

Измерение восстановленного напряжения (ВН) в изоляции кабелей и электро-техническом оборудовании используют как метод контроля их технического состояния, к примеру, кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ). Величину ВН определяют два основных процесса: объемно-зарядовая (миграционная) поляризация и объемная электропроводность [1]. Это дает основание считать, что контроль старения и увлажнения бумажной электрической изоляции можно осуществлять по величине и форме ВН.

Александр Иванович Кононенко в своем материале рассматривает новые диагностические параметры для оценки технического состояния электрической изоляции, которые рассчитывают из кривой ВН.



Александр Кононенко,
к.т.н., начальник управления
диагностики и испытаний
электротехнических элементов
атомных станций и ядерных
установок АО «Научно-
исследовательский институт
приборов»,
г. Лыткарино, Моск. области

СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ С ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Опыт технического диагностирования

Широкое внедрение в практику метода измерения восстановленного напряжения сдерживается из-за отсутствия полного понимания процесса: каким образом из кривой ВН получить количественные показатели для описания старения и увлажнения изоляции, так как не удавалось выделить вклад электропроводности и поляризации в эту кривую. Задача усложняется еще и тем, что величина и форма ВН зависят как от температуры и геометрии контролируемой изоляции, ее типа, так и от параметров, напрямую формирующих величину и форму ВН: напряжения зарядки U_{ch} , времени зарядки t_c и времени частичной предварительной разрядки t_d .

В данной статье описан подход к оценке состояния электрической изоляции, который позволяет разделять вклад объемной поляризации и электропроводности, полученный на основании анализа результатов измерения ВН в силовых кабелях напряжением 6 кВ с ПБИ, имеющих разную степень старения изоляции после многолетней эксплуатации в кабельных помещениях АЭС. Помимо измерения ВН, для контроля состояния кабелей проводили измерение сопротивления изоляции, тангенса угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот от 0,001 до 1000 Гц, измерение параметров частичных разрядов на затухающем осциллирующем напряжении (метод OWTS) и использовали импульсную рефлектометрию.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗ КРИВЫХ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Основанием для разработки новых параметров диагностики (ПД) явился подход для описания кривой восстановленного напряжения $U_r(t)$, основанный на традиционном приближении, при котором реальный релаксационный спектр полимера заменяется дискретным набором релаксаторов Дебая [1]. Это дает возможность проводить анализ в рамках теории линейных электрических цепей, представляя совокупность дебаевских релаксаторов электрической схемой замещения параллельно соединенных $R_i C_i$ цепочек ($i = 1, \dots, n$). Оценки, приведенные в [1], показали, что за начальный рост ВН ответственны релаксаторы с характерными временами, составляющими $(0,2-50) \cdot t_d$, в то время как максимум ВН формируется за счет релаксационных процессов с временами порядка $100 \cdot t_d$ и объемной электропроводности изоляционного материала.

Для практики важным является то, что сокращение числа релаксационных процессов до трех с постоянными временами около 1, 10 и 100 секунд практически не теряет точности описания $U_r(t)$. На основании оценок, представленных в [1], для описания $U_r(t)$ можно использовать полуэмпирическую модель в виде суммы экспонент с постоянными параметрами A_i и τ_i :

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

где t – время.

Причем для описания реально измеряемых кривых ВН во временном диапазоне от 0,1 до 2000 секунд значение n достаточно взять равным 3, 4 или 5. Типичная кривая и ее

компоненты, определенные по модели (1), представлены на рис. 1. Здесь, как традиционно принято, полярность ВН – отрицательная, поэтому короткоживущие компоненты имеют положительную полярность. Кажется очевидным, что в качестве ПД электрической изоляции могут выступать параметры A_i и τ_i или максимум ВН U_{rm} и его положение на временной шкале T_{rm} , но эти параметры зависят, во-первых, от геометрических размеров изоляции, во-вторых, эти показатели не дают возможность проводить одновременно количественную оценку как изменения электропроводности, так и изменения поляризационных свойств изоляции.

Обычно параметры $U_r(t)$ используют для оценки увлажнения электрической изоляции, так как качественно понятно, что увеличение электропроводности приведет к «тушению» кривой $U_r(t)$, т.е. к уменьшению величины и сдвигу влево по временной шкале кривой $U_r(t)$ [2, 3].

На практике такое ограниченное применение ВН при проведении технического диагностирования может привести к ошибочным выводам о состоянии изоляции. В качестве примера таких ошибок можно рассматривать диагностику силовых кабелей с ПБИ, имеющих типичный дефект – усыхание бумажной изоляции. Такие дефекты образуются на вертикальных участках кабельных трасс после длительной эксплуатации из-за обеднения пропиточного состава. Развитие этих дефектов до определенного момента ведет к сдвигу кривой $U_r(t)$ вправо и увеличению ее максимума. Таким образом, использование традиционных диагностических параметров может привести к ошибочным выводам о состоянии кабелей с ПБИ.

В работах [4, 5] описан новый подход к определению ПД из кривой $U_r(t)$. Развитие дефектов в электрической изоляции, как правило, приводит к появлению новых или изменению существующих в ее объеме зарядовых состояний и изменению электропроводности. Для контроля за этими процессами предложено использовать два показателя: индекс поляризации ($PIRV$) по восстановленному напряжению и индекс электропроводности ($LIRV$). Оба этих показателя рассчитывают из величины максимума ВН.

$PIRV$ определяется как отношение максимума ВН U_{rm} к сумме интенсивностей короткоживущих положительных компонент A_+ :

$$PIRV = 10 \cdot |U_{rm} / A_+|, \quad (2)$$

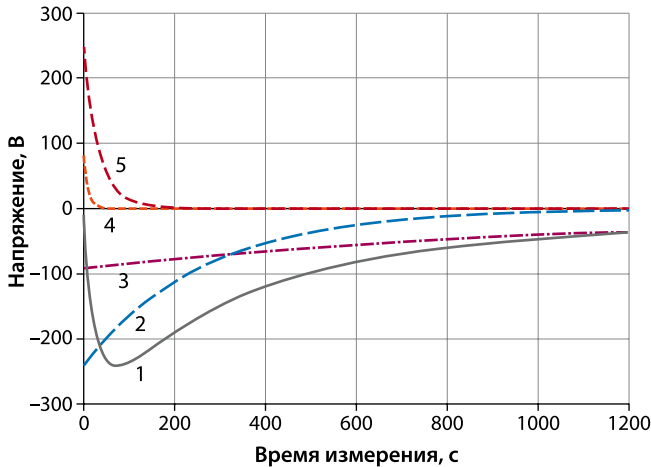
а показатель $LIRV$ определяется как отношение U_{rm} к общей площади короткоживущих компонент S_+ :

$$LIRV = 100 \cdot |U_{rm} / S_+|. \quad (3)$$

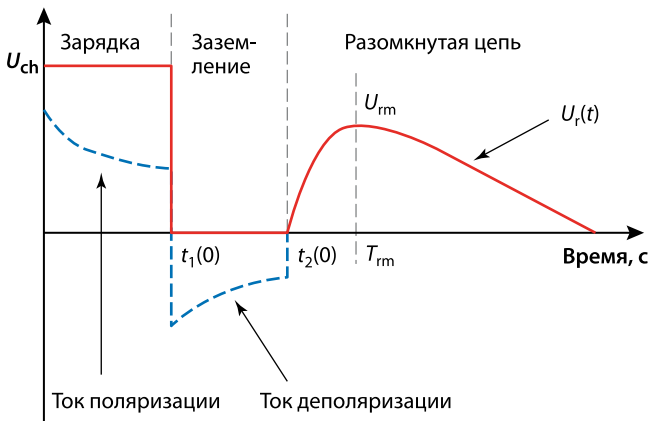
В обоих случаях множители и знак модуля введены для удобства использования показателей $PIRV$ и $LIRV$.

Деление U_{rm} на A_+ фактически представляет нормировку U_{rm} на величину объемной остаточной поляризации изоляции в момент начала измерения ВН. Такая нормировка позволяет количественно сравнивать между собой $PIRV$ для промыш-

Типичная кривая восстановленного напряжения (1) и ее компоненты (2–5) **Рис. 1 •**



Процесс формирования кривой восстановленного напряжения **Рис. 2 •**



ленных диэлектриков различных геометрических размеров и конфигураций, например для изоляции кабелей разной длины и сечения.

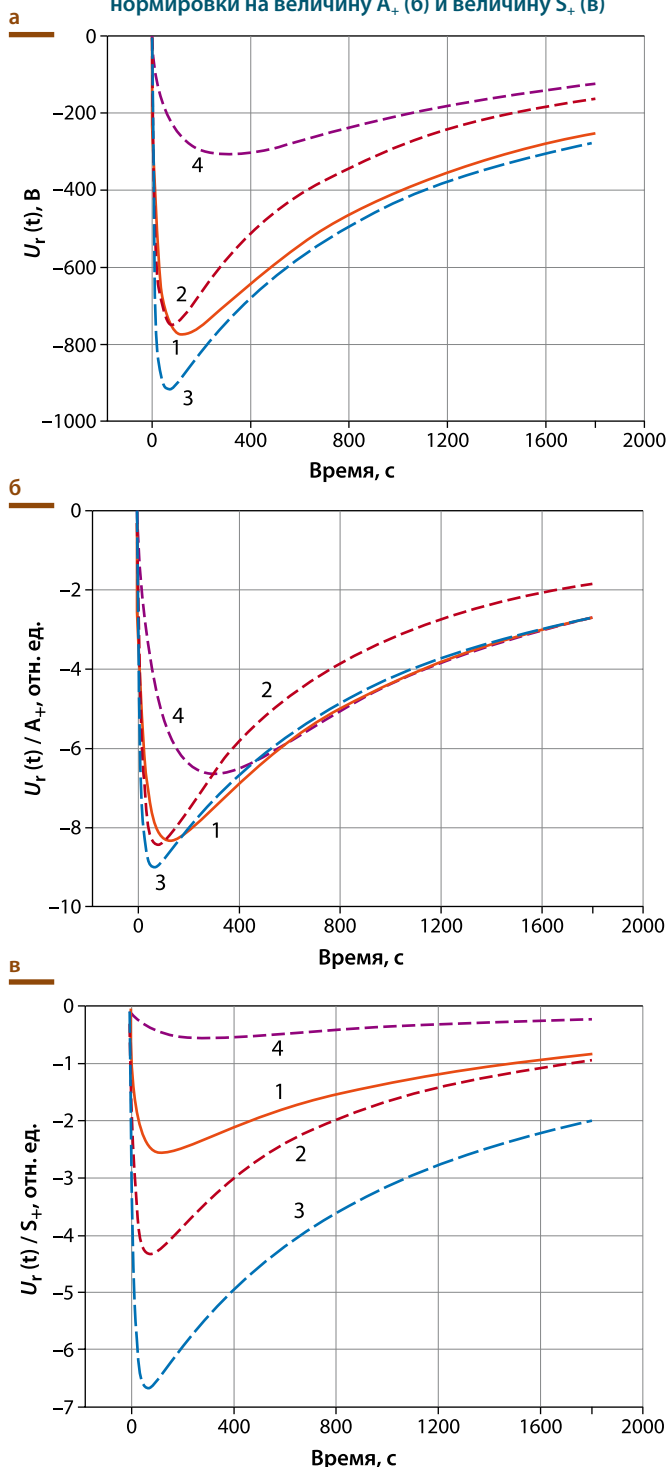
Действительно, в каждый момент времени кривая $U_r(t)$ определяется двумя процессами в электрической изоляции: деполяризацией объемных зарядовых состояний и электропроводностью, кроме одной точки на данной кривой – начальной точки $t_2(0)$ по временной шкале (рис. 2). В точке $t_2(0)$ кривая $U_r(t)$ определяется высокой электропроводностью металлического проводника (изоляция в промежутке $t_1(0)–t_2(0)$ шунтируется металлическим проводником) и процессом деполяризации в изоляции.

Деление U_{rm} на величину S_+ представляет собой нормировку U_{rm} на величину объемного заряда, который определяет токи деполяризации короткоживущих зарядовых состояний. Такая «внутренняя» нормировка позволяет количественно оценивать по величине $LIRV$ объемную проводимость изоляции независимо от ее геометрических размеров и конфигурации.

Как было сказано выше, U_{rm} , а значит $PIRV$ и $LIRV$, зависят от времени предварительной зарядки t_d , другими словами, определяются объемными поляризационными состояниями с временем релаксации около $100 \cdot t_d = 100 \cdot (t_2(0) - t_1(0))$, т.е. для того, чтобы оценить изменения всего спектрального состава поляризационных состояний, следует проводить измерения при различных t_d . Опыт, полученный еще производителями установок CD-31/30 для измерения ВН [2], показал, что оптимальной величиной для целей диагностики кабелей с ПБИ является $t_d = 2$ с. Как правило, именно это значение t_d по умолчанию устанавливается в приборах для измерения ВН в кабелях с ПБИ.

• Таблица 1. Диагностические параметры для силовых кабелей с ПБИ

| Условный номер кабеля | Марка кабеля | Длина кабеля, м | $T_{гм}, c$ | $U_{гм}, B$ | $PIRV, o.e.$ | $LIRV, o.e.$ | $R_i, MO\Omega$ для 1 км | PI | K_a | Содержание влаги $W, \%$ |
|-----------------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------------------|------|-------|--------------------------|
| 1 | ЦААБЛн 3×150 | 121 | 129,0 | 773,0 | 8,4 | 2,6 | 369 | 3,5 | 2,7 | 1,2 |
| 2 | ЦААБЛн 3×150 | 85 | 80,5 | 746,3 | 8,4 | 4,3 | 297 | 2,8 | 2,7 | 1,3 |
| 3 | ЦААБЛн 3×150 | 177 | 69,5 | 915,7 | 9,0 | 6,6 | 205 | 2,5 | 2,8 | 1,3 |
| 4 | СПШВ-3×240 | 127 | 281,0 | 389,0 | 7,0 | 0,7 | 1560 | 2,2 | 2,3 | Нет данных |

• Рис. 3. Кривые восстановленного напряжения (а) для представительных кабелей и их производные после нормировки на величину A_+ (б) и величину S_+ (в)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЕЙ

В рамках работ по управлению ресурсом кабелей на АЭС нами была проведена диагностика более 500 силовых кабелей с ПБИ напряжением 6 кВ. Длина кабелей в основном составляла 50–200 м, только отдельные кабели имели длину до 2000 м. Срок эксплуатации составлял более 30 лет. Основные трассы кабелей проходят в помещениях энергоблоков вне герметичной оболочки (внутри герметичной оболочки применяются кабели из сшитого полиэтилена).

При проведении технического диагностирования, как правило, до отключения кабелей, проводится тепловизионный контроль кабельных трасс при наличии доступа к ним для выявления «горячих точек». Для измерения сопротивления изоляции R_i на напряжении 2,5 кВ используется стандартный цифровой мегомметр. Для временной рефлектометрии кабельных линий применяли рефлектометр марки Digiflex COM. Измерение восстановленного напряжения проводили прибором AC Tester при зарядовом напряжении 2 кВ, время зарядки составляло 30 минут, время предварительной разрядки – 2 с, время измерения ВН – 30 минут. Для реализации метода OWTS использовали установку CPDA 30. Дополнительно для некоторых кабелей измеряли тангенс угла диэлектрических потерь $\tan\delta$ в диапазоне частот от 0,001 до 1000 Гц, используя установку IDA 200 либо IDAX 350. Измерение $\tan\delta$ проводили для оценки абсолютной величины увлажнения бумажной изоляции [6] и для выявления причины повышения электропроводности изоляции: является это следствием увлажнения или науглероживания бумажной изоляции.

Назовем причины и механизмы старения кабелей ПБИ.

Во-первых, это усыхание и старение бумажной изоляции на локальных участках кабельных трасс из-за:

- нарушения теплообмена между кабелем и окружающей средой (прокладка кабелей в трубах, в стенных проходках, покрытие огнезащитными составами);
- наличия вертикальных участков кабельных трасс (на этих участках образуются области с обедненным маслосодержащим пропиточным составом).

Во-вторых, это увлажнение бумажной изоляции на участках, примыкающих к концевым муфтам (влажный окружающий воздух «засасывается» в изоляцию из-за разницы давления во время снятия электрической нагрузки и понижения температуры жилы).

Отказы кабелей в помещениях преимущественно связаны с усыханием ПБИ с последующим охрупчиванием бумаги. Можно выделить условно две разные траектории старения, приводящие к предельному состоянию кабелей по этому механизму:

- усыхание ПБИ, которое сопровождается повышением сопротивления изоляции R_i . Предельное состояние наступает «неожиданно», как правило, после появления дополнительных внешних воздействующих факторов, например, повышения температуры на участке трассы или механической деформации кабеля при проведении технического обслуживания находящегося рядом оборудования;
- усыхание ПБИ, которое сопровождается уменьшением R_i до предельной величины из-за науглероживания бумаги под воздействием частичных разрядов и наличия изгибов кабельных трасс в местах усыхания изоляции, например в месте выхода кабеля из вертикальной шахты на горизонтальный уровень.

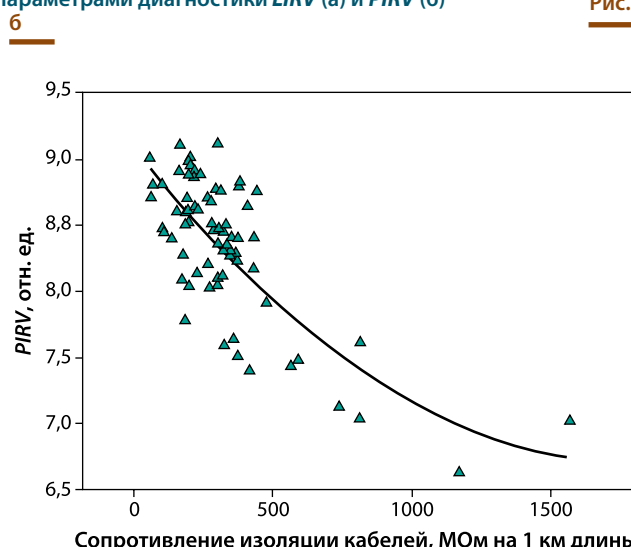
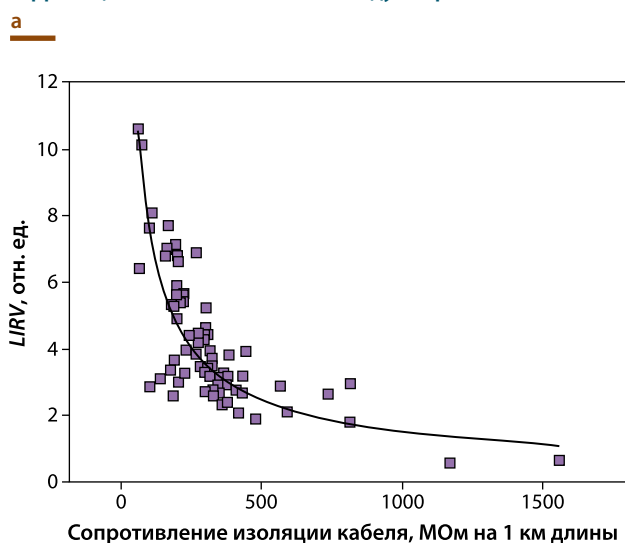
Критерии оценки состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией

Таблица 2 •

| Состояние кабеля / Степень старения изоляции | Параметр $PIRV$ | Параметр $LIRV$ |
|---|--|-----------------------|
| Предельное / Предельная степень усыхания изоляции | $PIRV \leq 6,6$ и $LIRV < 0,7$ | |
| Работоспособное ухудшенное / Высокая степень усыхания изоляции | $7,6 > PIRV > 6,6$ и $0,7 \leq LIRV < 0,9$ | |
| Работоспособное со значительными отклонениями / Средняя степень усыхания изоляции | $8,7 \geq PIRV \geq 7,6$ и $0,9 \leq LIRV \leq 1,5$ | |
| Норма / Отсутствует | $PIRV > 8,7$ и $1,5 < LIRV \leq 2,0$ | |
| 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 | $7,6 > PIRV \geq 6,6$ | $4,5 < LIRV \leq 6,5$ |
| Предельное / Предельная | $PIRV < 6,6$ | $LIRV > 6,5$ |

Корреляционные зависимости между сопротивлением изоляции и параметрами диагностики $LIRV$ (а) и $PIRV$ (б)

Рис. 4 •



На рис. 3 представлены типичные кривые $U_r(t)$ и их производные, полученные делением каждого значения $U_r(t)$ на величину A_+ (рис. 3б) и на величину S_+ (см. рис. 3в), для четырех представительных кабелей с разным уровнем старения.

Сравнение кривых $U_r(t)$ и $U_r(t) / A_+$, $U_r(t) / S_+$ показывает, какие процессы старения преобладают в ПБИ. Количественно глубину старения следует оценивать по максимуму этих кривых, т.е. по параметрам $U_{\text{тм}}$, $PIRV$, $LIRV$ (табл. 1). Одновременно с показателями $U_{\text{тм}}$, $T_{\text{тм}}$, $PIRV$, $LIRV$ измеряли другие технические характеристики: сопротивление изоляции R_i , пересчитанное на кабель длиной 1 км, индекс поляризации PI и коэффициент абсорбции K_a , содержание влаги W . Содержание влаги определяли по величине минимума зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от частоты [6]. Представленные экспериментальные данные в табл. 1 подобраны специально, так как они отражают различные характерные состояния кабелей с ПБИ.

Кабель №1 имеет наилучшее техническое состояние после 30-летней эксплуатации. У него есть незначительное увлажнение изоляции, поэтому $W = 1,2\%$ (для «сухого» кабеля $W \leq 0,5\%$, для сильно увлажненного $W \geq 4,0\%$) и $PI = 3,5$ (для нового кабеля $PI \geq 4,0$).

Состояние кабеля №2 – среднее, содержание влаги в нем по сравнению с кабелем №1 практически не изменилось, электропроводность изоляции увеличилась за счет науглероживания бумаги в местах усыхания изоляции, поэтому наблюдается уменьшение R_i и PI , рост $LIRV$.

Состояние кабеля №3 имеет признаки предельного состояния за счет более глубокой степени усыхания и науглероживания бумаги. Изменение величин R_i , PI , $LIRV$ еще более значительно, наблюдается сдвиг кривой ВН влево, несмотря на то что длина кабеля № 3 больше, чем длина кабеля № 2.

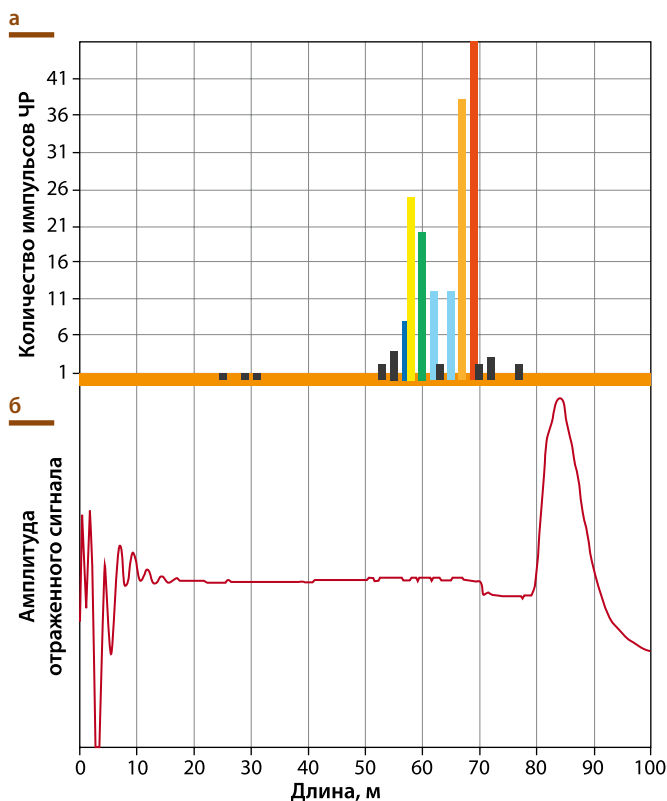
Состояние кабеля № 4 – предельное, несмотря на большое R_i . Причина – сильное усыхание ПБИ. В данном случае оно не привело к увеличению объемной проводимости изоляции из-за отсутствия изгибов и деформации кабеля по трассам, т.е. отсутствуют сквозные каналы проводимости изоляции, которые могли быть связаны с науглероживанием бумаги. Поляризационные свойства этого кабеля фактически потеряны, наблюдаются низкие значения $PIRV$, $LIRV$ и PI . Из-за отсутствия пропитки между слоями бумажной изоляции объемный заряд, образующийся при подаче напряжения зарядки, недостаточен для формирования большого отклика в виде ВН, а сама кривая $U_r(t)$ при этом сдвинута вправо из-за отсутствия короткоживущих поляризационных состояний (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ

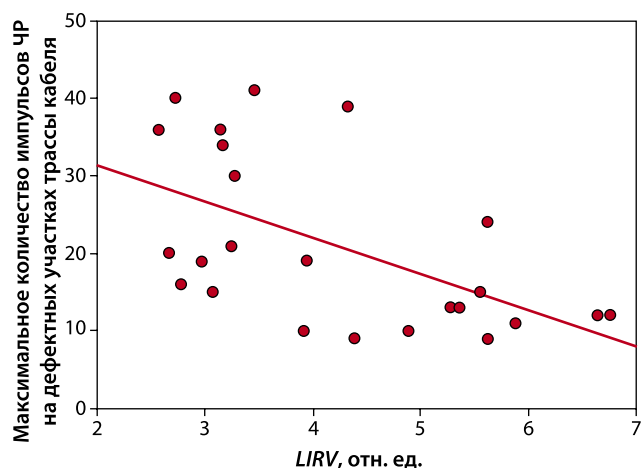
Полученный опыт комплексной диагностики кабелей с ПБИ на напряжение 6–10 кВ дал нам основу для определения критериев состояния этих кабелей исходя из величин $PIRV$ и $LIRV$, которые представлены в табл. 2.

Метод ВН по своей природе обладает высокой чувствительностью к регистрации как развивающихся дефектов, так и дефектов, наличие которых указывает на предельное состояние кабеля. ВН является откликом на процессы деполяризации зарядовых состояний объемных дефектов диэлектрика. При этом сами эти состояния не всегда могут вносить свой вклад в сквозной ток проводимости, особенно это проявляется в многослойных изоляционных материалах. Тем не менее для состаренных кабелей с ПБИ напряжением 6–10 кВ наблюдается хорошая корреляция между $PIRV$, $LIRV$ и R_i (рис. 4). При определении критериев оценок состояния кабелей по параметрам $PIRV$ и $LIRV$ специально подбирали кабели с разным уровнем увлажнения изоляции [5].

• Рис. 5. Распределение ЧР по длине кабеля (а) и временная рефлектограмма (б)



• Рис. 6. Максимальное количество импульсов ЧР на дефектных участках кабелей с разной степенью электропроводности изоляции



► Для определения параметров $PIRV$, $LIRV$ достаточно провести одно измерение ВН, что сокращает время технического диагностирования кабелей ПБИ, так как традиционно применяемые методики для оценки степени увлажнения ПБИ основаны на измерении ВН при двух напряжениях зарядки [2–3].

Измерение ВН позволяет оценить состояние кабеля в целом. Для локализации на кабельных трассах таких дефектов, как усыхание изоляции, применяли метод OWTS (рис. 5). Обычно такие дефекты образуются на вертикальных кабельных трассах, в локальных местах с нарушением теплообмена между кабелями и окружающей средой. На рис. 5 показан типичный пример усыхания ПБИ. ЧР регистрируются на участке 55–70 м. На данном участке усыхание ПБИ связано с прокладкой кабелей в металлическом коробе и его заливкой огнезащитным составом. Выход кабеля из короба в конкретном месте регистрируется на временной рефлектограмме.

Метод OWTS имеет свои ограничения. Во-первых, он не регистрирует дефекты, при которых образование ЧР невозможно, например в местах увлажненной изоляции. Во-вторых, количественная оценка усыхания БПИ на основе может дать ошибочные результаты, так как из-за науглероживания бумаги происходит увеличение электропроводности, что приводит к «тушению ЧР». Последнее подтверждается экспериментальными данными, полученными при проведении диагностики 24 кабелей питания электронасосов. Все эти кабели находились в эксплуатации более 30 лет и имели одинаковую трассировку, в том числе участки вертикальной трассировки с выходом на горизонтальные участки.

На переходе «вертикальный участок – горизонтальный участок» для кабелей обычно фиксируется наибольшее количество импульсов ЧР. Для этих кабелей наблюдается тенденция: с увеличением электропроводности БПИ по параметру $LIRV$ уменьшается количество импульсов ЧР на дефектных участках, зарегистрированных методом OWTS (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены и апробированы новые диагностические параметры восстановленного напряжения $PIRV$ и $LIRV$ для контроля состояния ПБИ силовых кабелей. Их применение дает возможность контролировать старение электрической изоляции как по изменению объемного зарядового состояния, так и по изменению электропроводности. Разработаны критерии для классификации технического состояния силовых кабелей с ПБИ низкого и среднего напряжений по $PIRV$ и $LIRV$.

Применение $PIRV$ и $LIRV$ существенно повышает достоверность и эффективность диагностики состояния электрической изоляции. Это достигается:

- возможностью одновременного контроля двух относительно независимых процессов старения изоляции: изменения объемного зарядового состояния и электропроводности;
- физически обоснованной интерпретацией экспериментальных данных;
- проведением диагностики состояния на основе результатов всего одного измерения. Для кабелей с ПБИ такой подход сокращает в два раза время тестирования кабелей по сравнению с традиционной методикой;
- возможностью контроля электрической изоляции по всей траектории старения от начального состояния до предельного благодаря высокой чувствительности $PIRV$ и $LIRV$ к объемным дефектам;
- потенциальной возможностью применения метода ВН на основе $PIRV$ и $LIRV$ для различных промышленных диэлектриков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тютнев А.П., Ихсанов Р.Ш., Кононенко А.И. и др. Физико-математическая модель явления восстановленного напряжения и перспективы ее применения для прогнозирования технического состояния полимеров // Высокомолекулярные соединения. Серия А, т. 48, № 11, 2007–2014.
2. Kamenka D., Beigert M. Diagnosis at Oil-paper insulation with the method of the Return Voltage Measurement // 17th International Cable Symposium. Zlatibor, Yugoslavia, 2002. Vol. 1, 1–14.
3. Patsch R., Kamenka D., Menzel J. Return voltage measurements Diagnostic interpretations based on the dielectric time constants // Materials Science-Poland. 2009. Vol. 27. No. 4/2. P. 1158–1170.
4. Кононенко А.И., Хохряков А.В., Слабоус Р.В., Ратников Д.А. Новые показатели восстановленного напряжения для контроля состояния электрической изоляции // Электро. 2012. № 5.
5. Kononenko A.I., Chlenov A.M., Tsikanin A.G. Nondestructive control of condition and prediction of cable life time at nuclear power plants // 19th International Conference on Nuclear Engineering ICONE 19. Osaka, Japan. October 24–25, 2011.
6. Neimanis R., Saha T.K., Eriksson R. Determination of Moisture Content in Mass Impregnated Cable Insulation Using Low Frequency Dielectric Spectroscopy // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, USA. July 16–20, 2000. ■