



РОСАТОМ



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

А.И. Кононенко

Начальник отдела ФГУП «НИИП»

Email: [aikonenko@niipribor.ru](mailto:aikononenko@niipribor.ru)

Тел.: +7 495 5523807

Цель доклада

- Представить технический документ методические рекомендации 1.2.02.0168-2013 «Диагностика технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на атомных станциях»

Общие положения

- МР разработаны на основе опыта диагностики технического состояния силовых кабелей с ПБИ различных типов, в том числе, ААШв, ААБлнГ, ЦААБлн напряжением от 0,4 до 10 кВ
 - Выявлены доминирующие механизмы старения кабелей данного типа
 - Определено, что для оценки состояния необходимо применять несколько методов диагностики (контроля)
 - Установлены эффективные методы неразрушающего контроля
 - Определены численные критерии фактического состояния кабелей по новым показателям состояния ПБИ

Общие положения (продолжение)

- МР регламентирует проведение
 - экспресс-диагностики – интегральной оценки технического состояния силовых кабелей с ПБИ персоналом ЭЦ в рамках ТОиР на основе измерения $R_{из}$ и использования временной рефлектометрии
 - углубленной диагностики для локализации дефектов старения по кабельным трассам и оценки их остаточного срока службы на основе измерения восстановленного напряжения (ВН) и регистрации параметров частичных разрядов на осциллирующем затухающем напряжении (OWTS)

Основные эффекты старения силовых кабелей с ПБИ при эксплуатации на АЭС

- Усыхание бумажной изоляции на локальных участках кабельных трасс (прокладка кабелей в трубах, стенных проходках, покрытие ОЗС и т.п. и наличия вертикальных участков трасс)
- Обеднение пропиточного состава для кабелей типа ААБлнГ и последующее ускоренное усыхание бумажной изоляции
- Увлажнение бумажной изоляции на участках, примыкающих к некачественно изготовленным концевым заделкам и соединительным муфтам
- Усыхание/увлажнение ПБИ в местах повреждений защитных оболочек (при прокладке, выполнении ТОиР)

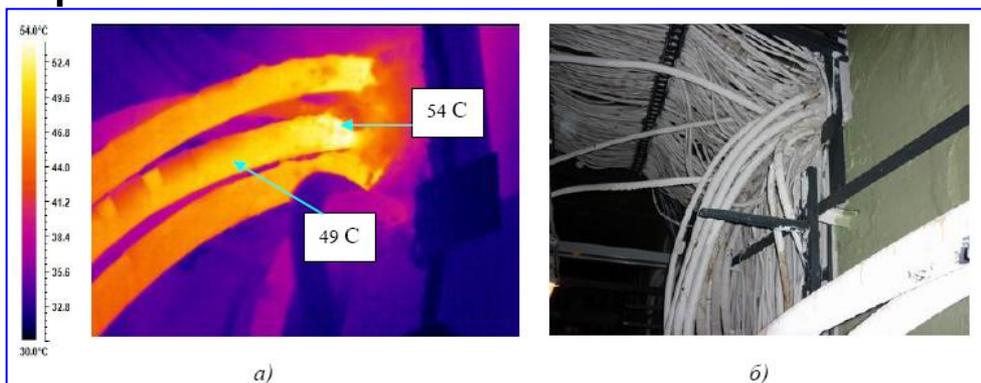
Изменение технических характеристик кабелей в процессе старения

- Усыхание ПБИ ведет к охрупчиванию бумаги
 - на первом этапе наблюдается увеличение $R_{из}$, увеличение интенсивности и величины ЧР (при наличии дополнительных ВВФ может наблюдаться переход в предельной состояние)
 - на втором этапе из-за науглероживания бумаги объемная электропроводность изоляции увеличивается, наблюдается «тушение» ЧР, сопротивление изоляции падает вплоть до предельных значений
- Увлажнение ПБИ – постепенное снижение $R_{из}$ вплоть до предельных значений

Методы диагностики и контроля.

Визуальный и тепловизионный контроль

- Самый простой метод для обнаружения **развитых** дефектов в **доступных** для визуального контроля трассах кабелей



Методы диагностики и контроля. Риз и абсорбционные характеристики

Состояние кабеля	Коэффициент абсорбции (K_a)	Индекс поляризации (PI)	Сопротивление нормированное на 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
Предельное	$K_a \leq 1,0$	$PI \leq 1,0$	$R_{из 1 км} \geq 2400$ (усушка изоляции) $R_{из 1 км} \leq 100$ (локальные токовые утечки)

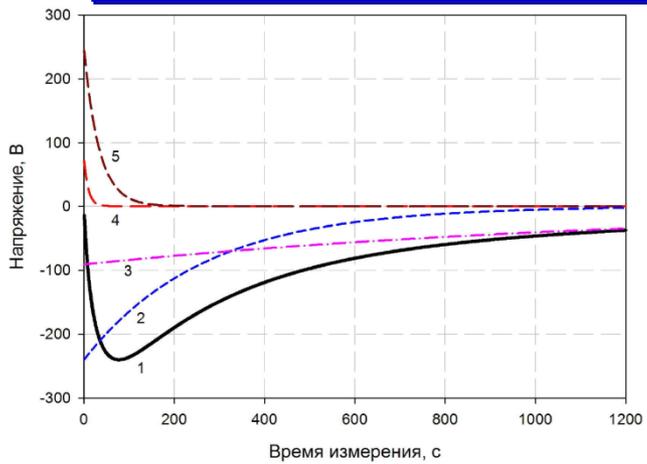


- Низкая чувствительность к объемным дефектам, которые не вносят вклад в сквозной ток проводимости

Методы диагностики и контроля. Восстановленное напряжение

Электро №5, 2012

Электротехника, №5, 2010



$$I_r(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

Индекс поляризации по восстановленному напряжению

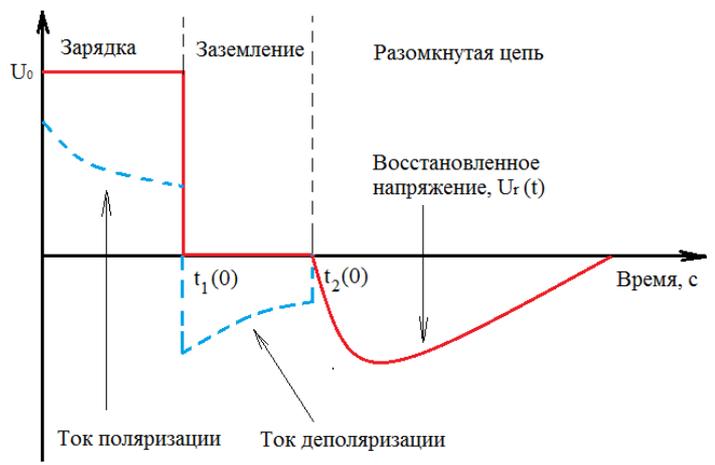
$$PIRV = 10 \cdot \left| \frac{U_{rm}}{A_+} \right|$$

Индекс электропроводности по восстановленному напряжению

$$LIRV = 100 \cdot \left| \frac{U_{rm}}{S_+} \right|$$

Среднее время короткоживущих компонент

$$\overline{\tau_+}$$



Методы диагностики и контроля. Восстановленное напряжение. Критерии

Состояние кабеля	Степень старения изоляции	Приведенный максимум восстановленного напряжения <i>PIRV</i>	Приведенный максимум восстановленного напряжения <i>LIRV</i>
Предельное	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	$7,6 > PIRV > 6,6$	$4,5 < LIRV \leq 6,5$
Предельное	Предельная	$PIRV \leq 6,6$	$LIRV > 6,5$

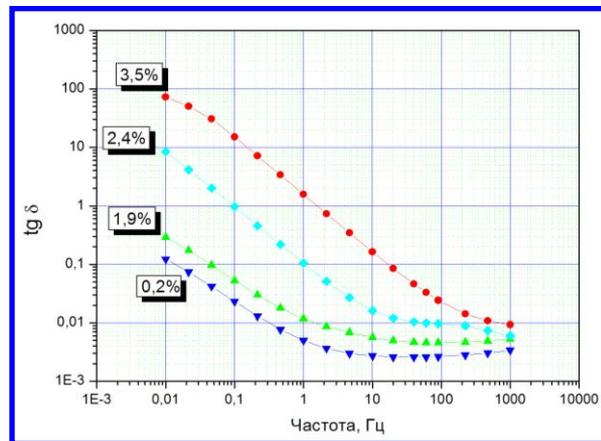
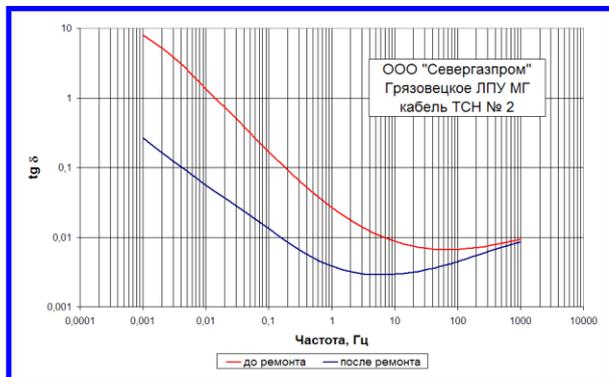
Методы диагностики и контроля. Восстановленное напряжение. Критерии (продолжение)

- Критерии для $\overline{\tau_+}$ (для кабелей длиной более 40 м)

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

Методы диагностики и контроля.

Частотно- диэлектрическая спектроскопия



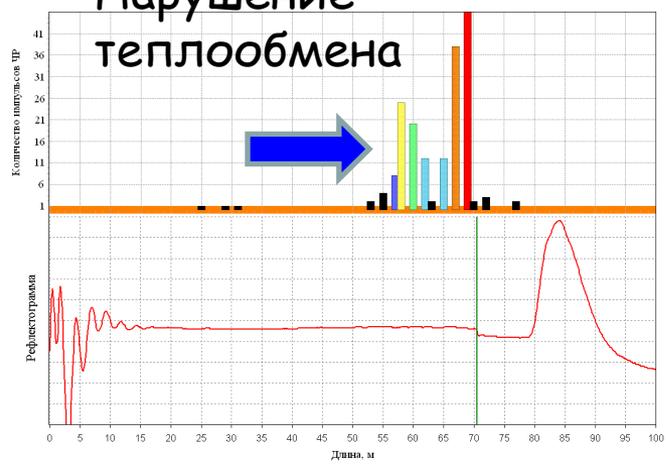
$$W_C = 15,3 + 2,53 \ln(tg \delta_{\min}), \%$$

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	$2,0 < W_C \leq 3,5$
Предельное	Предельная	$W_C > 3,5$ ($W_C > 4,5$ если дефект не локальный)

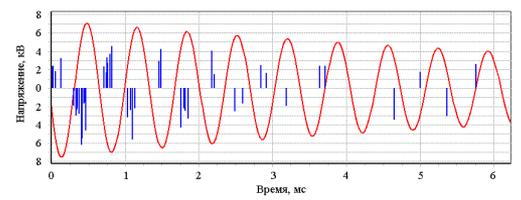
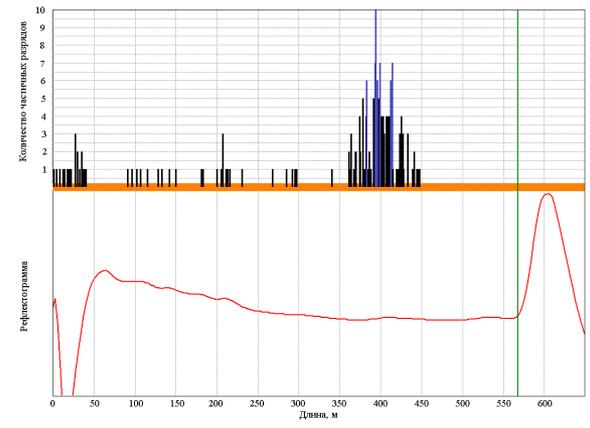


Методы диагностики и контроля. OWTS и рефлектометрия

Нарушение теплообмена



Вертикальная трасса



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	Предельное	Ремонт кабельной линии

Классификация состояния кабелей и рекомендации по их ТОиР

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, K_a . 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.
Предельное		Предельная степень старения	Плановый ремонт или замена кабеля (участка кабеля).

ПС и прогнозирование

- ПС для экспресс диагностики
 - Ка, PI, Rиз 1 км
- ПС для углубленной диагностики
 - LIRV, PIRV, τ_+ , параметры ЧР при измерении методом OWTS, Wc
- Прогнозирование
$$\begin{cases} \tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{д}} \cdot \frac{I_{\text{Пр}} - I_{\text{д}}}{I_{\text{д}} - I_{\text{о}}} & \text{при увеличении ПС в процессе старения, либо} \\ \tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{д}} \cdot \frac{I_{\text{д}} - I_{\text{Пр}}}{I_{\text{о}} - I_{\text{д}}} & \text{при уменьшении ПС в процессе старения} \end{cases}$$
- Контроль состояния – один раз в 6 лет



Спасибо за внимание!