, длительность, скважность и частота повторения импульсов тока через светодиод и, соответственно, характеристики его излучения. В ООО «ТТЦ Энергосервис» [5] использовали светодиоды, предварительно опробованные во

ВНИИОФИ, для проверки чувствительности УФ-детектора мультиспектрального комплекса наблюдения.

Вторая методика оценки чувствительности по излучению АЧТ была разработана фирмой UViRCO Technologies в 2010 г. и используется в процессе калибровки выпускаемых УФ-камер [1]. В основе методики лежит закон излучения Планка и закон Бугера-Бэра ослабления силы света с квадратом расстояния

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

где T и λ – абсолютная температура поверхности и длина волны; S и L – площадь поверхности АЧТ и расстояние до проверяемой УФ-камеры, соответственно.

Пороговое значение E_0 для данной температуры определяет чувствительность УФ-приемника. Используя эту методику, ООО «Панатест» были проведены стендовые метрологические испытания для уточнения чувствительности камеры SonoCAM 6D [6]. Чувствительность к излучению АЧТ составляла около $2 \cdot 10^{-18}$ Вт/см². Позднее эта методика была утверждена в ВНИИ оптико-физических измерений как методика проверки оптических дефектоскопов.

Заметим, что чувствительность к излучению АЧТ определялась по встроенному счетчику сигналов детектора в УФ- канале. В разных публикациях показания встроенного счетчика УФ-дефектоскопов имеют разные названия («Световые импульсы», «Фотоны», «События», «Электроразрядные процессы»), а показания счетчиков в аппаратуре различных производителей существенно отличаются друг от друга. Различия в выходных сигналах имеют даже приборы одного производителя и потому приборы проходят этап калибровки [1]. Что это за характеристика нам непонятно до сих пор? Количество фотонов, яркость или средняя сила света? Все ли «пятна» прибор считает: и мелкие, и крупные? Как связаны пятна со вспышками отдельных разрядов? С их частотой повторения? С зарядом или энергией?

Возникают сомнения и в корректности самих основ данной методики.

Во-первых, излучение АЧТ постоянное во времени, а разрядные явления на высоковольтном оборудовании, подлежащего УФ-инспекции, имеют импульсный характер. Как обосновать пересчет удельной мощности излучения разрядов в таковую от АЧТ – непонятно.

Во-вторых, линейчатый спектр излучения разрядов резко отличается от непрерывного спектра излучения АЧТ. Даже по признанию разработчиков данной методики «энергетический уровень чувствительности на самом деле должен быть измерен с настоящим источником короны, который имеет меньший спектральный состав» [1]. Результирующая чувствительность УФ-дефектоскопа определяется произведением спектральной чувствительности фотокатода ЭОП на коэффициент пропускания солнечно-слепого светофильтра на каждой длине волны. На рис. 3, а приведена примерная зависимость результирующей чувствительности УФ-дефектоскопа «Филин – 7».

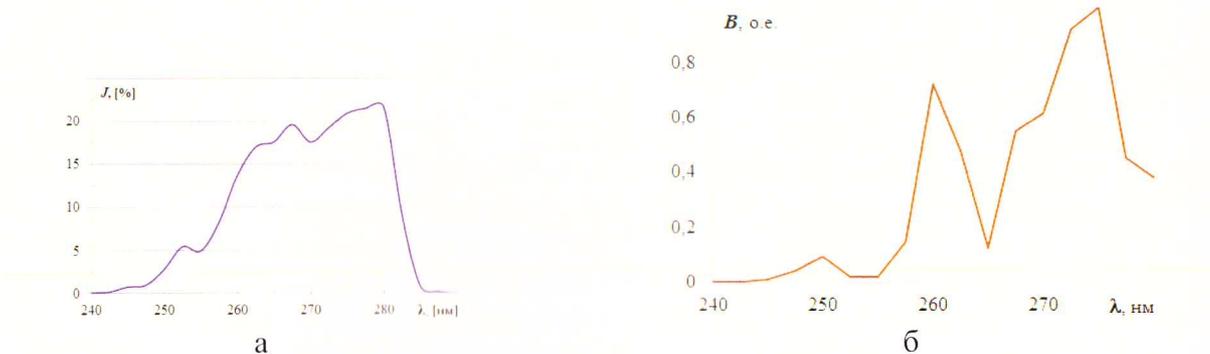


Рис. 3. Результирующее усиление УФ-дефектоскопа с солнечно-слепым светофильтром (а) и условная зависимость яркости изображения короны от спектра короны (б)

Если ее значения умножить на спектр коротковолнового излучения короны (рис. 2), то получим условную спектральную зависимость яркости сигнала на выходном экране ЭОП (рис. 3, б). Здесь термин «условная» означает, что на самом деле изображение на экране имеет спектр излучения люминофорного экрана, а яркость изображения определяется интегралом от излучения короны во всем участке регистрируемого спектра. Из рис. 3, б видно, что основной вклад в регистрируемый сигнал вносят две линии излучения короны с длинами волн примерно 260 и 276 нм.

Спектр излучения АЧТ – широкий и достаточно «гладкий», т.е. интенсивность излучения меняется монотонно с изменением длины волны (рис. 4).

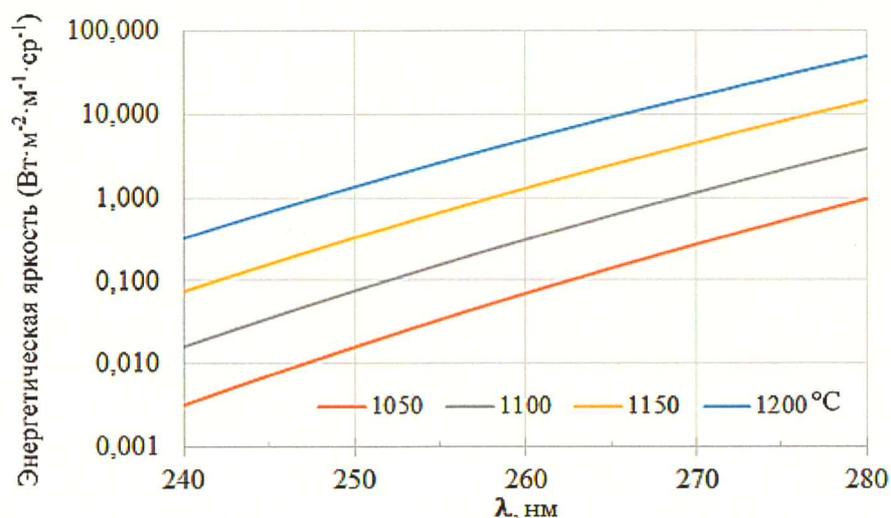


Рис. 4. Расчетные кривые закона Планка в области спектральной чувствительности УФ-дефектоскопов

Соответственно, площадь под кривой условной зависимости яркости изображения АЧТ от спектра его излучения окажется заметно больше, чем для линейчатого излучения короны.

По глубокому нашему убеждению, оценку чувствительности УФ-дефектоскопов надо проводить путем регистрации контролируемых по интенсивности маломощных коронных разрядов с разных расстояний. Так производители в рекламе УФ-дефектоскопа Luminar отмечают, что он «проходит тесты на чувствительность в независимой европейской высоковольтной лаборатории и сертифицирован на чувствительность обнаружения до 1 пКл на расстоянии 15 метров» [7]. Здесь сразу нужно отметить недостаточность указания чувствительности в значениях заряда короны без сведения о частоте повторения разрядов. Дело в том, что вспышки короны, если они возбуждаются переменным напряжением, повторяются как минимум с частотой сети при уровне напряжения немного выше порога возникновения короны, а при большем напряжении могут кратно превышать его частоту. УФ-приемник с его быстродействием, реагирует на интегральную интенсивность эталонного источника излучения, а, значит, не только на заряд, но и на частоту повторения разрядов короны. Особенно это касается режима работы дефектоскопа, называемого режимом накопления сигнала. Кроме того, конечно, нужно указывать и дисперсию заряда вспышек короны, определяемого статистикой лавинного умножения электронов [4].

Обнаружение разрядных процессов на реальном оборудовании

Вернемся еще раз к вопросу о требуемой чувствительности УФ-дефектоскопов к излучению разрядов на оборудовании высокого напряжения. Если отбросить из рассмотрения разряды на загрязненных и увлажненных изоляторах, которые имеют на порядок более мощную энергию и иной спектр излучения, то в большинстве случаев при

УФ-инспекции ВЛ детектируется стримерная корона на проводах и арматуре (рис. 5, а, б). На шинах открытых распределительных устройств интенсивность короны имеет близкие значения (рис. 5, в).

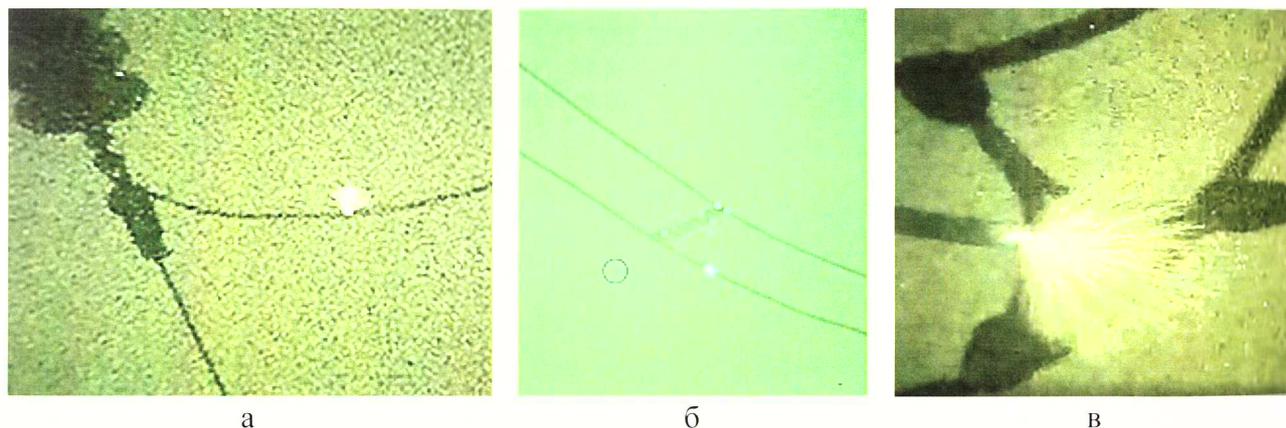


Рис. 5. Стримерная корона на шлейфе ВЛ 220 кВ (а), арматуре ВЛ 330 кВ (б) и на шине ОРУ 500 кВ (в)

Нередко регистрируются разряды на поверхности тарельчатых изоляторов (ПЧР) при повышенной относительной влажности воздуха (рис. 6). Значительно реже обнаруживаются разряды на полимерных изоляторах и не только потому, что таких изоляторов пока немного.

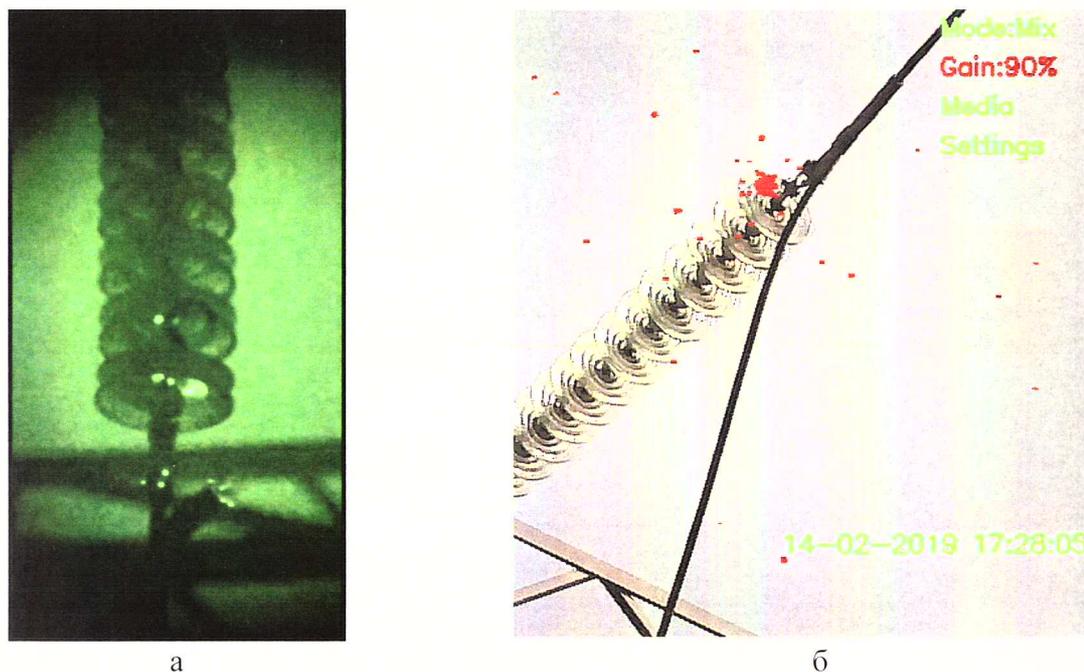


Рис. 6. Корона в узле подвески шины 220 кВ и разряды на поверхности изоляторов, полученные дефектоскопами «Ф-6» (а) и «Ф-7» (б)

Какие значения зарядов имеют вспышки стримерной короны и ПЧР? По данным [8] заряд головки стримеров в промежутках «стержень-плоскость» метрового диапазона составляет порядка 0,1 нкл, а максимальная плотность заряда по длине головки – 0,21 нКл/см. На проводах ВЛ корона имеет вид вспышки стримеров, которые, начиная с некоторой длины каналов, начинают ветвиться. Стримеры стартуют из мест с локальной напряженностью электрического поля порядка 25 кВ/см, и, если не трансформируются в лидер, то останавливаются и гаснут в зоне с напряженностью менее 5 кВ/см. По экспериментальным данным, полученным на высоковольтном стенде СибНИИГ с

полномасштабными макетами проводов ВЛ 110 – 750 кВ заряды вспышек стримерной короны составили 1-16 нКл, а длина стримеров изменялась от 1 до 12 см. Рост заряда отдельной вспышки короны с увеличением класса напряжения ВЛ объясняется именно увеличением длины стримеров в соответствии с границами зон с указанными значениями напряженности электрического поля.

Применительно к полимерным изоляторам следует различать коронные разряды на экранах, снижающих напряженность электрического поля на металлических оконцевателях, разряды на самих оконцевателях и на оболочке изолятора (рис. 7).

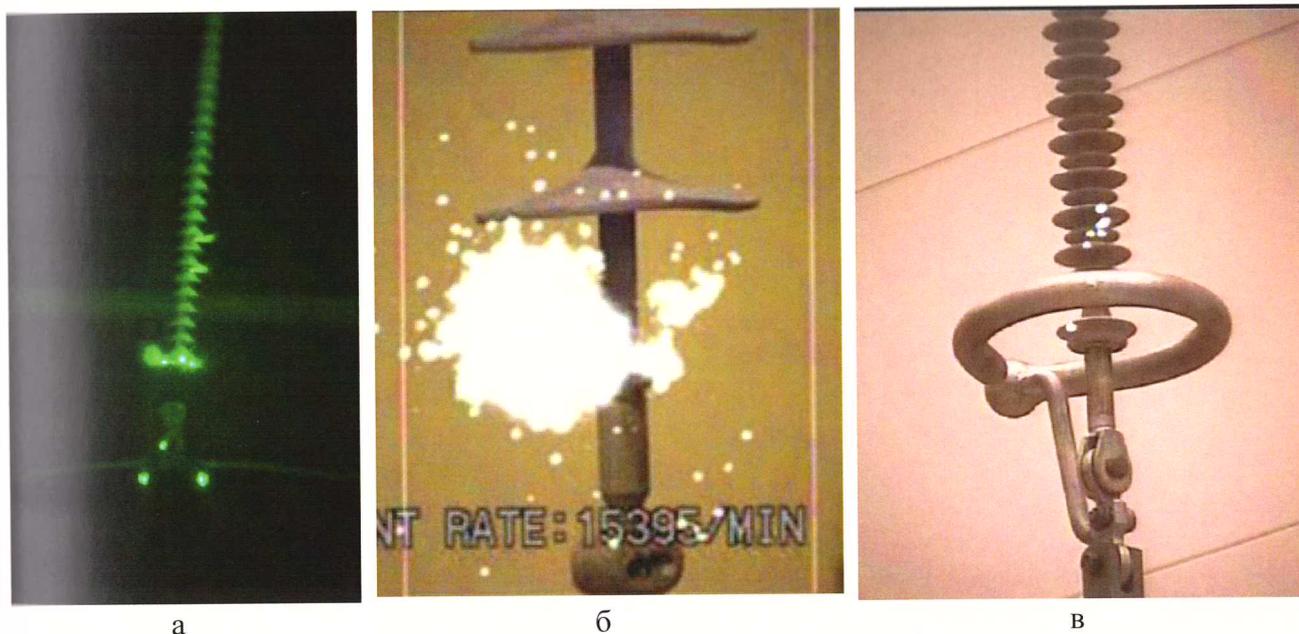


Рис. 7. Разрядные процессы на линейных полимерных изоляторах:
 а – корона на экране и зажиме провода, разряды на поверхности оболочки;
 б – корона на оконцевателе; в – разряды на оболочке

Относительно безопасна для полимерной оболочки изолятора корона на экранах. Ее вспышки имеют заряд сопоставимый с короной на линейной арматуре. Наиболее опасные и потому недопустимые разряды на оболочке могут иметь заряд от десятков до сотен пикокулон в зависимости от вида дефекта и относительной влажности воздуха. Заметим, что разряды на оболочке как правило, возникают от внутренних дефектов: при увлажнении или возникновении науглероженного трека на стеклопластиковом стержне или границе его раздела с оболочкой. Корона на оконцевателях менее опасна, чем ПЧР, но недопустима в случаях, когда разряды касаются оболочки.

Ориентируясь на приведённые значения зарядов различных разрядных процессов, определим расстояния, с которых их можно обнаружить при УФ-инспекциях оборудования. Если принять способность УФ-дефектоскопа с зарядовым эквивалентом 10 пКл при расстоянии в 10 метров, то в соответствии с законом ослабления интенсивности излучения от квадрата расстояния получим, что разряды с зарядом 1 нКл можно обнаружить с расстояния 100 м при одинаковой частоте повторения разрядов, а разряды на полимерных изоляторах с зарядом 100 пКл можно обнаружить с расстояния около 30 м.

Установка для проверки чувствительности УФ-дефектоскопов к разрядам контролируемой интенсивности

Схема установки (рис. 8) отличается от обычных схем для испытаний переменным высоким напряжением некоронирующей ошиновкой и использованием в качестве повышающего трансформатора измерительного трансформатора напряжения свободного от

внутренних частичных разрядов. При сильном искажении формы кривой низкого напряжения питание установки осуществляется через сетевой фильтр или от отдельного источника напряжения.

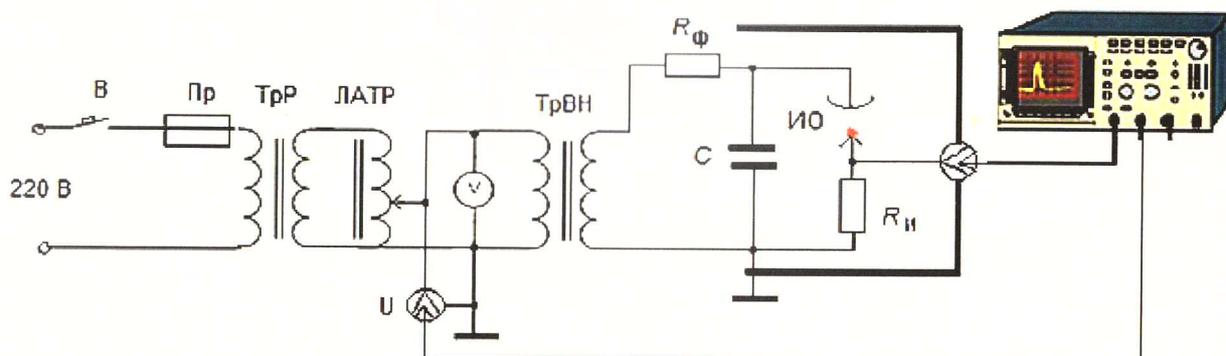


Рис. 8. Схема испытательной установки

Корона возбуждается на игольчатом электроде при воздействии высокого напряжения промышленной частоты, которое прикладывается к полусферическому электроду, размещенному соосно и над коронирующим электродом. Уменьшая радиус кривизны острейшего электрода, можно значительно снизить напряжение возникновения короны и заряд в отдельных вспышках короны. Заряд отдельных вспышек измеряется с помощью интегрирования импульсов тока с помощью резистора $R_{И}$ и цифрового осциллографа. Частота повторения разрядов короны регулируется величиной высокого напряжения и контролируется по осциллограммам напряжения и тока короны.

Выводы

1. Для оценки чувствительности наиболее просто использовать в качестве источника излучения УФ-светодиод с регулируемыми и контролируемыми параметрами. Вместе с тем можно рекомендовать проверку чувствительности по разрядам короны с контролируемой интенсивностью (зарядом и частотой повторения) как наиболее адекватную разрядным процессам на inspected оборудовании высокого напряжения.
2. Для обнаружения короны на дефектах проводов ВЛ, шин ОРУ ПС и арматуре, а также поверхностных частичных разрядов на тарельчатых изоляторах ВЛ и ОРУ ПС классов напряжения 110 кВ и выше чувствительности УФ-дефектоскопов в зарядовом эквиваленте 1 нКл с расстояния 25 метров хватает гарантировано.
3. Для обнаружения поверхностных частичных разрядов на оболочках полимерных изоляторов ВЛ требуется чувствительность примерно на порядок лучше, т.е. 100 пКл.

Список литературы

1. C.J. Coetzer, H.J. Vermeulen and B.M. Herbst. Aspects that need to be considered for the calibration of Ultra Violet solar blind cameras used for electrical inspection // University of Stellenbosch, Departments of Electrical and Electronic Engineering, Applied Mathematics. – 2022.
2. F. Grum and L.F. Costa. Spectral emission of corona discharges // Applied Optics. – 1976. – Vol. 15, No 1. – pp. 76 – 79.
3. Арбузов Р.С., Жарич Д.С., Кандауров А.С., Масленников А.Л., Овсянников А.Г. Повышение эффективности контроля высоковольтного оборудования с помощью УФ-дефектоскопов // Энергия Единой Сети. – 2023. – № 2 (69). – С. 32 – 39.
4. Овсянников А.Г., Браун Д.А., Арбузов Р.С., Толчин В.М. О методиках проверки приёмников ультрафиолетового излучения // Новости электротехники. - 2016. – № 4 (100). – С. 42–45.

5. ООО ТЦ Энергосервис. Мультиспектральный комплекс. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://ttc-es.com/https>: (Дата обращения 18.07. 2023).
6. Плотников Ю.И., Милованов С.В., Петроченко И.В., Демидов С.В. Повышение эффективности дистанционных обследований изоляции электрифицированных линий железных дорог с использованием уф- дефектоскопа SogoCam 6D при пеших обходах // [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.panatest.ru/print?id=uv-stat-2&type=static> (Дата обращения 18.07. 2023).
7. Портативная УФ-камера DayCor Luminar // [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://ofilsystems.com/pro/luminar/> (Дата обращения 18.07. 2023).
8. Белоедов И.П., Иванов А.В., Колечицкий Е.С., Ларионов В.П. Измерение заряда стримерных образований положительного импульсного разряда // Электричество. – 1981. - № 6. – С. 46 – 48.

Научное издание

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ, КОНТРОЛЬ, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ

Международная научно-практическая конференция и
XXVIII Пленарное заседание общественного Совета специалистов по
диагностике силового электрооборудования при
ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»
(Казань, 12-14 сентября 2023 г.)

Сборник статей по материалам конференции

Под общей редакцией ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова

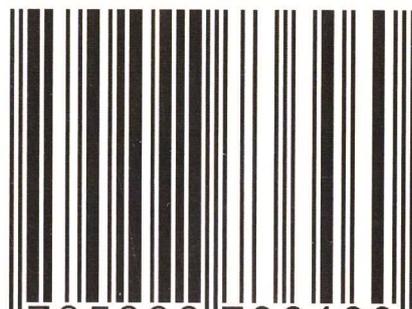
Авторская редакция

Корректор *Р.С. Заринова*
Компьютерная верстка *Р.С. Зариновой*

Научное издание
Усл. печ. л. 8,66. Уч. изд. л. 12,67.

Центр публикационной активности КГЭУ
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

ISBN 978-5-89873-646-0



9 785898 736460 >