

**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.)

Электронный 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;

О.В. 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

ПРОБЛЕМАТИКА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 35 кВ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

*Ширковец Андрей Игоревич, канд. техн. наук, заместитель директора по науке,
Михайловский Геннадий Геннадьевич, начальник диагностической лаборатории,
ООО «Болид», г. Новосибирск*

Введение

Взамен традиционного метода испытаний выпрямленным напряжением [1], для оценки технического состояния (ТС) кабельных линий (КЛ) 6-35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), во избежание их массового отказа, применяются щадящие испытания напряжением промышленной или сверхнизкой частоты (СНЧ) [2, 3]. Однако любые высоковольтные испытания являются разрушающим методом контроля, позволяющим выявить лишь грубые дефекты на строительных длинах и в муфтах КЛ и, следовательно, не закрывающими необходимый объем контроля ТС. Между тем это необходимо для предупреждения аварий и отказов, связанных с повреждением кабелей и кабельной арматуры в электрической сети. Поэтому регламентные работы по испытаниям дополнены целым рядом неразрушающих методов проверки конструктивных элементов КЛ (табл. 1). Следует отметить, что для КЛ напряжением 110 кВ и выше задачи всестороннего контроля, объемы, нормы и критерии интерпретации испытаний и измерений, включая непрерывное диагностирование параметров частичных разрядов (ЧР), традиционно проработаны существенно глубже, чем для КЛ в распределительных сетях напряжением до 35 кВ.

Оценка ТС КЛ должна сопровождаться сравнительным анализом результатов измерений и испытаний, включая соответствие диагностических критериев референсным значениям и разработку предложений по дальнейшей эксплуатации (усиленный контроль, внеплановые испытания, повторное диагностирование через 1-5 лет, вывод в ремонт и т.д.). Практическая значимость этой задачи подтверждается многолетней практикой диагностирования КЛ с изоляцией СПЭ в сетях до 35 кВ со снятием рабочего напряжения. Если ухудшение состояния изоляции СПЭ выявляется в ходе повторного обследования, то с прогнозированием срока до отказа возникают объективные сложности, связанные с необходимостью более тщательного отслеживания тренда изменения каждого параметра с частотой большей, чем раз в 1 – 2 года, а также учетом условий эксплуатации и ретроспективы. На помощь могли бы прийти методы онлайн-диагностирования (мониторинга под рабочим напряжением), опирающиеся на непрерывное измерение ЧР и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) в кабельной изоляции СПЭ. Однако для сетей напряжением 35 кВ и ниже средства мониторинга ЧР в КЛ не находят широкого применения. Как правило, у эксплуатационного персонала возникают затруднения в интерпретации текущих результатов такого мониторинга, например в случаях, когда гистограммы показателей ЧР показывают нестабильность кажущегося заряда в разных точках, тренды интенсивности ЧР отличаются в разные периоды времени, фильтрация помех дает разные результаты в зависимости от текущего спектра их частот и т.д. Определяющим фактором является большое число КЛ в распределительных сетях и сложность их охвата даже полноценным объемом типовых испытаний. Поэтому оснащение КЛ 6-10 (35) кВ устройствами мониторинга ЧР, в отличие от линий 110 кВ и выше, нельзя назвать целесообразным и экономически оправданным.

Таблица 1

Сравнение методов контроля технического состояния КЛ с изоляцией СПЭ на напряжение до 35 кВ*

№п/п	Метод контроля	СТО 34.01-23.1-001-2017 ПАО «Россети» [3]	Стандарты организаций (Россети Ленэнерго, Россети Сибирь и др.)
1.	Визуальный	Не регламентирован	Да, для доступных участков КЛ
2.	Тепловизионный	Не реже 1 раза в 3 года (при возможности проведения под нагрузкой), п. 35.16	Да, по нормам РД
3.	Измерение сопротивления изоляции	Не требуется, но допускается, п. 35.1	Нормирован коэффициент абсорбции
4.	Измерение рабочей емкости кабеля	Да, по нормам РД	Да, по нормам РД
5.	Измерение сопротивления с проверкой целостности жил и фазировка	Да, по нормам РД	Да, на основе рефлектографии с определением фактической длины
6.	Методы испытания напряжением промышленной и сверхнизкой частоты	Да, с расширенным диапазоном времени и приложенного напряжения для напряжения СНЧ относительно ГОСТ 34834, п.10.6 (ранее ГОСТ Р 55025-2012)	Да, для СТО после 2013 г. в соответствии с ГОСТ 34834, п.10.6 (ранее ГОСТ Р 55025-2012), ранее – аналогично СТО ПАО «Россети»
7.	Метод испытания повышенным выпрямленным напряжением	Не допускается, ввиду непригодности для полимерной изоляции (опасность каскадного повреждения КЛ из-за накопленных при испытании объемных зарядов).	
8.	Метод измерения параметров и локализация ЧР	Предусмотрен только для кабельных муфт линий напряжением 110 кВ и выше, п. 35.15 (критериев оценки результатов нет)	Да, с критериями оценки результатов
9.	Метод интегральной оценки увлажнения изоляции (измерение tgD)	Нет, косвенно можно отнести к комплексному диагностическому обследованию, п. 35.18 (требований и критериев оценки нет)	

*Примечание: «по нормам РД» - имеются в виду действующие нормы [1]

Накопленный с 2011 г. авторами статьи опыт обследования более 700 КЛ напряжением до 35 кВ включительно позволяет сделать следующее заключение. Выполняемый разово или периодически контроль ЧР и tgδ и анализ соответствующих параметров, к которым относятся величина кажущегося заряда, напряжение возникновения ЧР, места скопления, интенсивность импульсов ЧР, набор значений tgδ в диапазоне $U_0 \dots 2U_0$, позволяют сделать однозначное заключение о состоянии линии только в противоположных случаях хорошего (без отклонений) или, наоборот, критического (предаварийного) состояния изоляции. Все остальные, «промежуточные» случаи требуют постановки КЛ под усиленный контроль,

предусматривающий в том числе повторные испытания для отслеживания «скорости» ухудшения ТС изоляции. Точность оценки состояния линии на основе диагностирования показателей ЧР и измерений $\text{tg}\delta$ также зависит от объема дополнительных сведений о конкретной КЛ – срока ее эксплуатации, нагрузки относительной номинальной, зафиксированных ранее отказов. Ввиду множества влияющих и взаимосвязанных факторов, способов прогнозирования вероятного срока безаварийной эксплуатации КЛ до настоящего времени не найдено, хотя даже приблизительная оценка остаточного ресурса КЛ будет крайне востребована эксплуатирующим персоналом для управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) кабельных сетей 6-35 кВ, поможет обеспечить аварийный запас кабелей и арматуры для оперативного восстановления нормальной схемы электроснабжения при отказах оборудования.

Известны методы диагностирования КЛ с изоляцией СПЭ на основе регистрации параметров ЧР электрическим или, реже, акустическим методом. Для имеющих многолетний опыт применения в России систем диагностирования КЛ производства SEBA KMT (в наст. время – Megger) (Германия) и BAUR (Австрия), эксплуатирующихся преимущественно в составе мобильных кабельных лабораторий, выработаны методические подходы к оценке результатов технического обследования [4, 5]. В целом основные задачи диагностирования изоляции КЛ можно сформулировать следующим образом:

- выявление и устранение дефектов на ранней стадии их развития, снижение количества аварий на КЛ,
- проверка качества монтажных работ за счёт проведения диагностирования после ремонта или при вводе КЛ в эксплуатацию,
- продление срока эксплуатации КЛ с невыработанным ресурсом изоляции,
- уменьшение затрат на аварийно-восстановительные работы за счёт перехода к обслуживанию КЛ по ТС.

Комплексное диагностирование и сравнительный анализ разных показателей ТС позволяет достоверно выявить предаварийные состояния элементов КЛ (рис. 1).

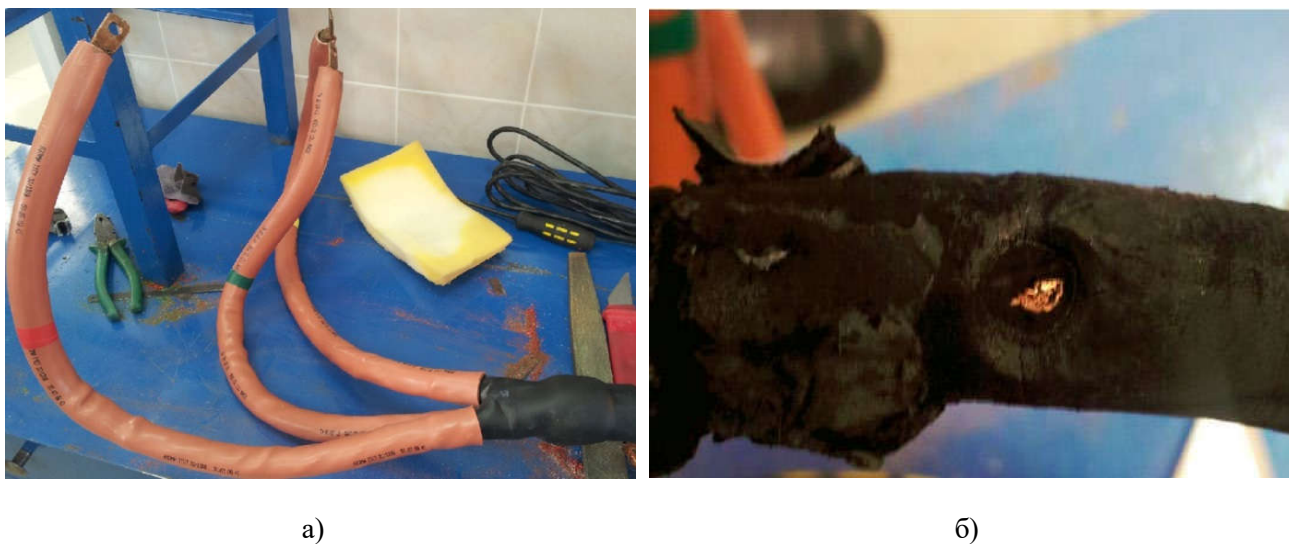


Рис. 1. Фотографии концевой муфты, повредившейся через две недели после диагностирования с выявлением предаварийного состояния (а) и места ее пробоя (б) в ячейке КРУ-10 кВ

Разнородность нормативной документации

Измерения $\text{tg}\delta$ нормированы ГОСТ 12179-76 (2003) [6]. Задача определения $\text{tg}\delta$ для КЛ является относительно тривиальной и может быть решена с помощью измерительных мостов

переменного тока, рассчитанных на соответствующую емкость жил кабеля относительно «земли».

Методические основы измерения ЧР, которые применяются в практике эксплуатации высоковольтного электрооборудования, приведены в ГОСТ 20074-83 [7] и ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) [8], который устарел, содержит методологические неточности и требует пересмотра или отмены [9]. В значительной мере это связано с необходимостью его кардинальной переработки на основе действующей редакции 2015 г. (IEC IEC 60270: 2000)/Amd.1: 2015). Оптимальным вариантом видится разработка полностью отечественного нормативного документа по измерению ЧР. Такая необходимость продиктована, во-первых, наличием обширных российских исследований в этой области (см., например [10, 11, 12]), во-вторых – выходом в 2024 г. очередной редакции МЭК 60270. Перенимать опыт действительно важно, однако «гармонизация» зарубежных стандартов в форме ГОСТ Р часто сводится к простому копированию – при серьезных отличиях от МЭК в терминологии, методологии, практике применения. При этом разработки инженеров и ученых России (в данном случае в области диагностирования высоковольтного оборудования) разработчиками гармонизированных стандартов, к сожалению, обесцениваются.

Особенностью существующей отраслевой документации является отсутствие единых требований и критериев оценки результатов диагностирования КЛ с изоляцией СПЭ. Исключением является применяемый для КЛ 110 кВ и выше стандарт организации СТО 56947007- 29.060.20.170-2014 [13, пп. 10.17], в котором при измерениях под рабочим напряжением, в том числе, в случае проведения непрерывного диагностического мониторинга изоляции КЛ, нормируется величина кажущегося разряда или амплитуды напряжения повторяющихся ЧР.

В области кабельных сетей 6-35 кВ и для диагностирования КЛ со снятием напряжения измеряемые параметры ЧР стандартами, действующими в электроэнергетике, не нормируются. Поэтому эксплуатирующие организации зачастую разрабатывают и используют внутренние стандарты, решающие эту задачу комплексно. Примером может служить нормативный документ ПАО «Ленэнерго», принятый в 2012 г. и предусматривающий системный подход к вводимым в эксплуатацию КЛ на всех этапах жизненного цикла, начиная с выбора параметров линии и заканчивая ее ТОиР и критериями замены [14]. Тем не менее, актуальным остается вопрос, насколько корректно можно классифицировать ТС КЛ среднего напряжения и регламентировать соответствующие нормы диагностирования в отраслевом стандарте. Это связано с тем, что получаемые в конкретных измерениях результаты могут весьма сильно отличаться для разных КЛ в зависимости от ряда условий:

- применяемый метод регистрации ЧР (метод затухающих колебаний или метод на основе приложения синусоидального напряжения СНЧ),
- ток нагрузки относительно номинального значения и график изменения нагрузки по фидерам и по участку сети в целом,
- способ прокладки (в траншее, по эстакаде, в ряд, треугольником),
- конструкция КЛ и арматуры (кабели трехжильные, одножильные, с круглыми и секторными жилами, бронированные и без брони, муфты с термоусадкой и холодной усадки и пр.),
- срок эксплуатации под напряжением, число и параметры КЗ, при которых аварийный ток протекал по линии,
- ретроспектива аварийных отказов и ремонтов,
- схема транспозиции и заземления экранов и др.

Вероятно, из-за этого до настоящего времени не создан национальный стандарт по неразрушающему контролю КЛ с изоляцией СПЭ методами технического диагностирования. При этом в целом положительной можно считать практику применения ГОСТ 34834-2022 [2, п. 10.6], который содержит единые нормы щадящих испытаний повышенным напряжением КЛ до 35 кВ с изоляцией СПЭ, исключаящие приложение выпрямленного напряжения. Достаточно подробной, регламентирующей 5 видов состояния оборудования на основании индекса ТС, определяемого по параметрам функциональных узлов по балльной шкале оценки с весовыми коэффициентами, является Методика Минэнерго России [15]. Однако она

применяется для линий электропередачи 35 кВ и выше (судя по Приложению 2, поз.309-329 таблицы – главным образом для линий 110 кВ и выше) и не содержит критериев диагностирования по характеристикам ЧР и tgδ.

Проблематика оценки технического состояния КЛ

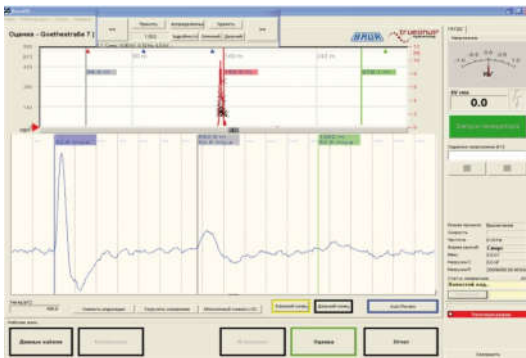
В настоящем исследовании рассматриваются вопросы, возникающие при выполнении и анализе результатов измерения уровней ЧР с их локализацией и определения относительных значений tgδ для КЛ напряжением до 35 кВ на диагностическом комплексе РНГ-80 PD/TD разработки ВАУР, Австрия. Эти методы реализованы на основе обнаружения сигналов ЧР при приложении напряжения СНЧ 0,1 Гц с последующей компьютерной обработкой с помощью встроенных алгоритмов для автоматизированной калибровки, ВЧ фильтрации, программной обработки с графическим отображением результатов (рис. 2). Для подключения испытательного оборудования к диагностируемой КЛ и проведения измерений используются схемы, в стилизованном виде приведенные на рис. 3-4.



а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Внешний вид кабельной лаборатории на базе шасси УРАЛ (а) и автоматизированной системы диагностирования в ее составе (б), скрин программы обработки и визуализации результата (в) и пример предаварийного состояния концевой муфты КЛ 10 кВ на гистограмме ЧР (г, напряжение возникновения ЧР – 3 кВ, частота следования – 1,76 ед/с, уровень 1700 пКл при низкой увлажненности - tgδ в норме)

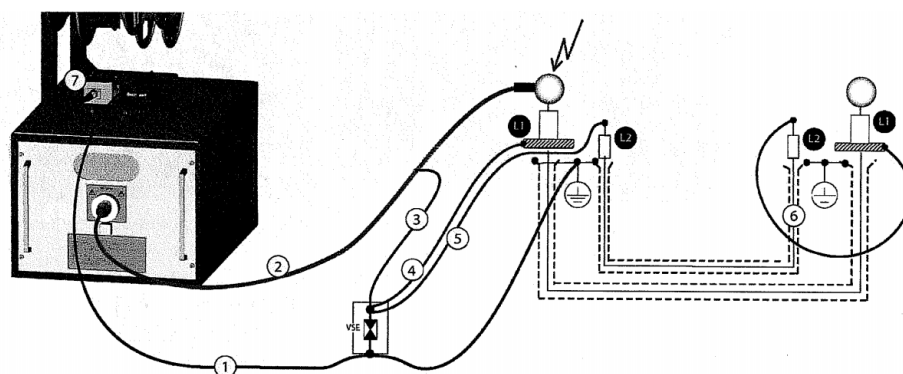


Рис. 3. Подключение диагностической установки для измерения $\text{tg}\delta$, где 1 – концевое соединение блока PHG, 2 – высоковольтный соединительный кабель (BVCK), 3 – присоединение устройства – экран BVCK, 4 – присоединение устройства – экран на ближнем конце КЛ, 5 – присоединение устройства – экран на дальнем конце КЛ, 6 – обратная линия от дальнего конца КЛ (фаза со снятым напряжением), 7 – розетка для внешнего аварийного блока

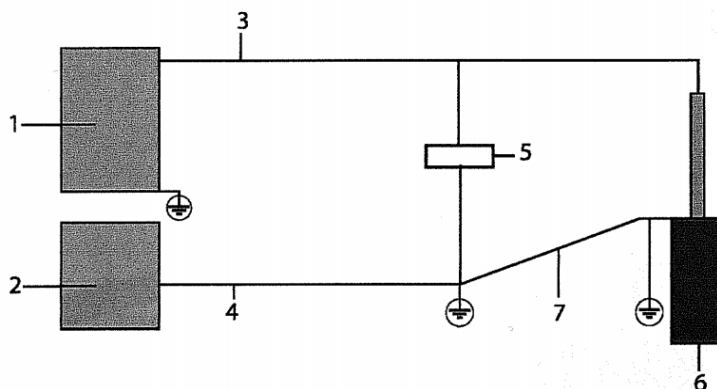


Рис. 4. Подключение диагностической установки для измерения напряжения возникновения, уровня и интенсивности ЧР, где 1 – блок СНЧ-генератора установки PHG, 2 – регистратор ЧР, 3 – BVCK, 4 – измерительный VNC-кабель, 5 – развязывающий конденсатор, 6 – испытываемая КЛ, 7 – заземление для предупреждения индуктивных помех

Решение задачи правильного измерения параметров ЧР осложняется рядом факторов. С одной стороны, важны характеристики применяемого оборудования – чувствительность высокочастотных датчиков и частота дискретизации компьютеризированной системы регистрации, с другой – электромагнитная обстановка на конкретном объекте, определяющая уровень помеховых сигналов различной частоты. При изготовлении силовых кабелей класса выше 3 кВ их изоляция подлежит обязательным испытаниям на измерения уровня ЧР при испытательных напряжениях $(1,5-2,0)U_0$, где U_0 – фазное напряжение кабельной линии относительно «земли». Например, для силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией на номинальное переменное напряжение U_0/U (фазное/линейное напряжения): 3,6/6; 6/10; ... 21/35 кВ уровень ЧР, измеренный на строительной длине при переменном напряжении $2U_0$ частотой 50 Гц по ГОСТ 34834 – 2022 [2], должен быть не более 10 пКл, а на образцах кабеля – не более 5 пКл. Между тем электромагнитная обстановка на объекте измерения в эксплуатации может потребовать калибровать (градуировать) систему регистрации ЧР на измерения от минимальных значений в диапазоне 100...5000 пКл, в зависимости от спектра и амплитуды помех (рис. 5).

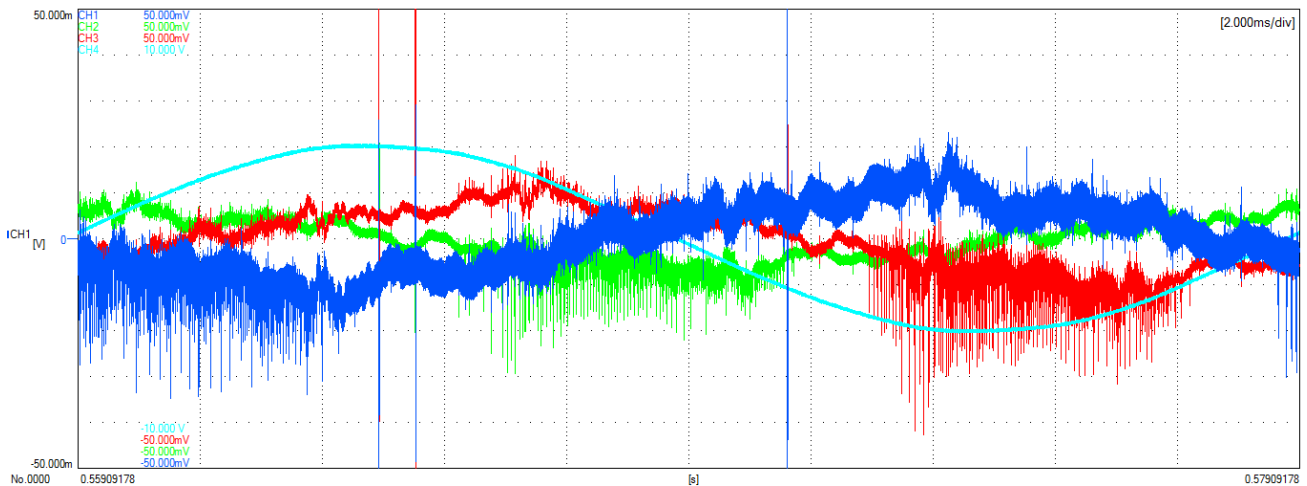
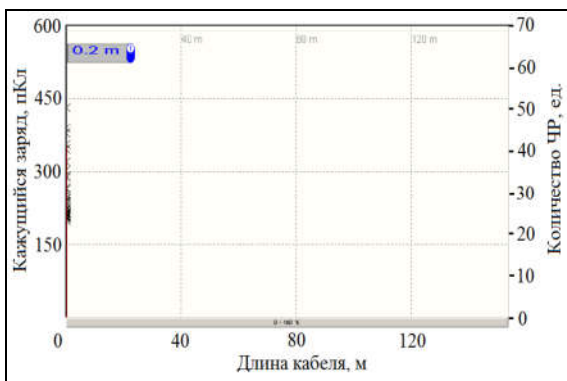
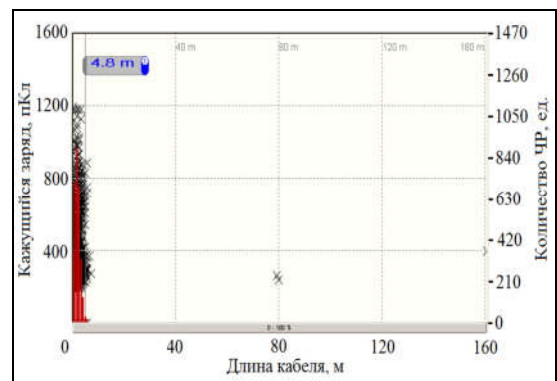


Рис. 5. Пример оциллограммы сигналов с высокочастотных датчиков ЧР под рабочим напряжением (фазы “А, В, С” –синий, зелёный, красный; опорное напряжение частоты 50 Гц фазы “А” - голубой) без фильтрации помех

При этом важно правильно интерпретировать результаты измерений и не «отфильтровать» по ошибке полезный сигнал, особенно при повторном обследовании: уровни и интенсивность регистрируемых ЧР могут существенно увеличиться из-за старения изоляции и развития дефектов в ней. На рис. 6 приведены гистограммы, демонстрирующие увеличение среднего уровня кажущегося заряда в месте скопления ЧР в среднем в 3 раза, а частоты следования импульсов ЧР – в 20 раз, по истечению двухлетнего срока с постановки КЛ под напряжение и под нагрузку. Следует отметить, что период порядка 1,5-2,0 лет после ввода линии в эксплуатацию, является «сроком приработки», в течение которого выявляется большая часть дефектов, заложенных при монтаже и приемо-сдаточных испытаниях КЛ с изоляцией СПЭ.



а.)



б.)

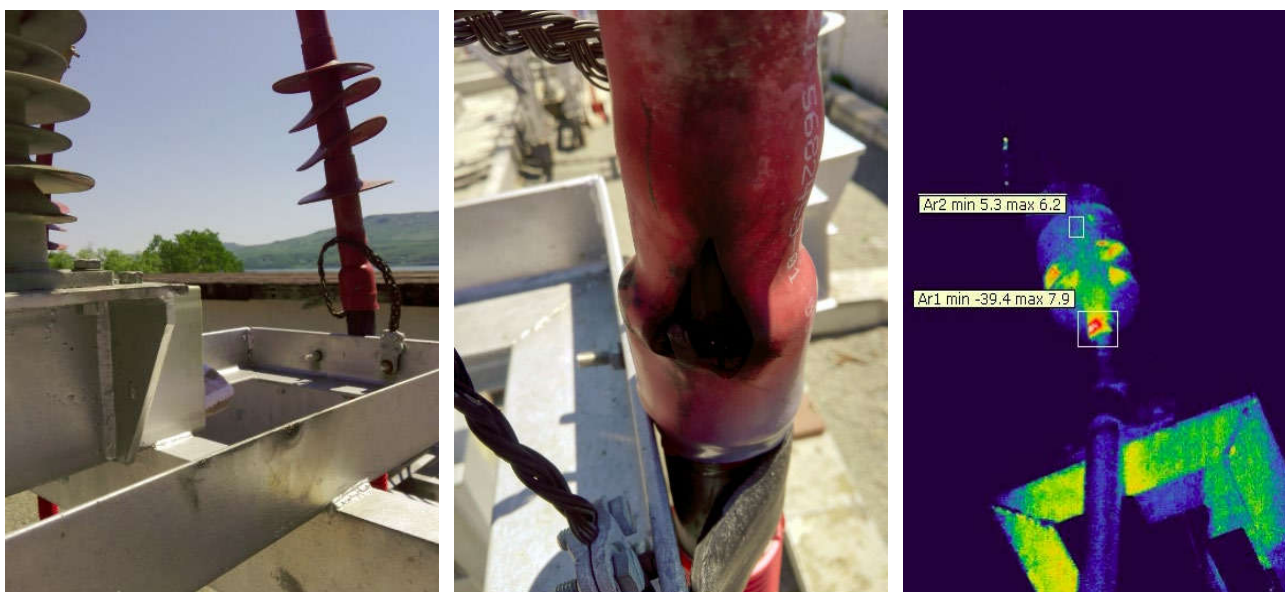
Рис. 6. Гистограммы параметров ЧР в концевой муфте КЛ 10 кВ на момент первичного (а) и повторного диагностирования через 2 года (б)

Из опыта обследования КЛ 6 – 35 кВ в электрических сетях известно, что заключения по итогам диагностирования, основанные на сравнительном анализе ряда параметров (уровни кажущегося заряда и интенсивность ЧР, относительные значения $\text{tg}\delta$, результатов рефлектометрии, измерения сопротивления изоляции, испытаний внешней оболочки, изучения ретроспективы повреждений на линии, ее нагрузки и т.д.), не всегда являются безусловно верными. КЛ, ТС которых оценивается как «работоспособное» или «работоспособное с незначительными отклонениями», могут выйти из строя пробивались

задолго до намеченного срока повторной проверки, а те линии, которые были в «предаврийном» состоянии, в ряде случаев эксплуатировались длительное время после их проверки без повреждений.

Особенностью диагностирования КЛ с изоляцией СПЭ является привлечение для анализа ее ТС по возможности большего числа сведений из опыта эксплуатации конкретной линии. Частыми причинами отказа являются ошибки проектирования и монтажа. На рис. 7 приведены фотографии и термограммы, иллюстрирующие отказ термоусаживаемых концевых муфт 35 кВ на коротких КЛ, выполненных кабелями АПвПу 1х300/25-35 длиной 12-18 м, продолженных от силовых трансформаторов к точкам перехода в воздушные линии на ОРУ. Известно, что приемо-сдаточные испытания КЛ, за отсутствием установок СНЧ, осуществлялись постановкой под рабочее напряжение на 24 ч, без нагрузки. Эти испытания прошил успешно. Однако детальный разбор аварийной ситуации, повторившейся три раза в течение 1 года, выявил следующие причины повреждения концевых муфт:

1. Локальный перегрев от экранных проволок (ток в экране каждого кабеля составляет порядка 100 А), из-за использования одножильных кабелей, проложенных в плоскости, при значительных токах нагрузки
2. Развитие ЧР в теле муфты, особенно в месте среза полупроводящего слоя по изоляции (при разрезе муфт зафиксированы воздушные зазоры, неаккуратное наложение лент, нарушения расстояний среза экрана и изоляции и пр.).



а)

б)

в)

Рисунок 7. Фотографии размещения кабельной муфты 35 кВ (а), ее повреждения в точке выхода поводка заземления (б) и термограмма локального нагрева (в) в месте, где впоследствии произошел пробой

Результаты диагностирования КЛ сетей 6-10 кВ г. Екатеринбурга, имеющими суммарную протяженность более 4700 км, из которых доля линий с изоляцией СПЭ составляет порядка 30%, приведены в [16]. В этом исследовании на примере довольно крупной выборки (100 КЛ, из которых 33 линии – с изоляцией СПЭ, 67 – с изоляцией БПИ) с диагностированием методами локализации ЧР и измерения $\text{tg}\delta$, показана проблема индикативного характера результата, который не позволяет достоверно спрогнозировать время до отказа КЛ.

Выборочная аналитика по опыту обследования КЛ

Известны критерии оценки результатов диагностирования КЛ по параметрам ЧР и $\text{tg}\delta$, полученные на основании многолетних исследований с участием авторов настоящей статьи [17]. Для оценки ТС используются в предлагаемой градации 5 типов состояния – работоспособное без замечаний, работоспособное с незначительными отклонениями, со значительными отклонениями, ухудшенное, предаварийное. Заключение по оценке ТС формируется с привлечением всей доступной информации по КЛ, по результатам следующих видов обследования КЛ:

- визуальный осмотр доступных участков,
- рефлектометрия и определение длины по каждой фазе;
- высоковольтные испытания полимерной оболочки на предмет целостности,
- измерение тангенса угла диэлектрических потерь,
- регистрация параметров ЧР с локализацией места их возникновения,
- измерение сопротивления изоляции и тока утечки.

Документом, содержащим результаты измерения параметров ЧР и $\text{tg}\delta$, аналитические заключения по оценке ТС и рекомендации по дальнейшему его контролю, является диагностический паспорт на каждую обследованную КЛ.

На рис. 8 – 11 приведены результаты диагностического обследования двух КЛ-35 кВ в сети крупного нефтехимического предприятия, показывающие, что при итоговой оценке ТС следует исходить из наихудшего показателя. Например, если зафиксированные параметры ЧР характеризуют состояние изоляции как «работоспособное без отклонений», но $\text{tg}\delta$ показывает рост сверх критических значений, то общее состояние КЛ будет оценено как предаварийное. При этом сопровождение в заключении может быть разным: при «критических» показателях ЧР рекомендуется локальный упреждающий ремонт КЛ; при «критических» значениях и характере изменения $\text{tg}\delta$ – усиленный контроль, проверка и ремонт оболочек, исключение перегрузки, т.е. щадящая эксплуатация. Кроме того, учитываются измеренные значения сопротивления изоляции и тока утечки, срок эксплуатации кабеля, способ и качество прокладки, график нагрузки - всё, что удаётся узнать об эксплуатации этой КЛ.

Первая из диагностируемых линий (КЛ-35 кВ №1, рис. 8-9) выполнена кабелями марок АПвВнг-А и АПвКсВнг сечениями 3(1х300/50), длиной 3011 м каждый. С одной стороны КЛ установлены концевые муфты марки QTIII 94-EP 638-2, с другой - муфты для сборных шин MV-CONNEX. Также на каждой фазе кабеля установлено по 5 соединительных переходных муфт марки QSIII 94-AC 638-1(5467A). КЛ введена в эксплуатацию в 2014 году. Способ прокладки кабеля – на эстакаде в «треугольник». Согласно результатам комплексного обследования «критическими» оказались параметры ЧР, и в заключении указано, что по всем трем фазам требуется проведение восстановительных работ в зафиксированных точках максимальной активности ЧР.

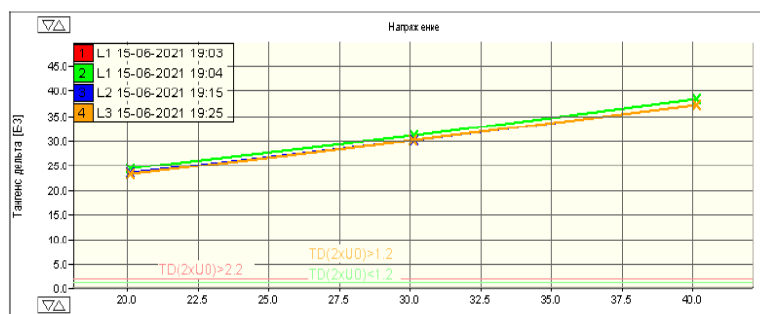


Рис. 8. Диаграммы изменения $\text{tg}\delta$ в диапазоне приложенного испытательного напряжения СНЧ для КЛ-35 кВ №1

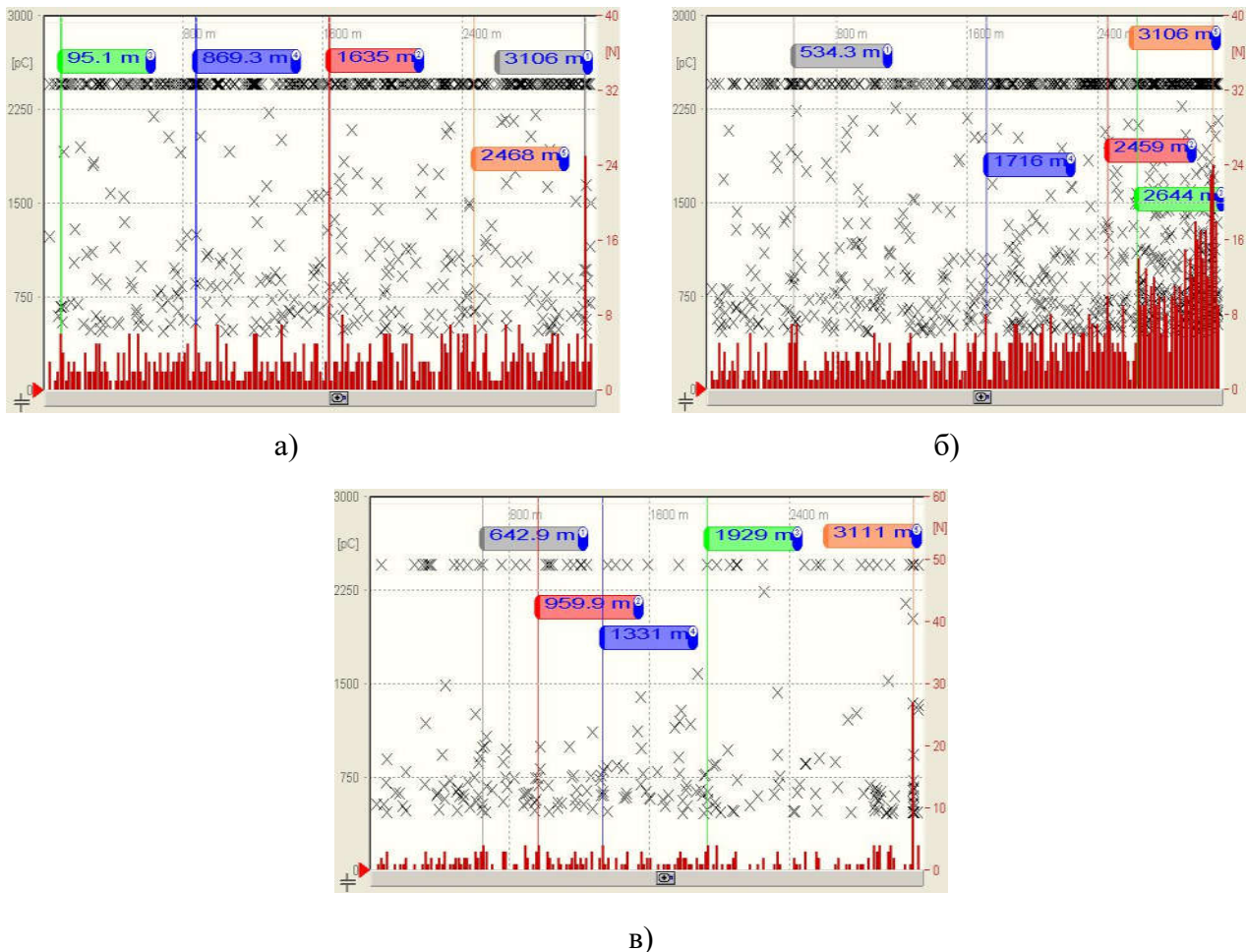


Рис. 9. Гистограммы уровней кажущегося заряда (ось слева) и частоты следования ЧР (ось справа) для КЛ-35 кВ №1 по фаза А (а), В (б) и С (в)

Вторая из диагностируемых линий (КЛ-35 кВ №2, рис. 10-11) выполнена трехжильным кабелем марки АПВВнг-А сечением 3(1x185/50) длиной 3145 м. С обеих сторон установлены концевые муфты марки АBB SENDI 30.1 (АBB). Установлено 23 соединительные муфты марки АBB SEV 36 (АBB) и 1 соединительная муфта марки POLJ-42/1X120-240 (Rauschem). Кабельная линия введена в эксплуатацию в 2003 году. Способ прокладки кабеля – на эстакаде в «плоскости». Согласно результатам комплексного обследования «критическими» оказались параметры $tg\delta$, и в заключении указано, что по всем трем фазам требуется проведение восстановительных работ, с поиском мест увлажнения кабеля и ее ремонт, а также более «бережным» отношением в эксплуатации.

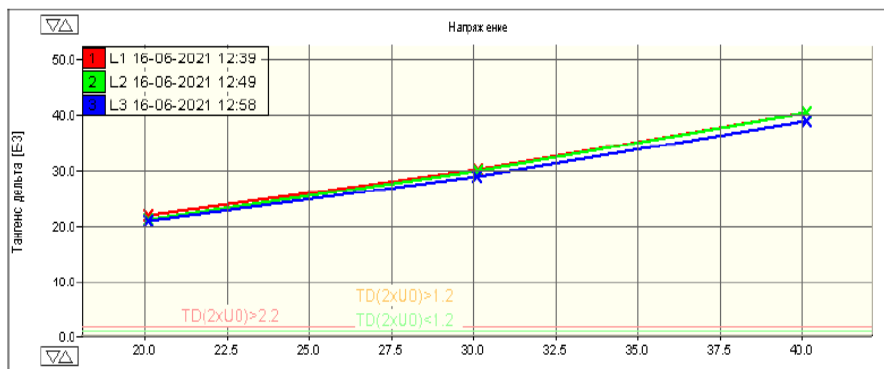


Рис. 10. Диаграммы изменения $tg\delta$ в диапазоне приложенного испытательного напряжения СНЧ для КЛ-35 кВ №2

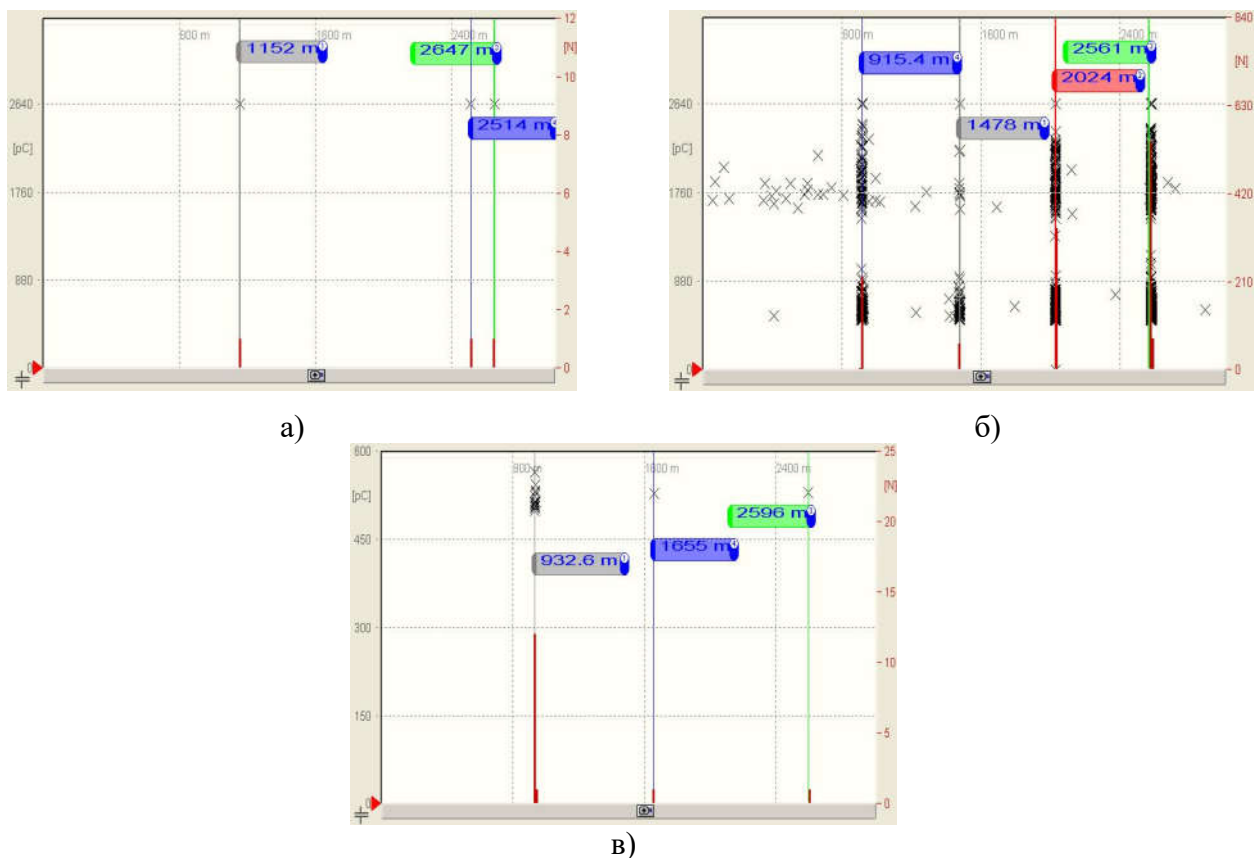


Рис. 11. Гистограммы уровней кажущегося заряда (ось слева) и частоты следования ЧР (ось справа) для КЛ-35 кВ №2 по фаза А (а), В (б) и С (в)

Всего одновременно было обследовано 18 КЛ в сети 35 кВ предприятия, включая КЛ-35 кВ №1 и №2. По итогам диагностирования выявлено, что значительная часть кабельного хозяйства 35 кВ в значительной части (порядка 80 %) требует принятия мер для обеспечения бесперебойного электроснабжения. На основании рекомендаций по итогам измерений кабели с потенциальным риском возникновения дефектов взяты на усиленный контроль. По результатам повторного диагностирования и сравнения этих результатов с предыдущими (отслеживание тренда), будет принято решение о дальнейшей эксплуатации данных КЛ – штатная эксплуатация, ремонт или замена.

Несмотря на сложности правильной оценки ТС КЛ с изоляцией СПЭ на основе диагностирования, включающего локализацию ЧР и измерение $\text{tg}\delta$, эта задача является практически значимой, в том числе в силу принятой во многих организациях, включая ПАО «Россети», практики перехода к ТОиР электрооборудования «по состоянию». Такой способ эксплуатации, по сравнению с традиционной системой профилактических испытаний и плановых ремонтов, имеет свои достоинства и недостатки. Если не вдаваться в детали, к числу первых, применительно к кабельной технике напряжением 6-35 кВ, можно отнести широкие диагностические возможности, которых раньше не было (включая специальное оборудование), к числу вторых – относительно слабое вверение средств и методов диагностики, ввиду большого объема парка КЛ, особенно городских сетей 6-10 кВ, а также трудность интерпретации результатов.

Выводы

1. Точность оценки текущего состояния КЛ зависит от полноты (количества и качества) анализируемых параметров – сведений по отказам и ремонтам, воздействию ТКЗ, принятым нормам высоковольтных испытаний, нагрузочным режимам и т.д. Эти данные

дополняют результаты диагностирования методами локализации ЧР и позволяют сделать более корректное заключение, особенно в условиях разнородности диагностических показателей. Для отслеживания ТС в динамике следует организовывать повторные измерения и неразрушающие испытания.

2. Известной проблемой является выделение полезного сигнала ЧР в широком спектре высокочастотных помех, практически всегда присутствующих в электрической сети. Если уровень кажущегося заряда ЧР на кабеле с изоляцией СПЭ, измеренный в заводской экранированной лаборатории дл образцов и строительных длин кабеля, должен быть не более 5 – 10 пКл, то в эксплуатации калибровочный сигнал может превышать этот уровень в среднем на 2 порядка. Это связано с электромагнитной обстановкой на объекте, состоянием и конфигурацией заземляющих устройств в электроустановках, характером нагрузки предприятия, а также внесением определенных дефектов на этапе прокладки, монтажа и испытаний КЛ и кабельных муфт.

3. Мониторинг ЧР под рабочим напряжением и диагностика с отключением линии на время регистрации параметров ЧР и измерения $\text{tg}\delta$ может показать разные результаты в оценке ТС. Это заключение справедливо также для случаев применения разного измерительного оборудования от разных производителей. Это объясняется отличием в применяемых методах измерения ЧР, характеристик датчиков и алгоритмах обработки сигналов, помеховой обстановки на энергообъекте и другими причинами. Диагностирование с выводом КЛ из работы, с позиции анализа результатов и формирования рекомендаций, является более информативным, чем контроль ЧР под рабочим напряжением.

4. Совокупность эксплуатационных условий «в моменте» определяет скорость развития дефектов в изоляции, поэтому сами по себе результаты диагностирования КЛ на основе измерения и локализации ЧР и определения $\text{tg}\delta$ не позволяют выдать точный прогноз по ожидаемому сроку до аварийного отказа, для этого нужен совместный анализ ряда других факторов. Однако при выявлении «предавварийного» состояния КЛ целесообразно, по меньшей мере, оперативно провести испытания повышенным напряжением СНЧ.

5. Сдерживающим фактором для широкого внедрения диагностирования на основе контроля ЧР и $\text{tg}\delta$ в кабельных сетях среднего напряжения, является отсутствие регламентированных требований и критериев оценки ТС в форме отраслевого стандарта. Для обследования на отключенных КЛ до настоящего времени нет отечественных разработок специализированных диагностических установок, которые позволяют измерять параметры ЧР и $\text{tg}\delta$ с высочайшим уровнем автоматизации процесса, который имеется в зарубежных устройствах, например компании BAUR (Австрия).

6. В эксплуатации, ввиду нехватки персонала и испытательного оборудования, а также большого количества текущих дел, зачастую даже типовой объем испытаний КЛ не выполняется в должном объеме. В немалой степени это связано с большим числом обслуживаемых КЛ, особенно в городских сетях 6-10 кВ. Поэтому диагностирование КЛ до 35 кВ выполняется «по остаточному принципу», что затрудняет качественную оценку ТС методами неразрушающего контроля ЧР и $\text{tg}\delta$ изоляции КЛ. Для предупреждения аварийных отказов целесообразно формирование базы данных диагностирования, по крайней мере, для наиболее ответственных линий и непосредственно с момента ввода в эксплуатацию.

Список литературы

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97. СО 34.45-51.300-97. 6-е изд. с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2014. – 256 с.

2. ГОСТ 34834-2022. Кабели силовые с экструдированной изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия. Введен 01.07.2023. <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=245677>

3. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Утв. и введен в действие Распоряжением ПАО «Россети» от 29.05.2017 № 280р. Электронный ресурс <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/b36/dowqrii80ps20qe1m21e1cu204ycky1.pdf>
4. Сидельников Л.Г. Силовые кабельные линии со СПЭ-изоляцией. Локализация проблемных мест и прогнозирование остаточного ресурса // Новости ЭлектроТехники. 2017. № 2(104)–3(105). С. 66–68.
5. Ширковец А.И. Технология эксплуатации и критерии отбраковки кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена.// Энергетик. 2017. №10. С. 32-36.
6. ГОСТ 12179-76. Кабели и провода. Метод определения тангенса угла диэлектрических потерь. <https://www.ruscable.ru/doc/docgost/files/99042438850.doc>
7. ГОСТ 20074—83 (СТ СЭВ 3689-82). Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. М.: ГК СССР по стандартам. - 22 с.
8. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов, 2014.
9. Сергеев И.И. Об измерении частичных разрядов. // Энергетик. 2016. №9. С. 41-46.
10. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. - 224 с.
11. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
12. Овсянников А.Г. Частичные разряды и диагностирование оборудования высокого напряжения. Серия «Монографии НГТУ»/ А.Г. Овсянников. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 232 с.
13. СТО 56947007-29.060.20.170-2014 Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Электронный ресурс https://www.fsk-ees.ru/about/management_and_control/test/STO-56947007-29.060.20.170-2014.pdf
14. Руководящие указания по выбору, сооружению и технологии эксплуатации кабельных линий напряжением 6-110 кВ на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в ОАО «Ленэнерго». Введены приказом №753 от 29.12.2012.
15. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Утв. Приказом Минэнерго России от 26.07.2017 №676 (в ред. Приказа Минэнерго России от 17.03.2020 №192) <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-679-20200531-233201.pdf>
16. Уракова Е.Н. Диагностика состояния кабельных линий неразрушающими методами в АО «ЕЭСК»././ Релейная защита и автоматизация. 2021. №03, сентябрь. С.114 – 117.
17. Машкалев Д.А. Диагностика изоляции силового кабеля.//Энергетик. 2016. №9. С. 46 – 50.