

НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ БУМАЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Кононенко А.И., Хохряков А.В.

Федеральное государственное унитарное предприятие “Научно-исследовательский институт приборов”

ВВЕДЕНИЕ

Измерение восстановленного (возвратного) напряжения (ВН) в изоляции кабелей и электротехническом оборудовании все чаще используют как метод контроля их технического состояния, в том числе, кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) и маслонаполненных трансформаторов. Это обусловлено возможностью проводить контроль непосредственно в эксплуатации не нарушая при этом существующие электрические соединения и не разрушая изоляцию. Два основных процесса определяют величину ВН: объемно-зарядовая (миграционная) поляризации и объемная электропроводность [1]. Это дает основание считать, что контроль старения и увлажнения бумажной электрической изоляции можно осуществлять по величине и форме ВН.

Вместе с тем, широкое внедрение в практику этого метода сдерживается из-за отсутствия полного понимания каким образом из кривой ВН получить количественные показатели для описания старения и увлажнения изоляции, так как до сих пор не удавалось выделить вклад электропроводности и поляризации в эту кривую. Задача усложняется еще тем, что величина и форма ВН зависит как от температуры и геометрии контролируемой изоляции, пропиточного состава бумажной изоляции, 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 представлен новый подход к оценке состояния бумажной электрической изоляции, который позволяет разделять вклад объемной поляризации и электропроводности, полученный на основании анализа результатов измерения ВН в образцах кабелей с ПБИ при различных температурах, U_0 , t_c и t_d и в кабелях, находящихся непосредственно в эксплуатации в помещениях атомных станций. Для последних измерения ВН явились одним из методов неразрушающего контроля в рамках диагностики их состояния при проведении работ по продлению срока эксплуатации энергоблоков атомных станций.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ КРИВОЙ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Общепринятыми параметрами описания кривой ВН являются ее максимум U_{m} , время достижения максимума t_m , начальная крутизна переднего фронта. Для оценки состояния ПБИ разработчики установки CD-31 предлагают проводить измерения два раза подряд, при двух зарядовых напряжениях U_{ch} , равных 1 и 2 кВ, времени разрядки t_d равном 2 с, временах зарядки t_{ch} и измерения t_m , равных по 30 минут. В качестве показателя степени старения предлагается брать отношение кривой ВН при напряжениях 2 и 1 кВ. Такой прием, как полагают разработчики, дает возможность избежать зависимости показателей старения от длины кабеля и окружающей температуры. В качестве количественного показателя увлажнения ПБИ используется значение этого отношения k_8 при $t_m = 8$ с. Постулировано, что изменение k_8 в диапазоне от 1,6 до 2,0 соответствует диапазону увлажнения изоляции от предельного увлажнения до сухой изоляции.

Полученный нами на сегодняшний день опыт показал, что этот критерий не всегда выполняется. Например, для кабелей с бумажной изоляцией, с обедненным пропиточным составом и состаренной вплоть до полного охрупчивания, значение k_8 оказывалось равным около 2,0. Состаренные до такого уровня кабели были обнаружены нами в помещениях с повышенной окружающей температурой, практически все они имели участки трасс с перепадом высот. Другими словами, отсутствие увлажнения изоляции по показателю k_8 не означает, что ее техническое состояние хорошее.

Наличие другого типичного дефекта для кабелей с ПБИ – сильного локального увлажнения из-за повреждения кабеля или из-за некачественного изготовления концевых заделок и соединительных муфт ведет к сильному изменению формы и интенсивности ВН. Наблюдается резкое падение интенсивности ВН, сдвиг максимума кривой в область малых времен, вместе с тем, в этом случае значение k_8 не всегда соответствует сильному увлажнению. Другими словами, наличие дефектов изоляции, приводящих к дополнительному сквозному току утечки в локальном месте по трассе кабеля, приводит к "тушению" кривой ВН, которая в отсутствии такого повреждения, определяется только объемно-зарядовой поляризацией и объемной электропроводностью. Таким образом, на практике показатель k_8 не всегда правильно отражает реальное состояние бумажной изоляции.

Другой подход для описания кривой восстановленного напряжения $U_r(t)$ был представлен работе [1]. Он основан на традиционном приближении, при котором реальный релаксационный спектр полимера заменяется дискретным набором релаксаторов Дебая. 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 $(0,2-50)t_d$, в то время как максимум ВН формируется за счет релаксационных процессов с временами порядка $100t_d$ 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 с 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 0,1 – 2000 с значение n достаточно взять равным 4 или 5. Типичная кривая $U_r(t)$ и ее компоненты, определенные по модели (1), представлены на рис. 1. Здесь, как традиционно принято, полярность ВН – отрицательная, поэтому короткоживущие компоненты имеют положительную полярность.

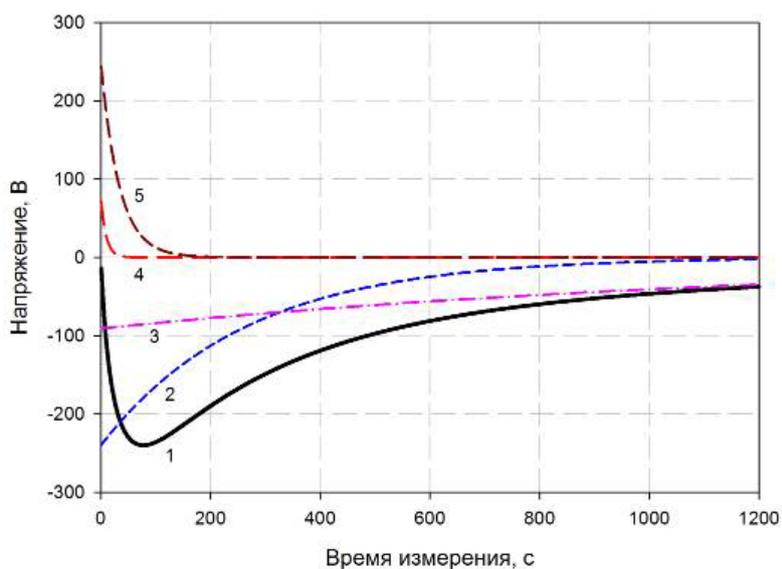


Рис. 1 – Типичная кривая восстановленного напряжения (1) и ее компоненты (2 – 5)

Таким образом, в качестве показателей состояния бумажной изоляции кабелей, трансформаторов могут выступать параметры A_i и τ_i . К сожалению, такой подход возможен при контроле состояния одного и того же кабеля (изделия) при проведении периодических измерений ВН на нем. На практике, в период планового профилактического ремонта на промышленном предприятии, приходится в off-line режиме проводить серию измерений, например, кабелей различной длины. Измеряемые при этом значения A_i и τ_i нельзя использовать напрямую для количественной оценки состояния других кабелей даже такого же типа, так как ВН, как было сказано выше, зависит от многих факторов, в том числе, от окружающей температуры, длины и сечения кабеля, типа пропиточного состава бумажной изоляции. Для разработки универсальных показателей состояния бумажной изоляции на основе параметров A_i и τ_i в данной статье рассмотрены их зависимости от геометрии изоляции кабеля, параметров формирования ВН и от температуры изоляции кабеля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Для измерения ВН использовали установку CD-31 производства фирмы "SebaKMT". Время частичной предварительной разрядки t_d было фиксировано и равно 2 с во всех измерениях ВН. Дополнительно в ряде случаев измеряли тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ в частотном диапазоне 0,001 – 1000 Гц, используя установку IDA-200 производства фирмы "Programma Electric", и сопротивление изоляции R . Определение $tg\delta$ в данном случае проводили как для оценки содержания влаги в бумажной изоляции кабелей по величине минимального значения $tg\delta_{min}$ в измеряемом диапазоне частот, так и для контроля старения бумажной изоляции по величине диэлектрических потерь в диапазоне частот 0,001 – 0,002 Гц [2]. По величине R рассчитывали коэффициент абсорбции $R_{60сек}/R_{10сек}$ и индекс поляризации $R_{10мин}/R_{1мин}$.

Для определения A_i и τ_i из кривой ВН применяли пакет регрессионного анализа FITTER [3].

Сразу следует отметить закономерность, которая была выявлена при измерении кабелей различной длины. Увеличение длины измеряемого кабеля с 20 м до 200 м и более ведет к увеличению числа короткоживущих положительных компонент от одной до трех с характерными временами $\tau_1 \approx (1,5 - 15,0 \text{ с})$, $\tau_2 \approx (12,0 - 60,0 \text{ с})$, $\tau_3 \approx (80,0 - 120,0 \text{ с})$ и к сдвигу положения максимума восстановленного напряжения в область больших времен.

Представленные ниже зависимости $U_r(t)$ от температуры, U_{ch} , t_c и t_d определяли на образцах кабелей длиной 20 м.

Влияние зарядового напряжения и времени зарядки на величину восстановленного напряжения. Для установления зависимости τ_i и A_i от времени и величины зарядового напряжения, были проведены измерения ВН на образцах кабелей ААБЛУ 3х70 длиной 12 м при U_{ch} от 0,5 до 6,9 кВ и $t_{ch}=30$ минут, а также при t_{ch} от 1 до 30 минут и U_{ch} при 1 и 2 кВ. Интегральное содержание влаги в бумажной изоляции составляло около 2%. Измерения проводили при комнатной температуре.

Для количественного описания изменения $U_r(t)$ использовали не только параметры A_i и τ_i , но и величины средних времен положительных ($\bar{\tau}_+$) и отрицательных ($\bar{\tau}_-$) компонент, определяемые как отношение суммы произведения их времен на интенсивность на сумму их интенсивностей.

На рис. 2 представлены типичные зависимости параметров ВН от напряжения зарядки. Качественно понятно, что величина ВН должна расти с увеличением U_{ch} . Это подтверждается увеличением интенсивности короткоживущей положительной компоненты с ростом U_{ch} от 0,5 до 6,9 кВ (см. рис. 2). При этом следует отметить заметное изменение формы $U_r(t)$. Время жизни единственной короткоживущей положительной компоненты уменьшается на 25% до своей стабилизации при 5 кВ, среднее время отрицательных компонент существенно уменьшается при увеличении U_{ch} с 0,5 до 2,0 кВ. Эти изменения формы $U_r(t)$ обусловлены, по-видимому, увеличением объемной электропроводности ПБИ с ростом U_{ch} . Увлажнение ПБИ также ведет к увеличению объемной электропроводности, что и объясняет возможность использовать параметр k_8 в качестве показателя увлажнения ПБИ в довольно широком диапазоне ее увлажнения.

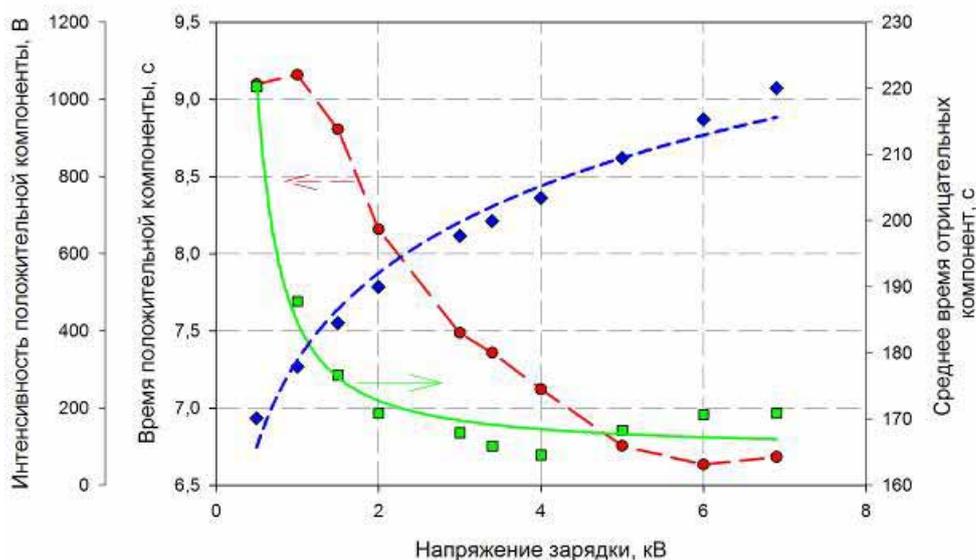


Рис. 2 – Изменение параметров кривой восстановленного напряжения от напряжения зарядки: ● – время короткоживущей положительной компоненты, ◆ – интенсивность короткоживущей компоненты, ■ – среднее время долгоживущих компонент

Увеличение времени зарядки, как и ожидалось, сопровождается ростом величины ВН. Следует отметить, что этот рост практически не влияет на время короткоживущей положительной компоненты (см. рис. 3), а обусловлен увеличением вклада долгоживущих компонент. Другими словами, увеличение времени зарядки приводит к включению в величину ВН объемных зарядов, удаленных на большем расстоянии друг от друга.

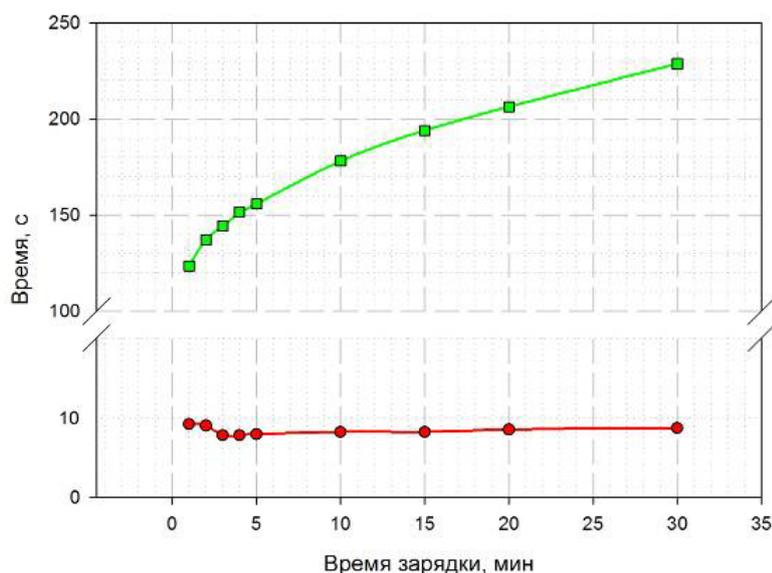


Рис. 3 – Влияние времени зарядки на время короткоживущей положительной компоненты (●) и среднее время отрицательных компонент (■)

Высокая чувствительность метода ВН к распределению заряда по объему диэлектрика позволяет контролировать и описывать протекание явления электроосмоса в ПБИ. Экспериментально было обнаружено, что уменьшение степени увлажнения изоляции под воздействием длительного приложенного напряжения ведет к увеличению ВН, при этом параметры самой долгоживущей компоненты изменяются своеобразно: ее интенсивность – уменьшается, время жизни увеличивается. Это свидетельствует о том, что уменьшение увлажнения изоляции происходит за счет увеличения объема "неувлажненных" областей (областей с хорошими поляризационными свойствами) изоляции при одновременном уменьшении их количества.

Влияние температуры на величину восстановленного напряжения в кабелях с пропитанной бумажной изоляцией. Влияние температуры на величину ВН исследовали на образце кабеля ААБЛУ 3х70 в температурном диапазоне от -17 до 80°С. При температурах ниже 0°С выделяли две короткоживущих компоненты с временами $\tau_1 = 1,8 - 3,1$ с и $\tau_2 = 16 - 23$ с, в диапазоне температур 0 – 80 °С фиксировали одну короткоживущую компоненту. Уменьшение среднего времени жизни короткоживущих положительных компонент при повышении температуры от -6 до 80°С связано с увеличением объемной электропроводности ПБИ (см. кривую 1 на рис. 4), изменение суммарной интенсивности этих компонент (кривые 2 и 3 на рис.4) пропорционально количеству зарядовых состояний "включенных" в поляризационный процесс. Резкое уменьшение среднего времени положительных компонент при температуре ниже 6 °С связано, по-видимому, с изменением физико-химических свойств пропиточного состава при этих температурах.

Таким образом, температура изоляции накладывает ограничения для контроля за ее состоянием по параметрам A_i и τ_i . Из данных, представленных на рис.4, следует, что наименее подвержены этому влиянию параметры ВН в диапазоне 20 – 40 °С. При этом величины интенсивностей положительных компонент не меняются в пределах погрешности, как впрочем, и максимальная величина восстановленного напряжения U_{rm} . Вместе с тем, время положительной компоненты уменьшается в этом диапазоне температур на 20%. Оценка уменьшения величины $\bar{\tau}_+$ в диапазоне температур от 20 до 80°С по закону Аррениуса дает значение энергии активации $E_a = 0,11$ эВ. Полученная оценка позволяет проводить пересчет величины $\bar{\tau}_+$ на одну температуру. Конечно, такой пересчет не всегда приемлем из-за возможной зависимости E_a от типа пропиточного состава и возможного наличия разной температуры изоляции по трассе кабеля.

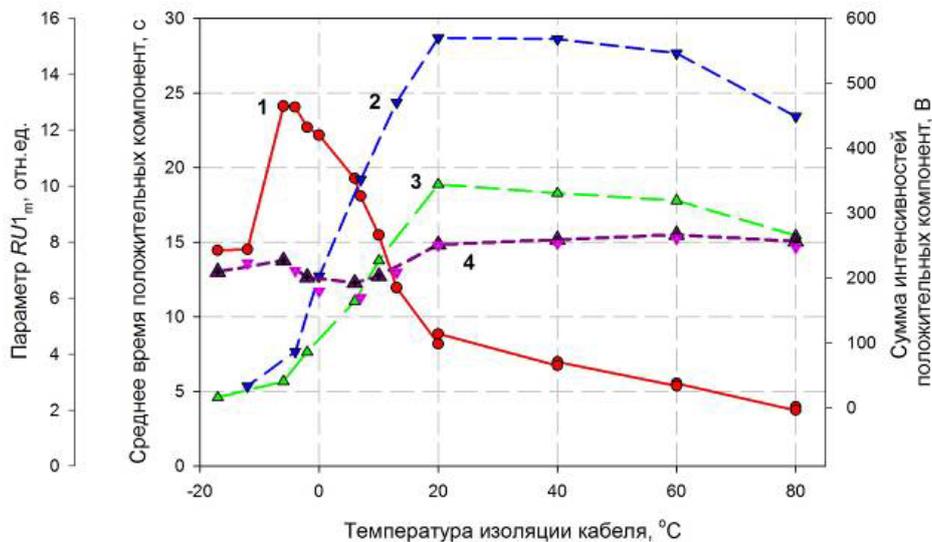


Рис. 4 – Зависимость параметров восстановленного напряжения в кабеле с пропитанной бумажной изоляцией от температуры: 1 – среднее время короткоживущих компонент; 2 и 3 – сумма интенсивностей короткоживущих компонент при зарядовом напряжении 2 и 1 кВ, соответственно; 4 – показатель $RU1_m$.

ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕРЕНИИ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Как было сказано выше метод ВН медленно внедряется в повседневную практику для проведения контроля состояния ПБИ и других изоляционных материалов. Основной причиной этого является отсутствие моделей, позволяющих при описании формы кривой $U_r(t)$ разделить вклады процессов поляризации и электропроводности и как следствие – отсутствие количественных показателей состояния изоляции. Например, при проведении диагностических работ на кабельных трассах следует количественно оценить влияние на $U_r(t)$ длины кабелей, окружающей температуры. К сожалению, модель (1) в этом смысле не является исключением. Вместе с тем, более детальное рассмотрение полученных данных и их интерпретация по модели (1), позволяет из параметров A_i и τ_i и общих характеристик кривой $U_r(t)$ получить относительные показатели для оценки степени поляризации и степени увлажнения ПБИ.

Из полученных выше результатов следует, что параметры A_i и τ_i короткоживущих компонент определяют начальный участок кривой $U_r(t)$, в том числе положение и величину U_{rm} . При этом отмечается общая тенденция, чем больше значение $\bar{\tau}_+$, тем меньше состарена ПБИ. Увлажнение изоляции сопровождается увеличением электропроводности, а осушение ПБИ уменьшением ее диэлектрической проницаемости [4] и в том и другом случаях это приводит к уменьшению $\bar{\tau}_+$ и U_{rm} , t_{rm} . Следует отметить, что сумма интенсивностей короткоживущих компонент A_+ прямо пропорциональна остаточной поляризации P_0 контролируемой изоляционной системы в момент $t=0$, т.е. в момент начала измерений. Действительно, до момента измерений проводник и металлический экран замкнуты на время t_d , скорость деполяризации пространственных зарядов изоляции в это время определяется величиной проводимости металлических проводников, т.е. она практически постоянна для всех измеряемых кабелей. Поэтому для сравнения состояния кабелей с различной геометрией по степени поляризации изоляции следует проводить по нормированным кривым $U_r(t)$, используя для нормировки величину A_+ . Такая нормировка $RU1(t) = U_r(t)/A_+$ дает возможность количественно оценить состояние ПБИ для кабелей независимо от их длины,

U_{ch} . В качестве, показателя состояния можно использовать величину максимума нормированной таким образом кривой:

$$RU1_m = \left| \frac{U_{rm}}{A_+} \right|. \quad (2)$$

Модуль отношений в формуле (2) введен для удобства. На рис. 4 представлена зависимость показателя $RU1_m$ от температуры для кабеля ААБЛУ 3х70. В широком диапазоне температур от 20 до 80°C, данный показатель не зависит от температуры.

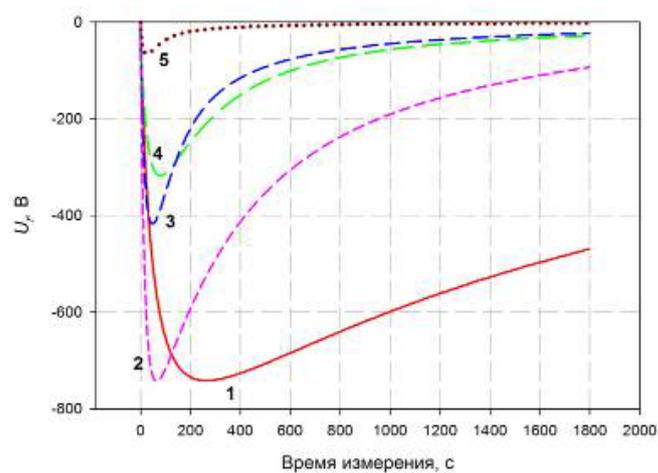
Пример оценки состояния кабелей по степени старения ПБИ с использованием показателя $RU1_m$ приведен на рис. 5. На рис. 5а представлены кривые $U_r(t)$, а на рис.5б кривые – $RU1(t)$ для пяти представительных кабелей типа ААШВ 3х150. У 1-го кабеля длиной 540 м изоляция не состарена, интегральное увлажнение изоляции составляет 0,7%, индекс поляризации равен 4,4. Старение изоляции 2-го и 4-го кабелей длиной 36 и 33 м можно охарактеризовать как среднее, индекс поляризации для них равен 3,3 и 2,0, увлажнение составило 1,4% и 0,4%, соответственно. Т.е. старение 2-го кабеля в большей степени обусловлено увлажнением изоляции, а 4-го деструкцией бумаги. Изоляция 5-го кабеля длиной 80 м сильно увлажнена в локальном месте, ее интегральное увлажнение равно 2%, индекс поляризации – 1,1. Бумажная изоляция 3-го кабеля длиной 80 м полностью осушена и оказалась хрупкой по всей его трассе. Последнее было подтверждено после его разделки (кабель был выведен из эксплуатации). Следует отметить, что для 5-го кабеля с практически предельным состоянием по величине индекса поляризации и для 3-го с полностью охрупченной изоляцией значение $RU1_m$ практически совпадают.

Вместе с тем, очевидно, что вклад в старение ПБИ деструкции бумажной изоляции и увлажнения следует оценивать по разным показателям старения. Для оценки степени увлажнения ПБИ введем показатель, определяемый как модуль отношения величины максимума ВН к общей площади короткоживущих компонент S_+ :

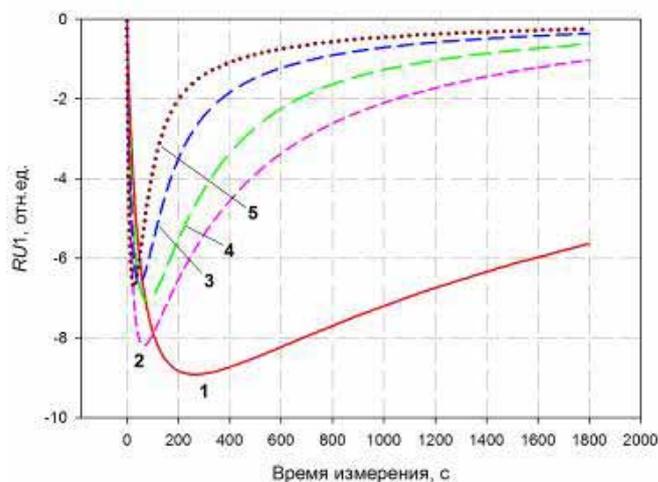
$$RU2_m = \left| \frac{U_{rm}}{S_+} \right|. \quad (3)$$

Другими словами, параметр $RU2_m$ представляет собой нормировку U_{rm} на заряд, обусловленный релаксацией короткоживущих компонент. Из представленных кривых $RU2(t) = U_r(t)/S_+$ на рис. 5в следует, что увеличение параметра $RU2_m$ пропорционально степени увлажнения ПБИ. Понятно, что величина показателя $RU2_m$, как, впрочем, и сопротивление изоляции, зависит от окружающей температуры, это необходимо учитывать при проведении измерений.

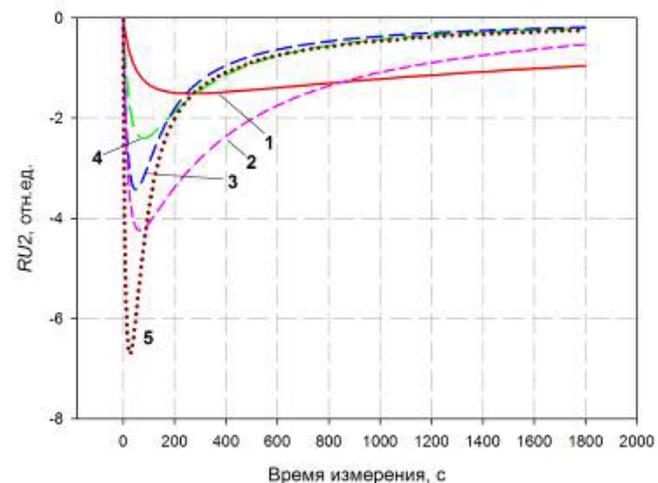
Следует подчеркнуть, что параметры $RU1_m$ и $RU2_m$, определяемые из кривых восстановленного напряжения, точно также как и коэффициент абсорбции и индекс поляризации, определяемые при измерении сопротивления изоляции, являются универсальными показателями состояния электрической ПБИ. Это дает возможность осуществлять контроль и сравнение степени старения кабелей с ПБИ разной длины и сечения. Сравнительный количественный анализ по этим показателям следует проводить для кабелей одного типа, имеющий один и тот же пропиточный состав, так как форма $U_r(t)$ зависит от типа бумажной изоляции, например, для наиболее широко выпускаемых ранее кабелей типа ААШВ и наиболее часто применяемых сегодня типа ААБЛНГ аппроксимируется четырьмя и пятью компонентами соответственно.



a)



б)



в)

Рис. 5 – Кривые восстановленного напряжения представительных кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (а) и их нормированные значения для оценки объемной поляризации (б) и электропроводности (в): 1 – кабель с несостаренной изоляцией, 2 – кабель со средней степенью старения изоляции с преобладанием увлажнения бумаги, 3 – кабель с охрупченной бумажной изоляцией, 4 - кабель со средней степенью старения изоляции с преобладанием деструкции бумаги, 5 – кабель с сильно увлажненной изоляцией

Несмотря на высокую чувствительность $RU1_m$ и $RU2_m$ по своей природе показатели интегральные, они характеризуют общее состояние изоляционной системы. При техническом диагностировании кабелей метод ВН следует использовать одновременно с измерением R и определением неоднородности кабельной линии методом рефлектометрии. Начальный процесс старения изоляции сопровождается изменением объемных зарядовых состояний изоляции из-за перестройки начальной дефектной структуры или образования новых дефектов. Только показатели $RU1_m$ и $RU2_m$ дают возможность регистрировать эти явления. На более глубоких стадиях старения дефектная структура ведет к появлению в изоляции дополнительных токов сквозной проводимости, что уже можно фиксировать по величине коэффициента абсорбции и индекса поляризации. Увеличение сквозного тока может быть обусловлено сильным увлажнением кабеля из-за его повреждения в локальных местах трассировки, которые фиксируются методом рефлектометрии. Следовательно, простое сопоставление полученных данных позволяет определить, чем обусловлены изменения показателей состояния: локальным увлажнением изоляции, например в соединительной или концевой муфте, или увлажнением и старением изоляции практически по всей длине кабеля. В первом случае следует планировать ремонт кабеля, во втором – сроки его замены исходя из фактического состояния.

Накопленный на сегодняшний день опыт применения ВН для диагностики состояния кабелей с ПБИ в рамках работ по продлению срока службы энергоблоков АЭС позволил установить предельные и начальные величины показателей состояния $RU1_m$ и $RU2_m$. Для количественной оценки состояния кабелей разработана классификация, в которой степень старения ПБИ оценивается как "норма", "работоспособное с несущественными отклонениями", "работоспособное с существенными отклонениями", "ухудшенное" и "предельное" в зависимости от величин этих показателей.

Следует отметить, что оценка состояния бумажной изоляции с использованием показателей $RU1_m$ и $RU2_m$ не требует проведения двух циклов измерения ВН, т.е. в два раза сокращается время контроля бумажной изоляции при проведении диагностических работ в эксплуатации.

При использовании ВН для контроля содержания влаги в бумажной изоляции маслонаполненных трансформаторов следует учитывать, что изменения $RU2_m$ обусловлены наличием связанной воды, присутствие свободной воды никак не отразится на величине этого параметра, впрочем, также как и на сопротивлении изоляции. При наличии свободной воды с увеличением температуры ПБИ увеличивается содержание растворенной и связанной воды, в этом случае будет наблюдаться рост $RU2_m$. Не учет этого фактора приводит к ошибкам при контроле состояния, наличие которых отмечено в работе [5]. Для трансформаторов тока фиксировали отказы во время резкого изменения окружающей температуры, что как раз и обусловлено изменением соотношения свободной и растворенной воды в бумажной изоляции [6]. В этих случаях, для установления полной картины увлажнения и деградации бумажной изоляции следует одновременно применять как ВН, так и частотную диэлектрическую спектроскопию (измерение тангенса угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот). Последняя дает возможность фиксировать наличие свободной воды в бумажной изоляции.

ВЫВОДЫ

1. Определены характерные зависимости величины и формы ВН в кабелях с ПБИ от ее температуры, геометрии, степени старения и увлажнения, напряжения и времени зарядки.
2. На основании полученных экспериментальных данных и многокомпонентного анализа кривой ВН обоснован новый подход к оценке состояния электрической изоляции, который позволяет оценивать изменения объемного зарядового состояния и электропроводности изоляции по результатам одного измерения.

3. Для кабелей с ПБИ такой подход дает возможность контролировать на ранних стадиях степень старения и увлажнения изоляции до достижения ею предельного состояния.

Список литературы

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, 2006, том 48, №11, с. 2007-2014.
2. *Neimanis R., Saha T.K., R. Eriksson.* 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.
3. *Померанцев А.Л., Родионова О.Е.* "Надстройка FITTER". Свидетельство о регистрации № 2002611562, Роспатент. М.: 2002.
4. *Холодный С.Д.* Технологическая термообработка изоляции кабелей и проводов. – М.: Изд-во МЭИ, 1994.
5. *Алексеев Б.А.* Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
6. *Бузаев В.В., Сапожников Ю.М.* Связь между равновесием различных форм присутствующей в масле воды и состоянием изоляции высоковольтного масляного электрооборудования. Вестник ВНИИЭ-2004: Сборник научных статей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004, с. 193 – 197.