



Приложение к приказу
ОАО «Концерн Росэнергоатом»
от 09.10.2013 № 9/930-17

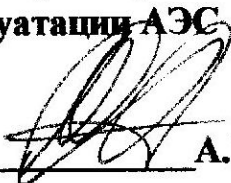
ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

**Открытое акционерное общество
«Российский концерн по производству электрической и
тепловой энергии на атомных станциях»**

(ОАО «Концерн Росэнергоатом»)

УТВЕРЖДАЮ

**Заместитель Генерального директора -
директор по производству и
эксплуатации АЭС**


_____ **А.В. Шутиков**

« ____ » _____ 2013

**Диагностика технического состояния силовых кабелей
с пропитанной бумажной изоляцией на атомных станциях**

Методические рекомендации

МР 1.2.02.0168-2013

Предисловие

1 РАЗРАБОТАНЫ Федеральным государственным унитарным предприятием "Научно-исследовательский институт приборов"

2 ВНЕСЕНЫ Технологическим филиалом ОАО «Концерн Росэнергоатом»

3 ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом»
№ 9/930-П от 09.10.2013

4 ВВЕДЕНЫ ВПЕРВЫЕ

Содержание

1	Область применения.....	1
2	Нормативные ссылки.....	1
3	Термины и определения.....	2
4	Обозначения и сокращения.....	4
5	Общие положения о технической диагностике силовых кабелей с ПБИ низкого и среднего напряжения.....	4
6	Экспресс-диагностирование при выполнении ТОиР.....	8
7	Углубленная диагностика кабелей с ПБИ.....	9
	Приложение А (обязательное) Показатели технического состояния для силовых кабелей с ПБИ	12
	Библиография.....	26

Введение

Настоящие методические рекомендации разработаны на основе опыта диагностики (контроля) технического состояния силовых кабелей низкого напряжения с пропитанной бумажной изоляцией, полученного в рамках работ по продлению срока эксплуатации энергоблоков атомных станций. Этот опыт позволил выявить доминирующие механизмы старения кабелей данного типа, установить эффективные методы неразрушающего контроля, в том числе, определить численные критерии фактического состояния кабелей по новым показателям состояния пропитанной бумажной изоляции.

Методические рекомендации предоставляют возможность проведения интегральной оценки технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией персоналом электротехнического цеха в рамках технического обслуживания и ремонта на основе измерения сопротивления изоляции и использования временной рефлектометрии и углубленной диагностики для локализации дефектов старения по кабельным трассам и оценки их остаточного срока службы на основе измерения восстановленного напряжения и регистрации параметров частичных разрядов на осциллирующем затухающем напряжении.

Диагностика технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на атомных станциях

Дата введения 30.11.2013

1 Область применения

1.1 Настоящие методические рекомендации (далее МР) предназначены для использования на атомных станциях ОАО "Концерн Росэнергоатом" для диагностики (контроля) технического состояния силовых кабелей с ПБИ и номинальным напряжением до 10 кВ включительно.

1.2 МР рекомендуются к применению для персонала ЭЦ при проведении контроля технического состояния силовых кабелей с ПБИ в рамках проведения ТОиР и для специализированных организаций при проведении технической диагностики в рамках программ управления ресурсными характеристиками этих кабелей.

2 Нормативные ссылки

В настоящих МР использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения

НП-001-97 (ОПБ-88/97) Общие правила обеспечения безопасности атомных станций

ГОСТ 18410-73 Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией

РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования;

1.2.4.10.006.0014-2007 Методические указания по проведению испытаний повышенным напряжением и контролю технического состояния силовых кабельных линий на атомных станциях.

3 Термины и определения

В МР применены термины по НП-001-97 (ОПБ-88/97) и ГОСТ 20911, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 алгоритм технического диагностирования (контроля технического состояния): Совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования (контроля).

3.2 диагностирование (техническое диагностирование): Определение технического состояния объектов.

П р и м е ч а н и я

1 Задачами технического диагностирования являются:

- контроль технического состояния;
- поиск места и определение причин отказа (неисправности);
- прогнозирование технического состояния.

2 Термин «Техническое диагностирование» применяют в наименованиях и определениях понятий, когда решаемые задачи технического диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа (неисправности). Термин «Контроль технического состояния» применяется, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния.

3.3 диагностическое обеспечение: Комплекс взаимоувязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта.

3.4 доминирующий механизм старения: Механизм накопления необратимых неблагоприятных изменений в конструкционных материалах и составных частях элемента, вносящий основной (доминирующий) вклад в процесс старения.

3.5 контроль технического состояния: Проверка соответствия значений параметра объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени.

П р и м е ч а н и е - Видами технического состояния являются, например, исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное и т.д. В зависимости от

значений параметров в данный момент времени.

3.6 контроль функционирования: Контроль выполнения объектом части или всех свойственных ему функций.

3.7 полнота технического диагностирования (контроля технического состояния): Характеристика, определяющая возможность выявления отказов (неисправностей) в объекте при выбранном методе его диагностирования (контроля).

3.8 прогнозирование технического состояния: Определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени.

Примечание - Целью прогнозирования технического состояния может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное (исправное) состояние объекта и вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

3.9 продолжительность технического диагностирования (контроля технического состояния): Интервал времени, необходимый для проведения диагностирования (контроля) объекта.

3.10 система технического диагностирования (контроля технического состояния): Совокупность средств, объекта и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации.

3.11 средство технического диагностирования (контроля технического состояния): Аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование (контроль).

3.12 экспресс-диагностирование: Диагностирование по ограниченному числу параметров за заранее установленное время.

3.13 представительные силовые кабели: Силовые кабели, которые полностью характеризуют старение группы однотипных силовых кабелей с одинаковыми условиями монтажа, одинаковыми внешними воздействующими факторами на всех участках кабельных трасс и одинаковыми режимами эксплуатации.

4 Обозначения и сокращения

LIRV	—	индекс электропроводности по восстановленному (возвратному) напряжению
OWTS	—	метод контроля изоляции, основанный на регистрации частичных разрядов на осциллирующем затухающем напряжении (Oscillating Wave Test System)
PIRV	—	индекс поляризации по восстановленному напряжению
АЭС	—	атомные электрические станции
ВН	—	восстановленное (возвратное) напряжение
МР	—	методические рекомендации
ОЗС	—	огнезащитный состав
ПБИ	—	пропитанная бумажная изоляция
ПС	—	показатель состояния
ТОиР	—	техническое обслуживание и ремонт
ЧДС	—	частотная диэлектрическая спектроскопия
ЧР	—	частичные разряды
ЭЦ	—	электрический цех
K_a	—	коэффициент абсорбции
PI	—	индекс поляризации
$R_{из\ 1\ км}$	—	сопротивление изоляции для кабеля длиной 1 км
W_C	—	содержание влаги в пропитанной бумажной изоляции

5 Общие положения

5.1 В настоящих МР объектом диагностики (контроля) являются силовые кабели с пропитанной бумажной изоляцией различных марок напряжением от 0,4 до 10 кВ, включая кабели с обедненным пропиточным составом, например, ААШв, ААБлнГ, ЦААБлн и другие.

5.2 В МР в качестве основных дефектов силовых кабелей с ПБИ в условиях эксплуатации на АЭС рассматриваются:

1) усушка бумажной изоляции на локальных участках кабельных трасс из-за: нарушения теплообмена между кабелем и окружающей средой (прокладка кабелей в трубах, стенных проходках, покрытие ОЗС и т.п.) и наличия вертикальных участков кабельных трасс;

2) обеднение пропиточного состава для кабелей типа ААБлнГ на протяженных участках кабельных трасс, примыкающим к муфтам, и последующим ускоренным старением бумажной изоляции на этих участках (из-за ошибок в конструкции для данного типа кабелей наблюдается повышенная эксплуатационная температура и выдавливание пропиточного состава из концевых муфт в первый год эксплуатации);

3) увлажнение бумажной изоляции на участках, примыкающих к некачественно изготовленным концевым заделкам и соединительным муфтам, что характерно для кабелей, которые периодически нагружают и отключают от электрической нагрузки;

4) дефекты защитных оболочек кабелей из-за некачественного монтажа и из-за повреждения оболочек при проведении сторонних работ (в месте повреждения в последующем интенсивно развиваются процессы старения бумажной изоляции, как увлажнение, так и усушка).

5.3 Для диагностики кабелей с ПБИ в данных МР рекомендуются методы неразрушающего контроля, представленные в таблице 1. В приложении А для этих методов указаны ПС и соответствующие этим показателям критерии оценки состояния кабелей.

Т а б л и ц а 1 – Краткая характеристика методов диагностики (контроля) состояния силовых кабелей с ПБИ

Метод	Характеристика	Эффективность для диагностики состояния
Визуальный и тепловизионный контроль кабельных трасс	Самый простой метод для обнаружения развитых дефектов в доступных для визуального контроля трассах кабелей.	Неэффективен в недоступных для визуального контроля трассах кабелей, регистрирует только развитые дефекты по градиенту температуры на поверхности оболочки и наличию протечек пропиточного состава

Окончание таблицы 1

Метод	Характеристика	Эффективность для диагностики состояния
Измерение сопротивления изоляции $R_{из}$ и расчет абсорбционных характеристик	Интегральными показателями состояния являются коэффициент абсорбции K_a , индекс поляризации PI , сопротивление изоляции на единицу длины (1 км) $R_{из 1 км}$.	Низкая чувствительность к объемным дефектам, которые не вносят вклад в сквозной ток проводимости.
Рефлектометрия (пространственно-временная)	Оценка длины кабелей, низкоомных дефектов (менее 1 кОм) и развитых емкостных неоднородностей кабельной линии.	Служит для локализации развитых дефектов вдоль кабельной линии. Низкая чувствительность к дефектам.
Измерение восстановленного напряжения	Интегральный метод состояния. Единственный метод, позволяющий количественно оценить состояние кабеля с ПБИ по изменению объемной электропроводности и поляризуемости	Высокая чувствительность к увлажнению и усушке ПБИ. Не позволяет локализовать дефекты вдоль кабельной линии.
Частотно-диэлектрическая спектроскопия (метод ЧДС)	Интегральная оценка влагосодержания изоляции. Рассматривается в качестве дополнительного метода в данных МР, при необходимости получить количественную оценку содержания влаги в изоляции.	Высокая чувствительность к увлажнению и низкая чувствительность к усушке бумажной изоляции
Регистрация частичных разрядов на осциллирующем затухающем напряжении (метод OWTs)	Определение мест усушки бумажной изоляции вдоль кабельных трасс.	Эффективен для регистрации дефектов типа усушка бумажной изоляции и других дефектов, характеризующийся наличием свободного объема, который является необходимым условием образования частичных разрядов.

5.4 В МР принята классификация технического состояния кабелей с ПБИ, которая представлена в таблице 2. Она составлена на основе классификации, принятой в техническом документе 1.2.4.10.006.0014. Для удобства анализа результатов диагностики каждому состоянию, характеризующему кабель, МР рекомендует присвоить цвет: светло-зеленый для состояния – "работоспособное норма", светло-желтый – "работоспособное с незначительными отклонениями", желтый – "работоспособное со значительными отклонениями", светло-сиреневый – "работоспособное

ухудшенное", сиреневый – "предельное". В данных МР "предельное состояние" означает, что срок службы кабелей далее прогнозировать невозможно, т.е. отказ может произойти в любой момент времени при дальнейшей эксплуатации.

Т а б л и ц а 2 – Классификация технического состояния кабелей и кабельных линий в эксплуатации и рекомендации по их обслуживанию

Классификация состояния		Степень старения изоляции	Рекомендации персоналу АЭС и специализированной организации при проведении ТОиР и диагностики
Работоспособное	норма	Старение отсутствует	Эксплуатация без ограничений, техническое обслуживание согласно нормативной документации
	с незначительными отклонениями	Низкая степень старения, ее наличие фиксируется отдельными методами контроля	Эксплуатация без ограничений, техническое обслуживание согласно нормативной документации
	со значительными отклонениями	Средняя степень старения, наблюдается тенденция к дальнейшей деградации изоляции	Эксплуатация с выполнением периодического контроля степени старения изоляции неразрушающими методами. Для персонала ЭЦ рекомендуется проводить дополнительный контроль по величинам $R_{из}$ 1 км, PI, Ka. Для специализированной организации проводить контроль состояния и срок службы с применением метода восстановленного напряжения, метода OWTS и использованием другой диагностической техники.
	ухудшенное	Сильное старение, ресурс изоляции ограничен	Поиск дефектных участков кабельных трасс методом OWTS, рефлектометрии и другими методами. Оценка состояния срока службы до планового ремонта или замены кабеля.
Классификация состояния		Степень старения изоляции	Рекомендации персоналу АЭС и специализированной организации при проведении ТОиР и диагностики
		Предельная степень старения	Плановый ремонт или замена кабеля (участка кабеля).

6 Экспресс-диагностирование при выполнении ТОиР

6.1 Экспресс-диагностирование проводится персоналом ЭЦ в рамках работ ТОиР и включает в себя измерение сопротивления изоляции цифровым мегомметром в течение 10 минут и расчет в соответствии с А2.2 приложения А: коэффициента абсорбции K_a ; индекса поляризации PI; сопротивления изоляции, нормированного на 1 км $R_{из 1 км}$. ВНИМАНИЕ! При отсутствии точных данных о длине кабеля следует определить ее методом пространственно-временной рефлектометрии в соответствии с рекомендациями технического документа 1.2.4.10.0014. Эта диагностика проводится с учетом результатов тепловизионного и визуального контроля доступных участков кабельных трасс в межремонтный период согласно утвержденному регламенту. Рекомендуемые ПС при проведении тепловизионного контроля указаны в А1.1 приложения А.

6.2 Оценка состояния кабеля проводится исходя из значений ПС согласно критериям, представленным в таблице 3. За фактическое состояние кабеля принимается наименее работоспособное состояние, которое определяется по ПС, представленным в таблице 3.

Т а б л и ц а 3 – Критерии для оценки состояния кабеля с ПБИ при проведении экспресс-диагностики

Состояние кабеля	Коэффициент абсорбции K_a	Индекс поляризации PI	Сопротивление изоляции, нормированное для кабеля длиной 1 км $R_{из 1 км}$, МОм
Работоспособное норма	$K_a > 1,6$	$PI > 4,0$	200 < $R_{из 1 км}$ < 1000 (состояние работоспособное)
Работоспособное с незначительными отклонениями	$1,6 \geq K_a \geq 1,4$	$4,0 \geq PI \geq 3,0$	
Работоспособное со значительными отклонениями	$1,4 > K_a \geq 1,25$	$3,0 > PI \geq 2,0$	
Работоспособное ухудшенное	$1,25 > K_a > 1,0$	$2,0 > PI > 1,0$	100 < $R_{из 1 км}$ < 200, 1000 < $R_{из 1 км}$ < 2400

6.3 По результатам экспресс-диагностики проводятся мероприятия в рамках ТОиР в соответствии с рекомендациями, представленными в таблице 2.

6.4 Рекомендуется совмещать экспресс-диагностику с проведением нормативных испытаний повышенным напряжением силовых кабелей. Это даст возможность наблюдать тренд изменения этих ПС и получить данные об их начальных значениях, необходимых для прогнозирования срока службы.

7 Углубленная диагностика кабелей с ПБИ

7.1 Цели углубленной диагностики: определение дефектных участков кабельных трасс и оценка срока службы кабелей на момент измерения ПС. Следует подчеркнуть, что углубленная диагностика позволяет выявить дефекты типа "усушка изоляции", которые часто не могут быть обнаружены даже при проведении нормативных испытаний повышенным напряжением кабелей, имеющих признаки предельного состояния.

7.2 Для проведения углубленной диагностики привлекается специализированная организация при отсутствии у персонала АЭС необходимого опыта и измерительной техники. Альтернативой углубленной диагностики является замена кабеля (участка кабеля), состояние которого классифицируется как "работоспособное ухудшенное".

7.3 При осуществлении углубленной диагностики проводят: тепловизионный контроль, измерение сопротивления изоляции, измерение восстановленного напряжения, измерение частичных разрядов методом OWTS, пространственно-временную рефлектометрию, ЧДС. Метод восстановленного напряжения является основным методом интегральной оценки состояния ПБИ изоляции, метод OWTS – основным методом определения дефектных участков кабеля. Метод ЧДС является дополнительным методом контроля (контроля содержания воды W_C) для подтверждения возможной причины локальных утечек изоляции: увлажнения или углероживания бумаги.

7.4 Определение (расчет) ПС для методов, используемых при проведении

углубленной диагностики, и соответствующие этим ПС критерии указаны в приложении А.

7.5 В качестве основных ПС изоляции при проведении углубленной диагностики приняты: индекс поляризации PIRV и индекс электропроводности LIRV, которые рассчитываются из кривой ВН. Дополнительным ПС восстановленного напряжения являются среднее время короткоживущих положительных компонент $\overline{\tau_+}$ кривой ВН. Критерии для оценки состояния ПБИ по PIRV, LIRV и $\overline{\tau_+}$ указаны в таблицах А.4 и А.5 (приложение А) соответственно.

7.6 Для определения дефектных участков кабеля используются: распределение ЧР вдоль кабеля и количество ЧР на дефектных участках. Для "привязки" дефектных участков к емкостным неоднородностям кабельных линий (наличие труб, коробов и др.) следует использовать традиционную частотно-временную рефлектометрию. На рисунке А.9 а) и б) (приложение А) приведены характерные результаты диагностики дефектов типа усушка ПБИ методом OWTS. На этих рисунках распределение ЧР вдоль кабеля совмещено с пространственно-временной рефлектограммой.

7.7 Интегральная оценка состояния кабеля при углубленной диагностике проводится одновременно по критериям следующих показателей: PIRV, LIRV, K_a , P_I , $R_{из 1 км}$. Показатель W_C (критерии указаны в таблице А.7 (приложение А)) в данном случае может быть использован в качестве дополнительного ПС. За фактическое состояние кабеля принимает наименее работоспособное состояние, полученное по всем ПС. Такой ПС как "уровень ЧР", критерии для которого указаны в таблице А.6 (приложение А), рекомендован в данных МР лишь как качественный показатель¹.

7.8 Полученные в ходе углубленной диагностики экспериментальные данные дают возможность проводить консервативный прогноз срока службы ПБИ, используя линейную зависимость ПС от времени эксплуатации. Оценку

¹ При получении в дальнейшем достаточного набора диагностических данных ПС "уровень ЧР" может быть отнесен к количественным показателям на основе анализа корреляционных зависимостей между показателями, измеренными методами OWTS и ВН.

срока службы $\tau_{\text{ост}}$ при этом следует проводить по модели

$$\begin{cases} \tau_{\text{ост}} = \tau_d \cdot \frac{I_{\text{пр}} - I_d}{I_d - I_0} & \text{при увеличении ПС в процессе старения, либо} \\ \tau_{\text{ост}} = \tau_d \cdot \frac{I_d - I_{\text{пр}}}{I_0 - I_d} & \text{при уменьшении ПС в процессе старения} \end{cases}, \quad (1)$$

где I_0 и $I_{\text{пр}}$ – начальное и предельное значения выбранного ПС,

I_d – величина ПС на момент контроля состояния,

τ_d – срок службы кабеля на момент контроля состояния в годах.

В качестве ПС рекомендуется одновременно использовать PIRV, LIRV, K_a , PI, $R_{\text{из 1 км}}$. За срок службы выбирать следует наименьший из расчетных по разным ПС.

7.9 При прогнозировании срока службы по модели (1) следует:

- знать начальные и предельные значения ПС;
- установить определяющий механизм старения. При разных механизмах старения один и тот же ПС может вести себя по разному, например, увлажнение приводит к уменьшению величины $R_{\text{из 1 км}}$, а усушка ведет к увеличению $R_{\text{из 1 км}}$ практически до достижения кабелем предельного состояния (до момента образования проводящих путей в изоляции из-за углероживания бумаги);
- учитывать частичное восстановление ресурсных характеристик кабеля при проведении ремонтных работ, что означает использование новых величин I_0 и τ_d при проведении ТОиР для вхождения в формулы модели (1).

7.10 При отсутствии данных для расчета срока службы по модели (1) следует проводить периодическую углубленную диагностику представительных силовых кабелей не менее одного раза в 6 лет (заметное увеличение токов утечек во время проведения испытаний повышенным напряжением для многих силовых кабелей регистрируется через это время эксплуатации).

Приложение А

(обязательное)

Показатели технического состояния для силовых кабелей с ПБИ

А.1 Показатели состояния тепловизионного контроля

А.1.1 Рекомендуется в соответствии с РД 34.45-51.300 использовать три показателя состояния по данным тепловизионного контроля:

- температуру жилы в эксплуатации, которая рассчитывается по величине температуры оболочки поверхности кабеля, измеренной тепловизором;
- разность температур в нагреве отдельных точек на поверхности оболочки кабеля, в местах кабельных трасс с градиентом температуры;
- температуру окружающей среды.

А.1.2 Тепловизионный контроль кабельных трасс следует проводить не реже одного раза в год в летнее время.

А.1.3 В соответствии с ГОСТ 18410-73 длительно допустимая температура нагрева жил кабелей при эксплуатации и максимально допустимая температура нагрева жил при коротком замыкании должны соответствовать указанным в таблице А.1. На рисунке А.1 в качестве справочного материала представлена расчетная зависимость разницы температур между жилой и оболочкой для кабелей напряжением 6 кВ различного сечения от тока нагрузки.

Т а б л и ц а А.1 – Допустимые температуры жил кабелей в эксплуатации

Номинальное напряжение кабеля, кВ	Длительно допустимая температура нагрева жил кабелей, °С		Максимально допустимая температура нагрева жил кабеля, °С	
	одножильных или в отдельной оболочке по каждой изолированной жиле	с поясной изоляцией	при токе короткого замыкания	при перегрузке
1	80	80	250	105
6	-	80/65*	200	105/90*
10	-	70/60*	200	90/80*

* В отмеченных звездочками числителях приведены длительно и максимально допустимые температуры для кабелей с изоляцией, пропитанной нестекающим составом, и кабелей с изоляцией, пропитанной вязким изоляционным маслосиликоновым составом, содержащим не менее 25 % канифоли (или составом, аналогичным по характеристикам); в знаменателе - для кабелей с изоляцией, пропитанной вязкими изоляционными составами, содержащими полиэтиленовый воск в качестве загустителя.

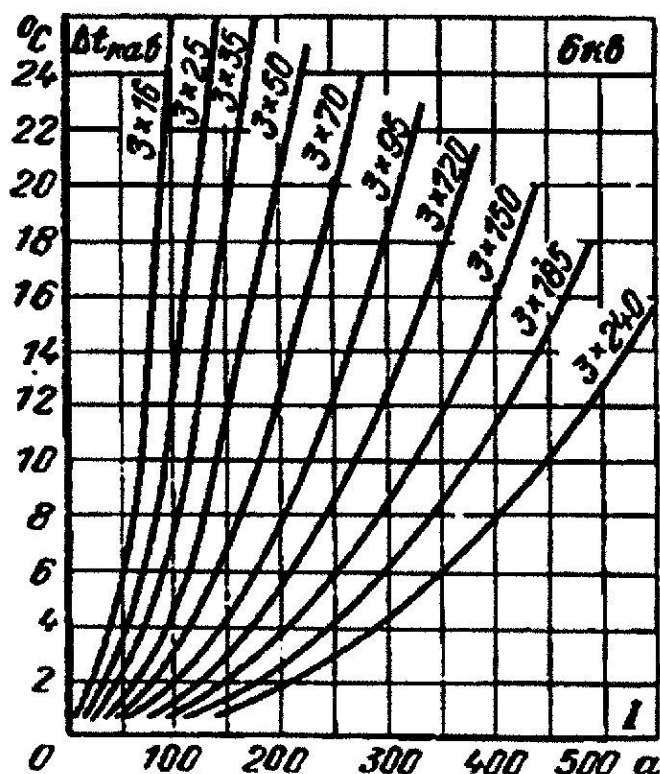


Рисунок А.1 – Перепад температур между жилой и оболочкой для 6 кВ кабеля в зависимости от тока нагрузки

А.1.4 Причиной появления градиента температур на участках кабельных трасс являются наличие: вертикальной трассировки, стенных проходок, покрытий ОЗС. Типичные участки кабельных трасс с градиентом температуры представлены на рисунках А.2 – А.5.

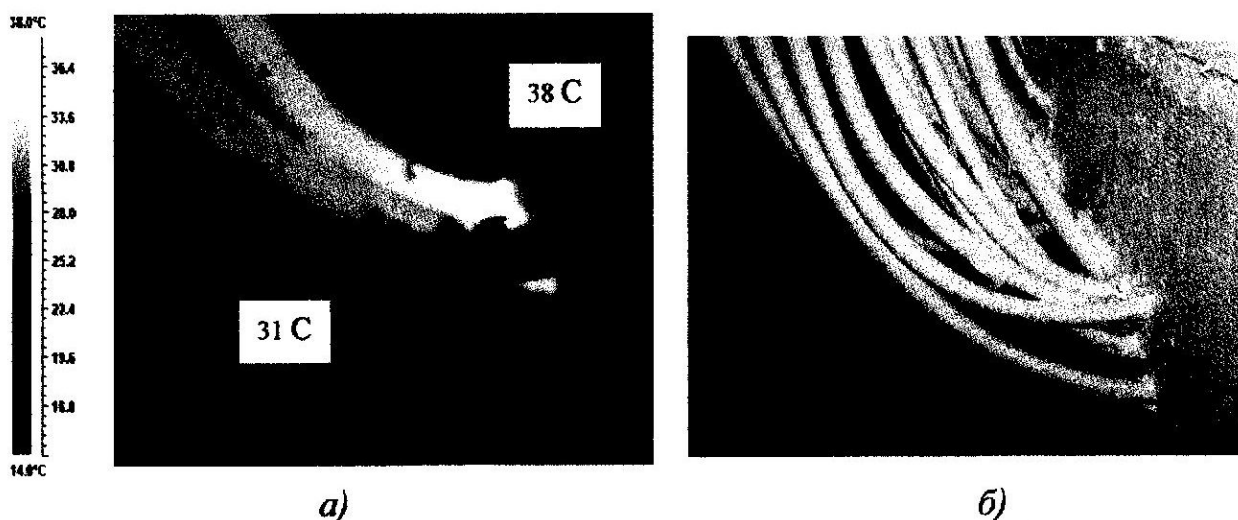
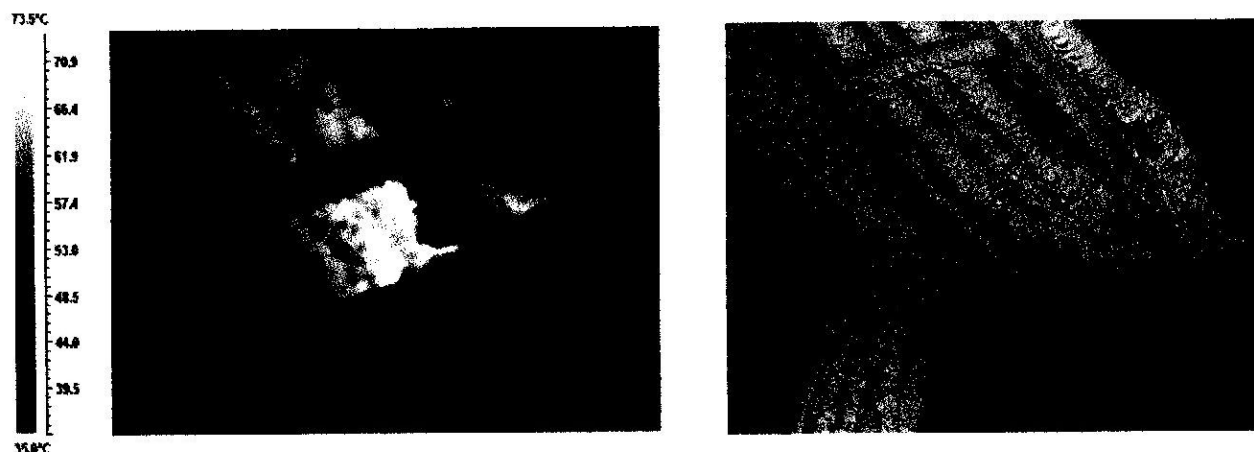


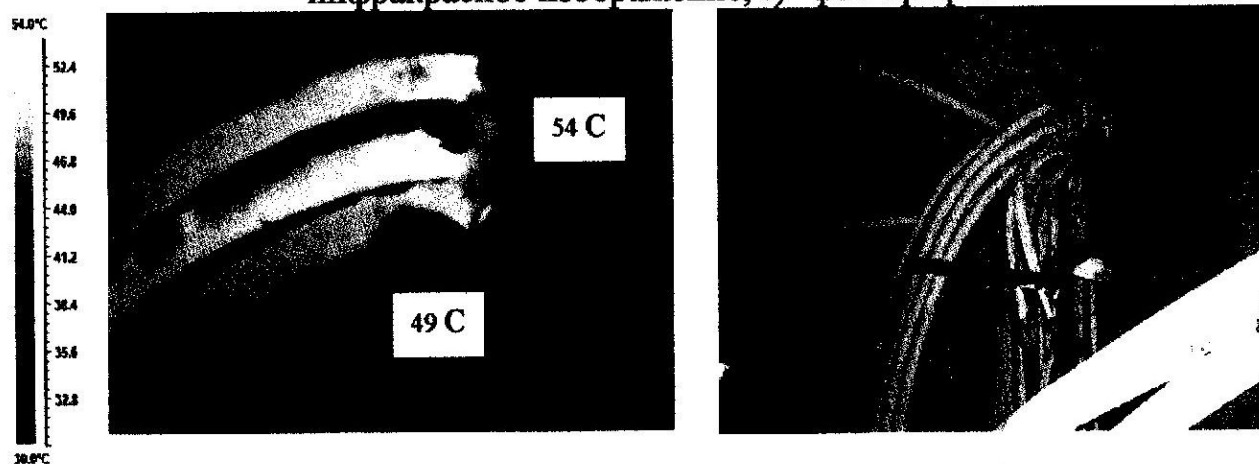
Рисунок А.2 – Калининская АЭС, помещение Э004/4, отметка -4,0. Температура окружающей среды – 20°C, кабелей – до 38°C: а) инфракрасное изображение, б) фотография



a)

б)

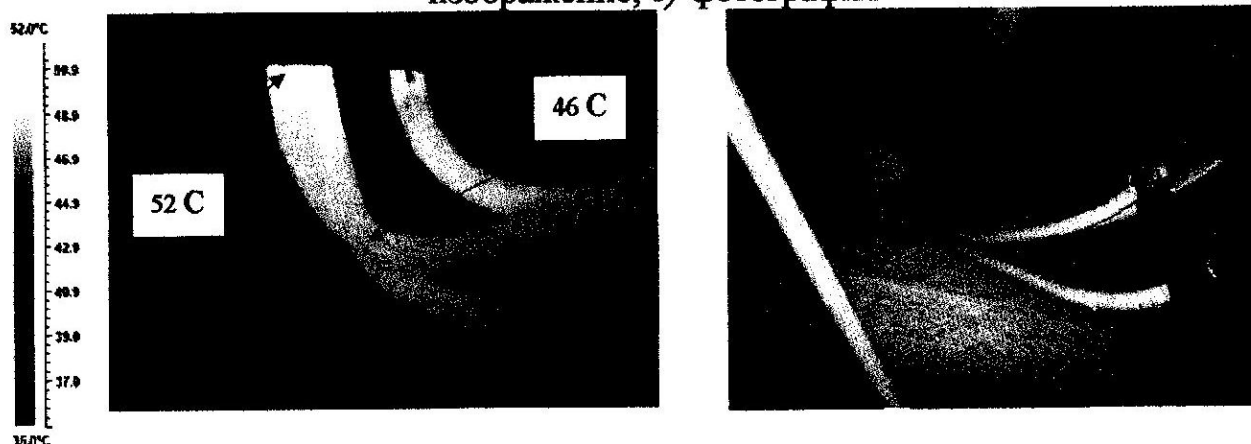
Рисунок А.3 – Смоленская АЭС, помещение 502/6, отметка 19,5, кабельная трасса. Температура окружающей среды – 29 °С, кабелей – до 70 °С: *a)* инфракрасное изображение, *б)* фотография



a)

б)

Рисунок А.4 – Курская АЭС, помещение Г072/6, отметка -3,5 кабельный лоток. Температура окружающей среды – 30°С, кабелей – до 54 °С: *a)* инфракрасное изображение, *б)* фотография



a)

б)

Рисунок А.5 – Курская АЭС, помещение 402/1, отметка +12,0. Кабели ЗГЦН-12. Температура окружающей среды – 30°С, кабелей – до 52°С: *a)* инфракрасное изображение, *б)* фотография

А.2 Показатели состояния по результатам измерения сопротивления изоляции

А2.1 Измерение проводится цифровым мегомметром на напряжение 2500 В в течение 10 минут с шагом не более 5 сек.

А2.2 В качестве показателей технического состояния ПБИ рекомендуется использовать:

- коэффициент абсорбции K_a , определяемый как отношение величин сопротивления изоляции, измеренных через 60 сек и 15 сек, соответственно;
- индекс поляризации PI , определяемый как отношение величин сопротивления изоляции, измеренных через 10 мин и 1 мин, соответственно;
- сопротивление изоляции, измеренное через 1 минуту и пересчитанное для кабеля длиной 1 км.

А2.3 Для оценки состояния следует руководствоваться критериями для K_a и PI , представленными в таблице А.2, и критериями для $R_{из\ 1\ км}$, представленными в таблице А.3, последние были получены опытным путем при комплексной оценке состояния более 200 кабелей с ПБИ после практически 28-30 – летней эксплуатации.

Т а б л и ц а А.2 – Оценка состояния ПБИ по абсорбционным характеристикам

Состояние кабеля	K_a	PI
Работоспособное норма	$K_a > 1,6$	$PI > 4,0$
Работоспособное с незначительными отклонениями	$1,6 \geq K_a \geq 1,4$	$4,0 \geq PI \geq 3,0$
Работоспособное со значительными отклонениями	$1,4 > K_a \geq 1,25$	$3,0 > PI \geq 2,0$
Работоспособное ухудшенное	$1,25 > K_a > 1,0$	$2,0 > PI > 1,0$

Т а б л и ц а А.3 – Оценка состояния ПБИ по сопротивлению изоляции

Состояние кабеля	$R_{из 1 км}, МОм$
Работоспособное	$200 < R_{из 1 км} < 1000$
Работоспособное ухудшенное	$100 < R_{из 1 км} < 200,$ $1000 < R_{из 1 км} < 2400$

А.3 Показатели состояния по результатам измерения восстановленного напряжения

А3.1 Восстановленное напряжение – это напряжение на отсоединенном и предварительно заряженном кабеле, измеряемое после разряда его геометрической емкости. На рисунке А.6 представлена типичная кривая восстановленного напряжения. Для измерения ВН можно использовать наиболее распространенные сегодня на рынке приборы: "CDS" и "AC Tester" производства компаний "SebaKMT" и "Димрус" соответственно.

А3.2 В качестве основных показателей состояния принимаются индекс поляризации PIRV и индекс электропроводности LIRV, которые рассчитываются из кривой восстановленного напряжения [1].

А3.3 Расчет показателей состояния PIRV и LIRV. Два основных процесса определяют величину ВН: объемно-зарядовая (миграционная) поляризации и объемная электропроводность. Это дает основание, для контроля старения и увлажнения электрической изоляции использовать величину и форму ВН. Общепринятыми параметрами описания кривой ВН являются ее максимум U_{rm} , время достижения максимума t_{rm} , начальная крутизна переднего фронта. В [1-4] показано, что кривую восстановленного напряжения $U_r(t)$ можно представить в виде суммы экспонент с постоянными параметрами A_i и τ_i ($i=1 \dots n$)

$$U_r(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (A.1)$$

где t – время.

Для описания реально измеряемых кривых ВН во временном диапазоне 0,1 – 2000 с значение n достаточно взять равным 4 или 5. Типичная кривая ВН и ее компоненты, определенные по модели (А.1) представлены на рисунке А.6.

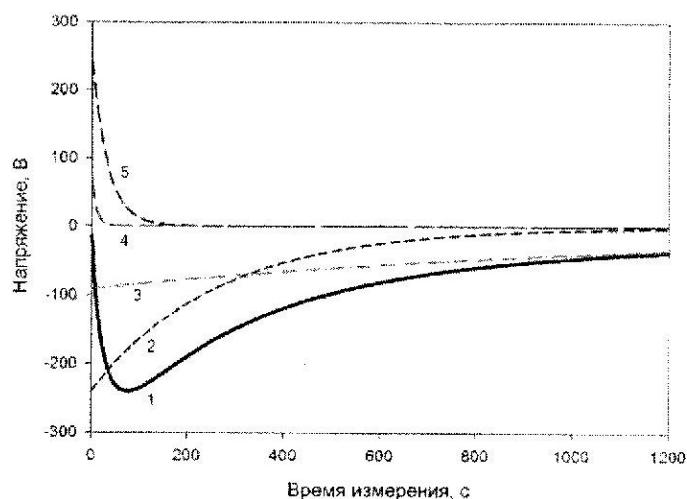


Рисунок А.6 – Типичная кривая восстановленного напряжения (1) и ее компоненты (2 – 5)

В качестве показателей старения и увлажнения изоляции могут выступать параметры A_i , τ_i , U_{rm} , t_{rm} , либо их комбинации, например, средние времена положительных $\bar{\tau}_+$ и отрицательных $\bar{\tau}_-$ компонент, определяемые как отношение суммы произведения их времен на интенсивность на сумму их интенсивностей. Однако эти показатели сильно зависят от окружающей температуры и геометрии изоляции. Поэтому для количественной оценки старения изоляции рассчитывают показатели PIRV и LIRV. Индекс поляризации рассчитываем по формуле

$$PIRV = 10 \cdot \left| \frac{U_{rm}}{A_+} \right|, \quad (A.2)$$

где A_+ – сумма интенсивностей короткоживущих положительных компонент, прямо пропорциональная остаточной поляризации контролируемой изоляционной системы в момент $t=0$, т.е. в момент начала измерений ВН.

Индекс электропроводности LIRV рассчитывается по формуле

$$LIRV = 100 \cdot \left| \frac{U_{rm}}{S_+} \right|, \quad (A.3)$$

где S_+ – сумма площадей под положительными компонентами, которая пропорциональна заряду, протекающему за время релаксации положительных компонент.

При увеличении объемной электропроводности величина S_+ падает, соответственно $LIRV$ – растет.

А.3.4 Критерии для оценки состояния ПБИ методом восстановленного напряжения представлены в таблице А.4.

Т а б л и ц а А.4 – Степень старения бумажной изоляции и состояние кабеля по показателям $PIRV$ и $LIRV$

Состояние кабеля	Степень старения изоляции	Приведенный максимум восстановленного напряжения $PIRV$	Приведенный максимум восстановленного напряжения $LIRV$
	Предельная степень усушки изоляции	$PIRV \leq 6,6$	и $LIRV < 1,5$
Работоспособное ухудшенное	Высокая степень усушки изоляции	$7,6 > PIRV > 6,6$	и $LIRV < 1,5$
Работоспособное со значительными отклонениями	Средняя степень усушки изоляции	$8,7 \geq PIRV \geq 7,6$	и $LIRV < 1,5$
Работоспособное норма	Отсутствует	$PIRV > 8,7$	и $1,5 \leq LIRV \leq 2,0$
Работоспособное с незначительными отклонениями	Низкая	$8,7 \geq PIRV \geq 8,0$	$2,0 < LIRV \leq 3,0$
Работоспособное со значительными отклонениями	Средняя	$8,0 > PIRV \geq 7,6$	$3,0 < LIRV \leq 4,5$
Работоспособное ухудшенное	Высокая	$7,6 > PIRV > 6,6$	$4,5 < LIRV \leq 6,5$
	Предельная	$PIRV \leq 6,6$	$LIRV > 6,5$

А.3.5 В качестве дополнительного показателя состояния можно использовать величину $\overline{\tau}_+$, при условии, что длина тестируемого кабеля составляет более 40 метров. Критерии для показателя $\overline{\tau}_+$ указаны в таблице А.5.

Т а б л и ц а А.5 – Состояние кабеля по значению величины среднего времени короткоживущих компонент кривой восстановленного напряжения (для кабелей длиной более 40 метров)

Состояние кабеля	$\overline{\tau}_+, \text{с}$
Работоспособное	$120 > \overline{\tau}_+ \geq 18,0$
Работоспособное ухудшенное	$18 > \overline{\tau}_+ \geq 15,0$ $115 < \overline{\tau}_+ < 120$

А.4 Показатели состояния по результатам измерения параметров частичных разрядов

А.4.1. Метод OWTS позволяет контролировать состояние ПБИ по параметрам измерения ЧР при затухающем осциллирующем напряжении [4-5]. Для реализации данного метода можно использовать измерительные системы "OWTS" и "CPDA" производства компаний "SebaKMT" и "Димрус" соответственно. Этот метод позволяет определить:

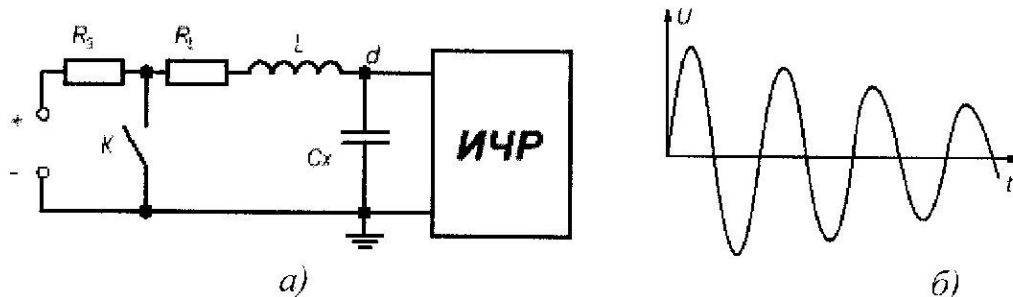
- распределение и величину частичных разрядов по длине линии;
- количество частичных разрядов в проблемных местах;
- зависимость уровня частичных разрядов от напряжения;
- напряжение возникновения ЧР;
- напряжение гашения ЧР;
- тангенс угла диэлектрических потерь;
- электрическую емкость.

Из указанных возможностей метода, в качестве основных являются:

- определение распределения и величины частичных разрядов Q_m по длине линии;
- определение количества частичных разрядов в проблемных местах;
- определение напряжения возникновения ЧР.

В этом методе синусоидальное осциллирующее напряжение возникает при разряде заряженного кабеля емкостью C_X на штатную индуктивность L .

Собственная частота колебательного контура (рисунок А.7) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_X}}$.



R_3 – зарядное сопротивление; L – катушка индуктивности; R_1 – активное сопротивление обмотки катушки индуктивности; K – высоковольтный ключ; ИЧР – измеритель частичных разрядов

Рисунок А.7 – Определение частичных разрядов в изоляции методом измерения частичных разрядов с затухающим осциллирующим напряжением: а) схема измерения; б) напряжение в точке "d"

Достоинства метода:

- не требуется высоковольтный источник переменного напряжения;
- измерительная схема не связана электрически с внешней сетью, что уменьшает уровень помех;
- применение повышенных частот вызывает увеличение тока ЧР, что способствует повышению отношения сигнал-шум;
- ИЧР имеет малое входное сопротивление, что также способствует увеличению тока ЧР.

Синусоидальные колебания затухают за счет диэлектрических потерь в изоляции и за счет выделения энергии на активном сопротивлении катушки (~20 Ом). Величина тока в колебательном контуре определяется активным сопротивлением цепи, так как колебания происходят на резонансной частоте. По причине особенностей схемы измерений ЧР (кажущихся разрядов) этим методом их амплитуда значительно больше, чем амплитуда разрядов при испытании кабелей на заводах изготовителях, где используется другой метод. Поэтому применяемые на кабельных заводах нормативы по уровню частичных разрядов в данном случае не могут быть использованы.

Применение данной схемы измерения предполагает отключение кабеля. Установка генерирует в кабеле синусоидальное осциллирующее напряжение с частотой от 100 до 1000 Гц, в зависимости от емкости кабеля.

Принципиальная схема локации частичных разрядов представлена на рисунке А.8. К выходу системы подключается тестируемый кабель, делитель и детектор частичных разрядов, сигналы с которого через блок АЦП поступают в компьютер. Перед началом испытаний в течение нескольких секунд кабель заряжается от высоковольтного источника постоянного напряжения. После этого автоматически замыкается быстродействующий ключ и в контуре (индуктивность, активное сопротивление кабеля, емкость кабеля) возникает затухающее переменное напряжение синусоидальной формы.

Основными параметрами ЧР в данном случае являются кажущийся заряд или импульс ЧР, интегральный уровень ЧР, напряжение возникновения ЧР и расстояние до места возникновения ЧР. Каждая жила испытывается с обеих сторон кабельной линии, напряжение возникновения ЧР измеряется однократно с двух сторон для каждой жилы.

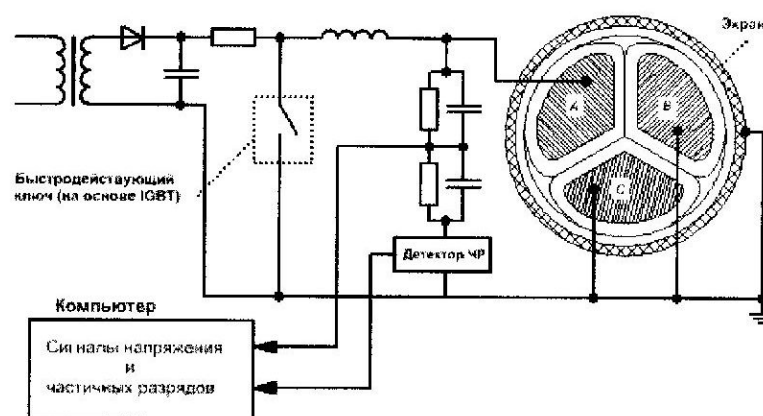


Рисунок А.8 – Принципиальная схема локации частичных разрядов

Для каждой жилы кабеля при напряжении, равном амплитуде рабочего напряжения кабеля, рекомендуется проводить 10 испытаний (по пять с каждой стороны кабеля). Как правило, величина кажущегося заряда ЧР корректируется системой измерения с учетом затухания сигнала по длине кабеля. Напряжение возникновения ЧР усредняется по двум значениям, полученным для каждой жилы кабеля.

А.4.2 В таблице А.6 представлены рекомендуемые разработчиком установки CPDA-30 критерии для оценки состояния силовых кабелей среднего напряжения с ПБИ по уровню частичных разрядов [6]. Однако, их применение к типичным дефектам для кабелей с ПБИ не подтверждено лабораторными и полевыми испытаниями, поэтому эти критерии в данных МР рекомендуется для качественной оценки состояния кабеля. Для количественной оценки состояния следует применять показатели состояния PIRV и LIRV, рассчитываемых из кривой восстановленного напряжения.

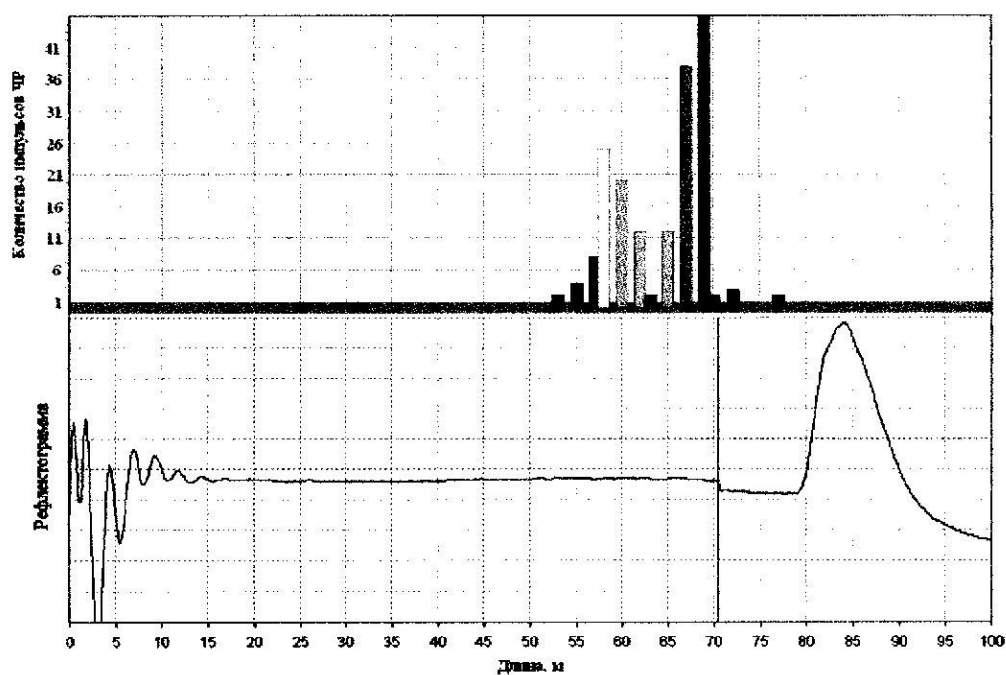
А.4.3 Таким образом, OWTS в данных МР рассматривается как метод:

- определения распределения дефектов, имеющих свободный объем для образования ЧР, главным образом, это дефекты типа усушки по длине кабельной линии;
- определение количества (уровня) частичных разрядов в дефектных местах для сравнительного анализа этих дефектов.

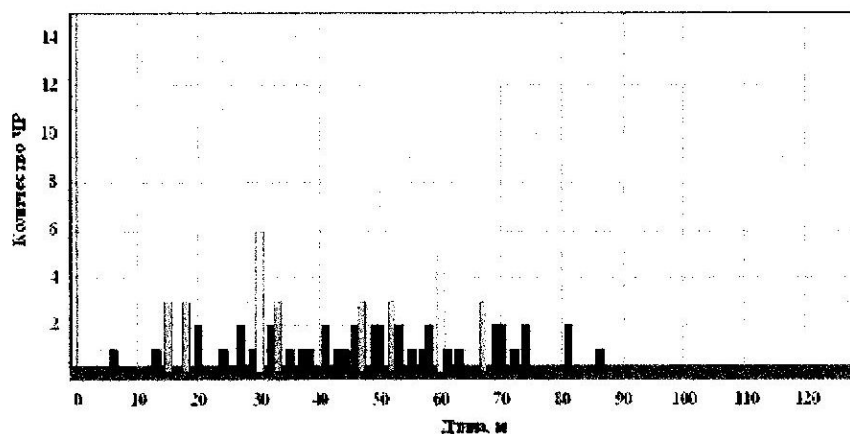
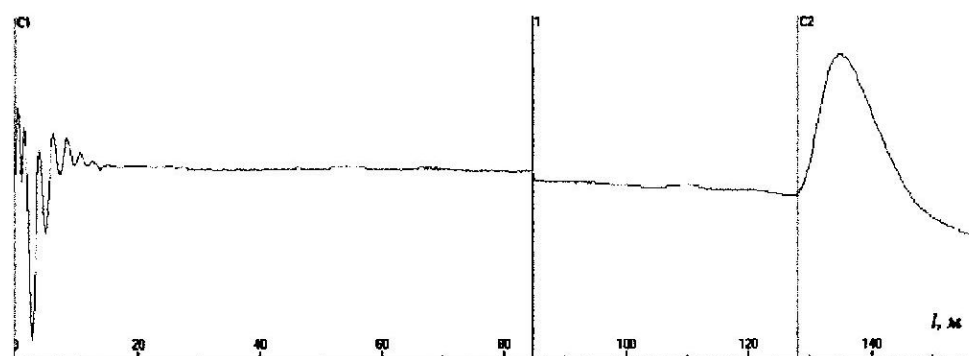
Т а б л и ц а А.6 – Оценка состояния силовых кабелей низкого напряжения с ПБИ по уровню частичных разрядов

Уровень частичных разрядов, пКл	Состояние кабельной линии	Рекомендации по контролю и техническому обслуживанию
от 0 до 3000	Работоспособное норма	Техническое обслуживание проводить согласно эксплуатационным документам
от 3000 до 6500	Работоспособное с отклонениями, возможно появление развитых дефектов из-за деградации изоляции	Повторный контроль в течение двух лет
от 6500 до 10000	Работоспособное ухудшенное, высокий риск появления развитых дефектов из-за деградации изоляции	Ежегодный контроль
Более 10000		Ремонт кабельной линии

На рисунке А.9 а) и б) приведены характерные результаты диагностики дефектов типа усушка ПБИ методом OWTS. На этих рисунках распределение ЧР вдоль кабеля совмещено с пространственно-временной рефлектограммой.



а)



б)

Рисунок А.9 – Распределение частичных разрядов вдоль кабельных трасс и соответствующие им пространственно-временные рефлектограммы:
а) частичные разряды на участке кабеля с нарушенным теплообменом из-за наличия покрытия ОЗС; б) частичные разряды на вертикальном участке трассы кабеля

А.5 Показатели состояния по результатам измерения диэлектрических потерь в широком диапазоне частот

А5.1 Метод ЧДС рекомендуется применять в данных МР в качестве дополнительного метода, например, когда необходимо определить количественное содержание влаги в изоляции кабеля, когда необходимо точно выявить преобладающие механизмы старения при оценках остаточного срока службы. Для реализации данного метода можно использовать приборы "IDAX 300", "IDAX 306" и "FreDA" производства компаний "Megger" и "Димрус" соответственно.

А5.2 Для определения интегрального содержания воды в соответствии с техническим документом 1.2.4.10.0060014 необходимо провести измерение тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне от 0,001 до 1000 Гц (допускается проведение измерений спектра в диапазоне от 0,01 до 1000 Гц только при определении содержания влаги в бумажной изоляции). Интегральное содержание влаги W_C в бумажной изоляции рассчитывается по формуле [7]

$$W_C = 15,3 + 2,53 \ln(\operatorname{tg} \delta_{\min}), \% \quad (\text{A.4})$$

где $\operatorname{tg} \delta_{\min}$ – значение тангенса в минимуме спектра диэлектрической кривой (пример оценки величины $\operatorname{tg} \delta_{\min}$ из характерного спектра диэлектрических потерь изоляции кабеля представлен на рисунке А.10).

А5.3 Оценку состояния кабелей по содержанию влаги в изоляции следует проводить согласно классификации, представленной в таблице А.7.

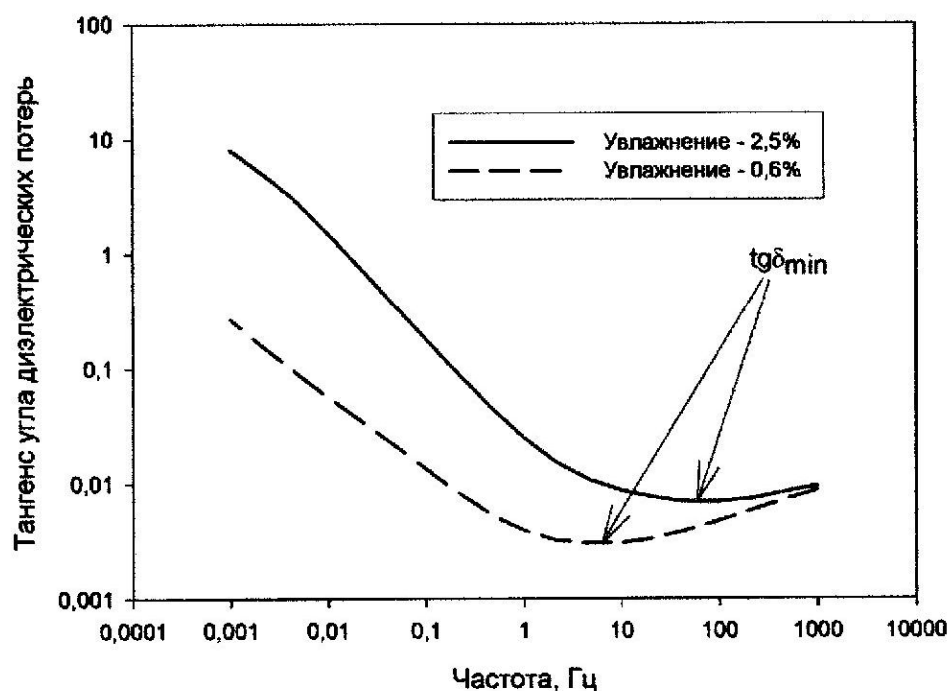


Рисунок А.10 – Характерные спектры диэлектрических потерь пропитанной бумажной изоляции кабеля с разным содержанием влаги

Т а б л и ц а А.7 – Классификация технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией по увлажнению изоляции

Классификация состояния кабеля	Степень увлажнения изоляции	Содержание влаги в изоляции W_c , %
Работоспособное норма	Увлажнение отсутствует	$W_c < 0,5$
Работоспособное с незначительными отклонениями	Низкая	$0,5 \leq W_c \leq 1,0$
Работоспособное со значительными отклонениями	Средняя	$1,0 < W_c \leq 2,0$
Работоспособное ухудшенное	Высокая	$2,0 < W_c \leq 3,5$

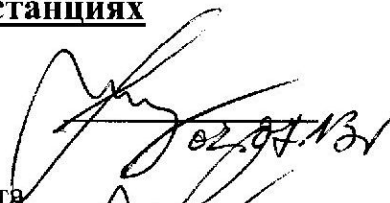
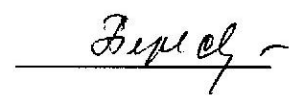
Библиография

- [1] ЭЛЕКТРО, №5, 2012, С.47-52 Кононенко А.И., Хохряков А.В., Слабоус Р.В., Ратников Д.А. "Новые показатели восстановленного напряжения для контроля состояния электрической изоляции"
- [2] Электротехника, С.47-55, №5, 2010 Кононенко А.И., Хохряков А.В. "Оценка состояния бумажной электрической изоляции по результатам измерений восстановленного напряжения."
- [3] 19th International Conference on Nuclear Engineering, May 16-19, 2011, Chiba, Japan Kononenko A.I., Chlenov A.M., Tsikanin A.G. Nondestructive control of condition and prediction of cable life time at nuclear power plants.
- [4] ЭЛЕКТРО, №2, 2010. С.35-39 Авдонин А.В., Левин Д.М., Ивасюк В.Ю., Михель А.А. «Критерии для диагностики кабельных линий методом OWTS»
- [5] Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 367 с. Русов В.А. / Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования.
- [6] ООО "Димрус", Пермь, 2012 – 84 "CPDA-30" Система контроля изоляции кабельных линий. Руководство по эксплуатации. Версия 2.0
- [7] IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA, July 16-20, 2000 Neimanis R., Saha T.K., R. Eriksson «Determination of Moisture Content in Mass Impregnated Cable Insulation Using Low Frequency Dielectric Spectroscopy»

Лист согласования первого уровня

Методические рекомендации по диагностике технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на атомных

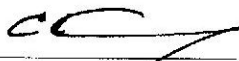
станциях

/ Заместитель директора по производству и эксплуатации АЭС		<u>Н.Н. Давиденко</u>
Заместитель директора Департамента инженерной поддержки		<u>Ю.П. Тетерин</u>
Главный технолог Департамента инженерной поддержки		<u>К.Ш. Юзмиев</u>
Нормоконтролер		<u>Н.Г. Пересветова</u>



Лист согласования и визирования второго уровня

Методические рекомендации по диагностике технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на атомных станциях

Директор Технологического филиала ОАО "Концерн Росэнергоатом»	 подпись	<u>С.А. Карпутов</u> инициалы, фамилия
Начальник ЭТО Технологического филиала ОАО «Концерн Росэнергоатом»	 подпись	<u>О.В. Паньшин</u> инициалы, фамилия
Главный специалист Технологического филиала ОАО «Концерн Росэнергоатом»	 подпись	<u>С.Е. Бондарчук</u> инициалы, фамилия

Лист согласования и визирования третьего уровня

Диагностика технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на атомных станциях

Заместитель директора по науке ФГУП "НИИП"	 подпись	<u>В.Н. Улимов</u> инициалы, фамилия
Начальник отдела эксплуатационной устойчивости ФГУП "НИИП", разработчик методических рекомендаций	 подпись	<u>А.И. Кононенко</u> инициалы, фамилия