

НОВЫЙ ПОДХОД К КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

г. Лыткарино, ФГУП "НИИП", kononenko@niipriborov.ru

Восстановленное напряжение (ВН) – это напряжение на отсоединенном изоляторе, измеренное после его заряда заранее выбранным напряжением и последующего частичного предварительного его разряда в течение заранее выбранного времени. Измерение ВН по своей физической природе является самым чувствительным электрическим методом для контроля дефектообразования в электрической изоляции, так как два основных процесса определяют его величину: объемно-зарядовая поляризация и электропроводность.

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, типа изоляции, так и от параметров, напрямую формирующих величину и форму ВН: напряжения зарядки U_{ch} , времени зарядки t_{ch} и времени частичной предварительной разрядки t_d .

В данной работе представлен новый подход к оценке состояния электрической изоляции, который позволяет разделить вклад объемной поляризации и электропроводности в кривую ВН. Он был применен для контроля состояния кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) и изоляции обмоток статоров мощных асинхронных электродвигателей (ЭД) в рамках работ по продлению срока эксплуатации электрооборудования атомных станций наряду с другими методами контроля. Измерение ВН проводили прибором CD-31 производства "SebaKMT", для регистрации частичных разрядов ЧР использовали прибор R2100 с датчиками RFCT-5 фирмы "Вибро-центр", измерение частотных диэлектрических спектров ЧДС в диапазоне частот от 0,001 до 1000 Гц проводили прибором IDA-200 фирмы "Programma Electric", измерение сопротивления изоляции цифровой мегомметр S1-5005 фирмы "AVO International".

Новый подход контроля разработан на основании анализа результатов измерения ВН в образцах кабелей с пропитанной бумажной изоляцией

(ПБИ) при различных температурах, U_{ch} , t_{ch} и t_d и в кабелях, состаренных непосредственно в эксплуатации в помещениях атомных станций.

Методы измерения и обработки кривой восстановленного напряжения. Общепринятыми параметрами описания кривой ВН являются ее максимум U_{rm} , время достижения максимума t_{rm} , начальная крутизна переднего фронта $\frac{dU_r(t=3 \div 8сек)}{dt}$. Для оценки состояния изоляции обычно регистрируют отклик этих параметров при различных значениях U_{ch} , t_{ch} и t_d . К сожалению, измеряемые величины зависят от геометрии изоляционной системы, U_{ch} и не являются универсальными показателями старения того или иного типа изолятора. При проведении измерений изоляции силовых кабелей следует учитывать, что форма кривой $U_r(t)$ может существенно измениться за счет увеличения сквозных токов утечки в локальном месте трассы, например, из-за повреждения кабеля (кабельной муфты).

Другой подход для обработки кривой ВН представлен в [1], где для описания $U_r(t)$ используется полуэмпирическая 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.

Таким образом, в качестве показателей состояния электрической изоляции могут выступать параметры A_i и τ_i , к сожалению, эти параметры обладают всеми теми же недостатками, что и параметры, описанные выше. Понятно, что A_i и τ_i короткоживущих положительных компонент могут использоваться вместо U_{rm} , t_{rm} , $\frac{dU_r(t=3 \div 8сек)}{dt}$. Оценки, приведенные в [1], показали, что за начальный рост ВН ответственны релаксационные процессы с характерными временами $(0,2-50)t_d$, максимум ВН формируется за счет релаксационных процессов с временами порядка $100t_d$ и объемной электропроводности изоляционного материала.

Следует отметить, что сумма интенсивностей короткоживущих компонент A_+ прямо пропорциональна остаточной поляризации контролируемой электрической изоляции 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

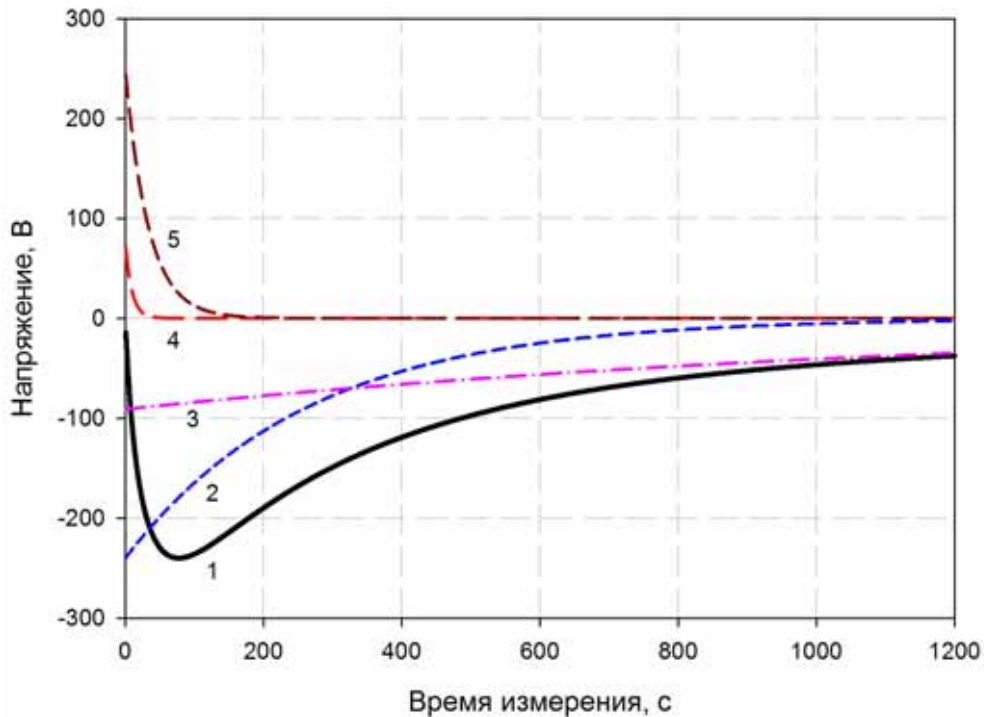


Рис.1. Типичная кривая восстановленного напряжения (1) и ее компоненты (2 – 5)

проводимости металлических проводников, т.е. она практически постоянна для всех измеряемых изоляторов. Поэтому для сравнения состояния изоляторов с различной геометрией по степени поляризации (объемного заряда) 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 изоляции, например, кабелей независимо от их длины и U_{ch} . В качестве показателя состояния изоляции по степени поляризации можно использовать величину максимума нормированной таким образом кривой:

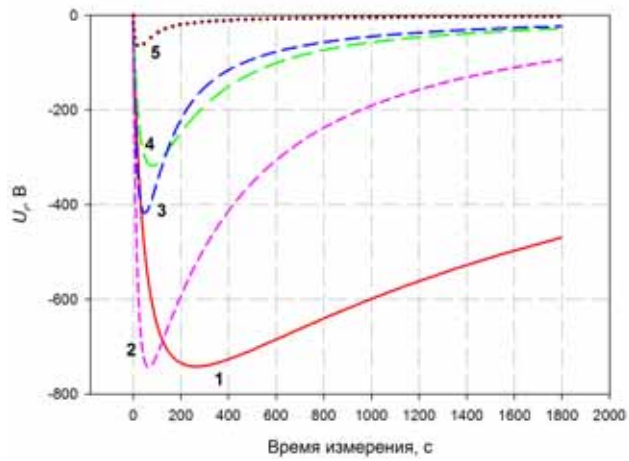
$$RU1_m = \left| \frac{U_{rm}}{A_+} \right|. \quad (2)$$

Для оценки степени увлажнения изоляции введем показатель, определяемый как модуль отношения величины максимума ВН к общей площади короткоживущих компонент S_+ :

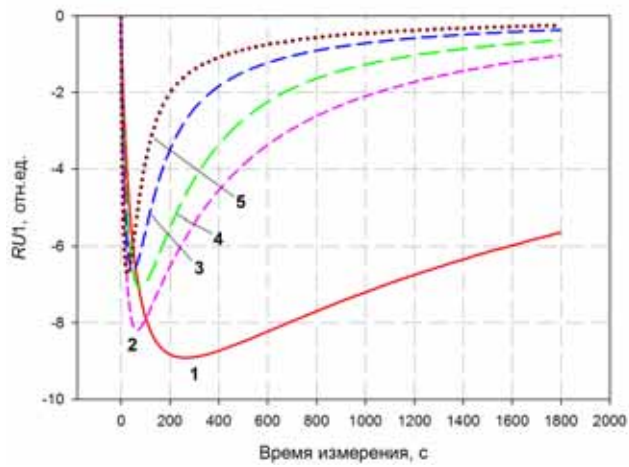
$$RU2_m = \left| \frac{U_{rm}}{S_+} \right|. \quad (3)$$

Другими словами, параметр $RU2_m$ представляет собой нормировку U_{rm} на заряд, обусловленный релаксацией короткоживущих компонент.

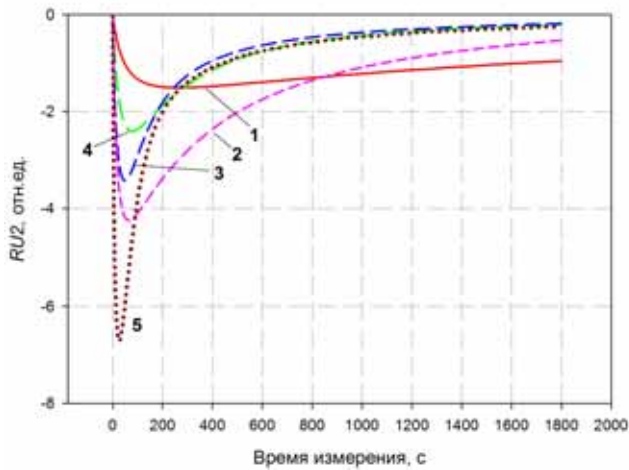
Применение метода ВН для контроля состояния электрической изоляции. На рис.2 представлены кривые ВН для пяти представительных кабелей типа ААШв 3х150 с ПБИ и их нормированные значения для оценки степени поляризации и электропроводности. У 1-го кабеля длиной 540 м изоляция не состарена, интегральное увлажнение изоляции составляет 0,7%, индекс поляризации равен 4,4 (степень увлажнения



a)



б)



в)

Рис.2. Кривые ВН для представительных кабелей с ПБИ (а) и их нормированные значения для оценки степени поляризации (б) и электропроводности (в): 1 – несостаренная изоляция, 2 – средняя степень старения изоляции с преобладанием увлажнением бумаги, 3 – охрупченная бумажная изоляция, 4 – средняя степень старения изоляции с преобладанием деструкции бумаги, 5 – сильно увлажненная изоляция

определяли методом частотной диэлектрической спектроскопии по минимальной величине тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_{\min}$ [2]). 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 (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. Обеднение состава ПБИ сопровождается уменьшением ее диэлектрической проницаемости [3], что ведет к уменьшению показателя $RU1_m$ для 3-го кабеля. При использовании в качестве показателя старения для 3-го кабеля отношения производных кривых ВН при U_{ch} 2 и 1 кВ, $t = 8$ сек (такой единственный показатель предлагает использовать производитель установки CD 31) мы получили, что изоляция не увлажнена, а значит качество ее хорошее, а это не соответствует фактическому ее состоянию. Применение для оценки состояния показателей $RU1_m$ и $RU2_m$ дает возможность контролировать относительно различные процессы старения электрической изоляции, одни из которых приводят к изменению объемного зарядового состояния, а другие к увеличению объемной электропроводности, при этом увеличение степени старения ПБИ сопровождается уменьшением величины показателя $RU1_m$ и увеличением – $RU2_m$.

Качественно понятно, что старение любой электрической изоляции приводит в конечном итоге к увеличению электропроводности, т.е. к увеличению $RU2_m$. Для большинства изоляторов старение сопровождается ростом объемных зарядовых состояний и соответственно увеличению $RU1_m$. В этом смысле ПБИ является исключением, так как из-за наличия большой площади границ раздела "бумага – пропиточный состав" объемный заряд изначально велик для несостаренной изоляции, он и определяет большую величину ВН для кабелей с ПБИ. Старение ПБИ ведет к разрушению этих граничных состояний и увеличению электропроводности и в целом к уменьшению величины ВН.

В таблице 1 представлена классификация состояния силовых кабелей с ПБИ, которая была разработана на основании опыта применения ВН. При разработке этой классификации старение ПБИ оценивали как по показателям ВН, так и по величине индекса поляризации, коэффициента абсорбции и величине тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот 0,001 – 1000 Гц.

Таблица 1 – Классификация состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией по результатам измерения восстановленного напряжения

$RU1_m$, отн.ед.	$RU2_m$, отн.ед.	Состояние
$RU1_m < 6,6$	$RU2_m > 6,5$	Предельное
$7,3 > RU1_m \geq 6,6$	$4,5 < RU2_m \leq 6,5$	Ухудшенное (качество изоляции плохое)
$8,0 > RU1_m \geq 7,3$	$2,2 < RU2_m \leq 4,5$	Работоспособное со значительными отклонениями (качество изоляции хорошее)
$8,7 \geq RU1_m \geq 8,0$	$0,85 < RU2_m \leq 2,2$	Работоспособное с незначительными отклонениями (качество изоляции хорошее)
$RU1_m > 8,7$	$RU2_m \leq 0,85$	Работоспособное (качество изоляции отличное)

Применение метода ВН для контроля состояния микалентной компаундированной изоляции обмоток статоров мощных асинхронных ЭД позволило установить, что процесс старения этой изоляции на первой стадии ведет к образованию и накоплению объемных зарядов. Причем продолжительность этой стадии может составлять более 20 – 30 лет, при отсутствии заводских дефектов или повреждения изоляции в эксплуатации.

В таблице 2 представлены характерные результаты контроля состояния изоляции обмоток статора ЭД различными методами: по изменению индекса поляризации PI , измерению ВН, измерению параметров частичных разрядов ЧР, измерению частотных диэлектрических потерь ($tg\delta$) в широком диапазоне частот от 0,001 до 1000 Гц. Ни для одного из двигателей в эксплуатации не зафиксировано состояние близкое к предельному (в соответствии со стандартом IEEE Std. 43-2000 [4] при $PI < 2$ состояние изоляции обмоток считается плохим).

Недостатки метода контроля по показателю PI связаны с отсутствием возможности регистрировать дефекты, которые не вносят вклад в сквозной ток проводимости. При $PI > 4$ данный параметр нельзя рассматривать в качестве количественного показателя старения из-за низкой точности измерений высоких значений сопротивления изоляции.

Метод частичных разрядов (ЧР) показал, что регистрируемые импульсы ЧР образуются в "свободном объеме", наличие которого связано с технологией ее изготовления. Уменьшение интенсивности ЧР со временем эксплуатации ЭД, по-видимому, обусловлено прожиганием этих микропустот ЧР. Считают [5], что на более глубоких стадиях старения, в состоянии близком к предельному, должен наблюдаться рост интенсивности ЧР за счет появления новых микропустот из-за дальнейшей

деградации изоляции. Однако такой глубины старения изоляции после 29 лет эксплуатации ЭД не было зафиксировано. Таким образом, метод ЧР является малочувствительным методом оценки старения изоляции.

Таблица 2 – Характеристика представительных обследованных электродвигателей и показатели состояния изоляции обмоток статора

Номер ЭД	Время эксплуатации, годы	Мощность, кВт	RU_{2m} , отн.ед.	RU_{1m} , отн.ед.	PI	$Tg\delta_{0,001}$	Количество импульсов ЧР за период колебания сети
1	29	1000	6,7	9,0	2,7	0,768	13
2	29	1600	4,8	8,9	2,8	0,736	12
3	29	1600	2,3	8,7	3,5	0,363	736
4	29	500	1,3	7,6	6,4	0,177	17
5	15	250	1,2	7,1	5,6	0,047	3845
6	1	250	1,1	6,9	5,9	0,047	5178
7	29	5000	1,0	7,7	3,7	0,169	683
8	16	250	1,0	6,9	4,7	0,041	3381

Метод ЧДС показал высокую чувствительность к старению изоляции обмоток статоров. Вместе с тем, сильное влияние на величину диэлектрических потерь оказывают геометрические размеры обмотки. В таблице 1 приведены значения тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_{0,001}$ на минимальной частоте измерения 0,001 Гц, на которой влияние геометрии изолятора наименьшее на диэлектрические потери. Количественный контроль состояния изоляции статора методом ЧДС можно проводить для конкретного типа ЭД, регистрируемые при этом данные не могут быть использованы для диагностики других типов ЭД. К сожалению, данный метод не дает возможность разделить относительно независимые процессы старения, связанные с накоплением объемного заряда и с увеличением объемной электропроводности.

Наиболее чувствительными показателями старения изоляции обмоток статора оказались параметры RU_{1m} и RU_{2m} , определяемые из кривой ВН. Анализ экспериментальных данных, полученных при контроле состояния 32 мощных ЭД со сроком эксплуатации около 29 лет показал, что практически для всех этих ЭД преобладает первая стадия старения, которая характеризуется накоплением объемных зарядов состояний. Только для двух ЭД отмечено заметное увеличение электропроводности изоляции обмотки статора, при этом их состояние можно охарактеризовать как работоспособное со значительными отклонениями в соответствии с

классификацией, представленной в таблице 3. Эта классификация составлена на основании имеющихся сегодня экспериментальных данных по оценке состояния изоляции обмоток статоров ЭД одновременно несколькими методами контроля включая ВН.

Таблица 3 – Классификация состояния статора ЭД по результатам измерения восстановленного напряжения изоляции обмотки

$RU1_m$, отн.ед.	$RU2_m$, отн.ед.	Состояние
$RU1_m \geq 10,3$	$RU2_m \geq 8,6$	Предельное
$9,8 \leq RU1_m < 10,3$	$7,2 \leq RU2_m < 8,6$	Ухудшенное (качество изоляции плохое)
$8,7 \leq RU1_m < 9,8$	$4,4 \leq RU2_m < 7,2$	Работоспособное со значительными отклонениями (качество изоляции хорошее)
$7,7 \leq RU1_m < 8,7$	$1,7 \leq RU2_m < 4,4$	Работоспособное с незначительными отклонениями (качество изоляции хорошее)
$7,1 \leq RU1_m < 7,7$	$0,3 \leq RU2_m < 1,7$	Работоспособное (качество изоляции отличное)

Полученные данные дают возможность проводить консервативный прогноз срока службы изоляции обмотки статора используя линейную зависимость показателей состояния $RU1_m$ и $RU2_m$ от времени эксплуатации. Расчет остаточного срока службы при этом следует проводить по формуле:

$$\tau_{ост} = \tau_d \cdot \frac{I_f - I_d}{I_d - I_0}, \text{ годы} \quad (4)$$

где I_0 и I_f – начальное и предельное значения показателя состояния, I_d – величина показателя состояния на момент контроля состояния, τ_d – срок службы изоляции обмоток статора электродвигателя на момент контроля состояния в годах. За срок службы следует принимать наименьший рассчитанный по формуле (4) по показателям $RU1_m$ и $RU2_m$. Очевидно, что траектория старения изоляции не будет соответствовать модели (4) на участках близких к предельному состоянию, где величина ВН будет падать из-за увеличения электропроводности изоляции. Вместе с тем оценки по модели (4) дают возможность проводить долговременное прогнозирование для планирования ремонтных работ статора и замены ЭД.

Таким образом, использование новых показателей для оценки состояния электрической изоляции методом ВН, дает возможность одновременно контролировать два относительно независимых процесса ее старения – накопление/изменение зарядового состояния и увеличение электропроводности по результатам одного измерения. Другими словами, метод ВН можно рассматривать как мощный инструмент для проведения

неразрушающей диагностики состояния изоляции кабелей и обмоток вращающихся машин.

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*, 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. *Холодный С.Д.* Технологическая термообработка изоляции кабелей и проводов. – М.: Изд-во МЭИ, 1994.
4. *IEEE Std. 43-2000. Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machines.*
5. *Аксенов Ю.П.* Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. Москва, Издательство "Научтехлитиздат", 2002.