

НОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Кононенко А.И., канд. техн. наук, Хохряков А.В.
Слабоус Р.В., Ратников Д.А.

Рассмотрены новые показатели восстановленного напряжения для оценки технического состояния электрической изоляции. Показано, что их применение дает возможность одновременно контролировать два относительно независимых процесса старения изоляции – изменение объемного зарядового состояния и увеличение электропроводности. Представлен опыт использования этих показателей для оценки технического состояния пропитанной бумажной изоляции силовых кабелей и изоляции обмоток статоров вращающихся машин. Экспериментальные результаты показали, что благодаря внедрению новых показателей восстановленное напряжение становится мощным методом для контроля электрической изоляции уже на ранних стадиях старения и вплоть до достижения ею предельного состояния.

Ключевые слова: электрическая изоляция; контроль; показатели состояния; восстановленное напряжение

Восстановленное напряжение (ВН) является известным методом контроля технического состояния электрической изоляции. Его величина определяется поляризационными свойствами изоляции, например, миграционной поляризацией, которая характерна для многих промышленных изоляционных материалов, или объемными зарядовыми состояниями, обусловленными дефектами в полиэтиленовой изоляции. Конечно, величина и форма ВН определяются также и электропроводностью изоляции. Увеличение электропроводности ведет к «тушению» кривой ВН, уменьшая при этом ее величину и изменяя ее форму: наблюдается уменьшению крутизны переднего фронта кривой и смещение максимума кривой к началу момента измерения по временной шкале. Используя эти закономерности, до недавнего времени метод ВН применяли главным образом только для оценки увлажнения электрической изоляции. В работах [1, 2] было показано, что метод ВН может быть успешно применен для количественной оценки не только увлажнения, но и оценки старения изоляции при использовании новых показателей, определяемых из кривой ВН.

В данной работе представлены критерии для оценки степени старения пропитанной бумажной изоляции (ПБИ) силовых кабелей и изоляции обмоток статоров

New indicators of the recovery voltage for the electrical insulation technical condition estimation were examined. It is shown, that their application enables simultaneous control over two relatively independent insulation ageing processes – the change in the volume charge condition and the conductivity increase. The experience of using these indicators was presented for the technical condition estimation of the power cables impregnated paper insulation and winding insulation of the stator rotating machines. The experimental results showed that due to the introduction of new indicators the recovery voltage becomes a powerful method for controlling the electrical insulation at the early stages of ageing and until it reaches the limit state.

К e y w o r d s: electrical insulation; control; condition indicator; recovery voltage

мощных электродвигателей по результатам измерения ВН. Экспериментальные результаты были получены в рамках работ по продлению срока эксплуатации блоков атомных станций ОАО «Концерн Росэнергоатом».

Определение показателей диагностики электрической изоляции из кривых восстановленного напряжения

Общепринятыми параметрами описания кривой ВН $U_r(t)$ являются ее максимум U_{rm} , время достижения максимума t_m и начальная крутизна переднего фронта. Авторами при обработке экспериментальных данных были использованы показатели, рассчитанные согласно кривой ВН по методике, изложенной в работе [1]. Один из этих показателей пропорционален объемной поляризации изоляции, определим его как PIRV – индекс поляризации, рассчитанный из кривой ВН; другой показатель пропорционален электропроводности, определим его как LIRV – индекс электропроводности, рассчитанный из кривой ВН.

Для расчета показателей PIRV и LIRV кривую $U_r(t)$ аппроксимировали суммой 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.

Опыт показал, что для реально измеряемых кривых ВН во временном диапазоне от 0,1 до 2000 с значение n может быть равным 3, 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.

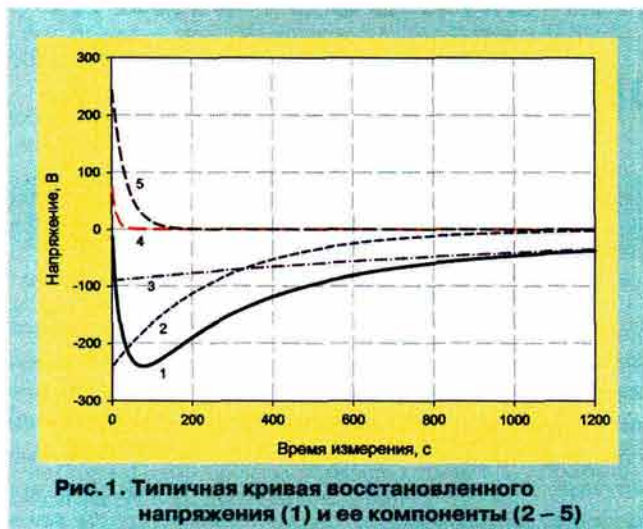


Рис. 1. Типичная кривая восстановленного напряжения (1) и ее компоненты (2 – 5)

Согласно [1], PIRV определяется как отношение максимума ВН к сумме интенсивностей короткоживущих положительных компонент A_+

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

а показатель LIRV определяется как отношение величины максимума ВН к общей площади короткоживущих компонент S_+

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

В обоих случаях множители и знак модуля введены для удобства использования показателей PIRV и LIRV. Из (2) и (3) следует, что PIRV и LIRV представляют собой максимумы нормированных кривых ВН.

Деление каждой точки кривой ВН на величину A_+ представляет нормировку на величину объемной поляризации в момент начала ее измерения $t_2(0)$ (рис. 2).

Действительно, в каждый момент времени величина ВН определяется текущим объемным зарядом и электропроводностью изоляции, за исключением начального момента измерения $t_2(0)$ (см. рис. 2). В этот момент величина ВН определяется остаточной поляризацией и проводимостью шунтирующего проводника.

Такая нормировка позволяет количественно сравнивать между собой объемную поляризацию промышленных диэлектриков различных геометрических размеров и конфигураций, например, изоляцию кабелей разной длины и сечения.

Деление каждой точки кривой ВН на величину S_+ представляет собой нормировку кривой ВН на величину заряда, который обусловлен поляризационными токами короткоживущих компонент. Такой подход

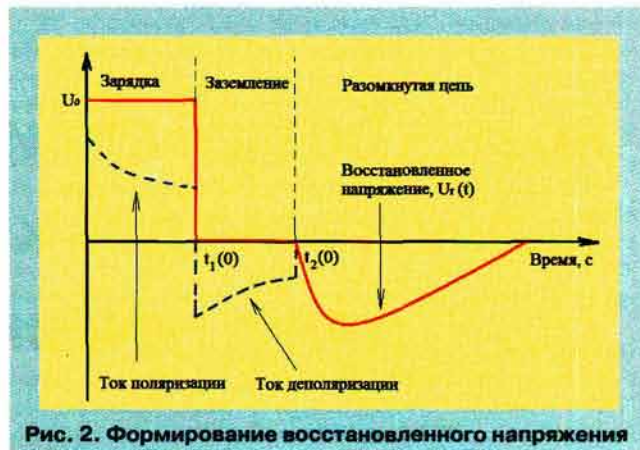


Рис. 2. Формирование восстановленного напряжения

позволяет количественно оценивать электропроводность электрической изоляции в независимости от ее геометрических размеров и конфигурации. При этом увлажнение изоляции ведет к увеличению электропроводности, «тушению» поляризационных состояний и, следовательно, к увеличению величины нормированной таким образом кривой ВН.

На рис. 3 представлены исходные и нормированные для оценки объемной поляризации и электропроводности кривые ВН для пяти представительных кабелей с ПБИ, имеющих различную степень увлажнения и усушки. Особенно показательны здесь кривые 3 и 5. Кривая 5 соответствует самой увлажненной ПБИ. Величина измеренной ВН для этой кривой на рис. 3, а наименьшая из-за «тушения» токов поляризации водой. На рис. 3, в нормированная кривая под номером 5 имеет наибольшую абсолютную величину максимума по той же причине. Кривая 3 соответствует полностью охрупченной бумажной изоляции. Характерным является то, что объемная поляризация для полностью охрупченной (кривая 3) и сильно увлажненной ПБИ (кривая 5) имеют примерно одинаковые значения, это следует из равенства максимальных значений этих нормированных кривых на рис. 3, б. Качественно это понятно, относительная диэлектрическая проницаемость для сухой бумажной изоляции меньше, чем для пропитанной [3].

Отметим немаловажный момент применения показателей PIRV и LIRV – это существенное сокращение времени для проведения измерений. Нормировочные процедуры обработки кривой ВН избавляют от необходимости проводить два или четыре измерения при различных зарядовых напряжениях, как это традиционно принято при использовании метода восстановленного напряжения для контроля состояния ПБИ и полиэтиленовой изоляции.

Оценка состояния пропитанной бумажной изоляции и изоляции обмоток вращающихся машин

Для практического применения новых показателей PIRV и LIRV были разработаны критерии для определения степени старения изоляции. Для силовых кабелей с ПБИ они основывались на корреляции с известными критериями таких показателей, как индекс поляриза-

ции PI и коэффициента абсорбции Ka, содержанием воды WC в ПБИ (табл. 1, 2). Последний показатель определяли из частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне от 0,001 до 1000 Гц [4]. На рис. 4 в качестве примера представлена корреляция между показателем LIRV и WC для ПБИ кабелей типа ААШв 3х150 напряжением 6 кВ.

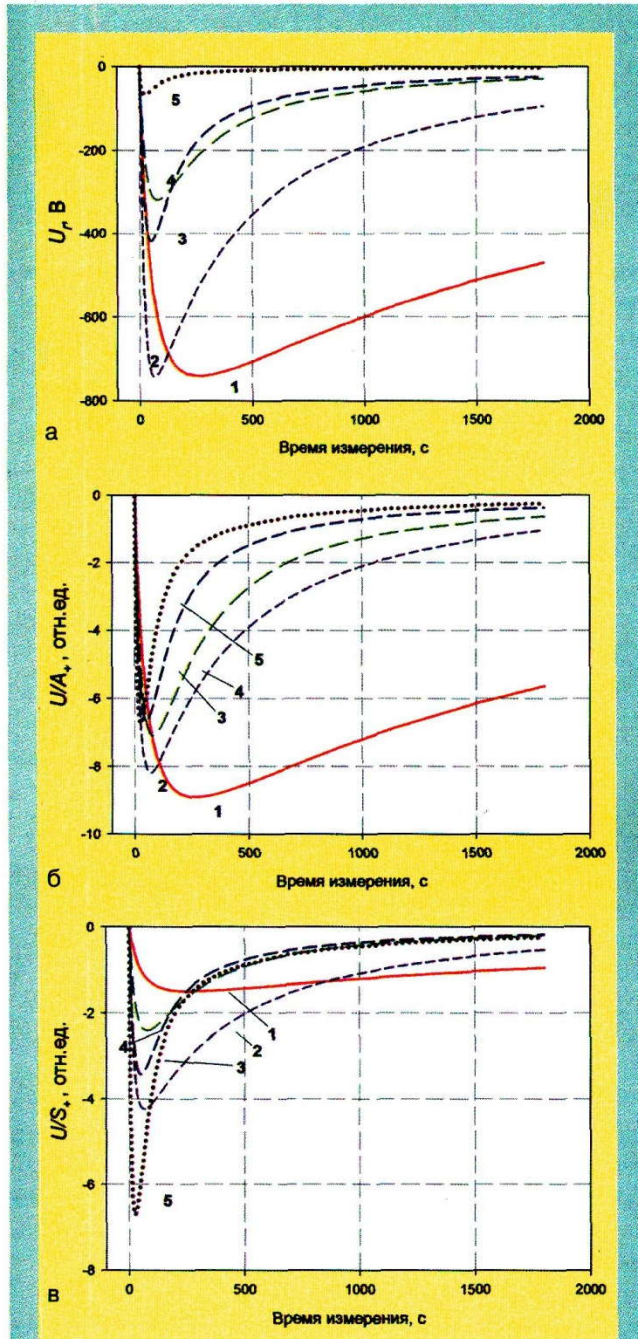


Рис.3. Кривые ВН для представительных кабелей с ПБИ (а) и их нормированные значения для оценки степени поляризации (б) и электропроводности (в)
 1 – несостаренная изоляция; 2 – средняя степень старения изоляции с преобладанием увлажнения бумаги; 3 – охрупченная бумажная изоляция; 4 – средняя степень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

Таблица 1

Классификация технического состояния силовых кабелей с ПБИ по абсорбционным характеристикам

Состояние кабеля	$K_a = R_{900кВ} / R_{150кВ}$	$PI = R_{10мин} / R_{1мин}$
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	$1,25 > K_a > 1,0$	$2,0 > PI > 1,0$
Предельное	$K_a \leq 1,0$	$PI \leq 1,0$

Таблица 2

Классификация технического состояния силовых кабелей с ПБИ 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	$2,0 < W_C \leq 3,5$
Предельное	Предельная	$W_C > 3,5$

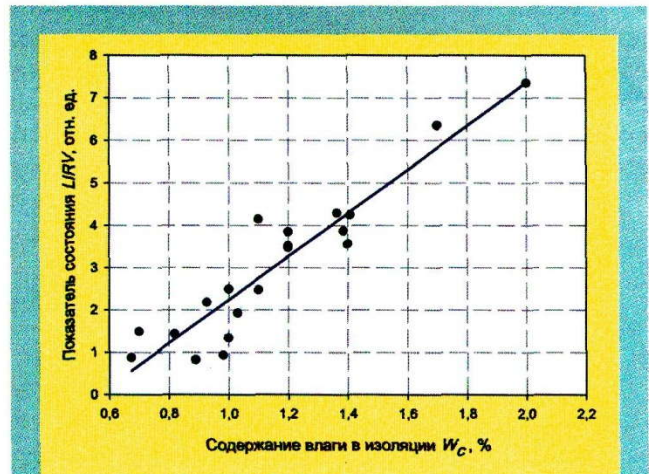


Рис. 4. Корреляция между показателем LIRV и содержанием влаги в пропитанной бумажной изоляции силовых кабелей ААШв 3х150

Критерии для PIRV и LIRV представлены в табл. 3. Эти критерии позволяют контролировать два основных типа дефектов для силовых кабелей с ПБИ, имеющих место в эксплуатации: увлажнение и усушка бумажной изоляции. Последнее стало возможным

Таблица 3

Состояние силовых кабелей с ПБИ по показателям PIRV и LIRV

Состояние кабеля	Степень старения изоляции	Величина PIRV, отн.ед.	Величина LIRV, отн.ед.
Предельное	Предельная степень усушки изоляции	$PIRV < 6,6$	$LIRV \leq 0,85$
Работоспособное, ухудшенное	Высокая степень усушки изоляции	$7,3 > PIRV \geq 6,6$	$LIRV \leq 0,85$
Работоспособное, со значительными отклонениями	Средняя степень усушки изоляции	$8,7 \geq PIRV \geq 7,3$	$LIRV \leq 0,85$
Работоспособное, норма	Отсутствует	$PIRV > 8,7$	$LIRV \leq 0,85$
Работоспособное, с незначительными отклонениями	Низкая	$8,7 \geq PIRV \geq 8,0$	$0,85 < LIRV \leq 2,2$
Работоспособное, со значительными отклонениями	Средняя	$8,0 > PIRV \geq 7,3$	$2,2 < LIRV \leq 4,5$
Работоспособное, ухудшенное	Высокая	$7,3 > PIRV \geq 6,6$	$4,5 < LIRV \leq 6,5$
Предельное	Предельная	$PIRV < 6,6$	$LIRV > 6,5$

благодаря использованию показателя PIRV, величина которого уменьшается из-за потери диэлектрических свойств при усушке ПБИ [3].

Фактически метод ВН является единственным методом, позволяющим количественно контролировать усушку бумажной изоляции на ранней стадии этого процесса. Наличие усушки изоляции в локальных местах кабельных трасс в ухудшенном и предельных состояниях регистрировалось авторами тепловизионной техникой, временной рефлектометрией и измерением частичных разрядов на осциллирующем затухающем напряжении (метод OWTS). На рис. 5 представлен типичный случай регистрации усушки бумажной изоляции после 28-летней эксплуатации силового 6 кВ кабеля в месте нарушения теплообмена на участке трассы из-за наличия толстого слоя огнезащитного состава (ОЗС).

Следует отметить, что применение новых показателей PIRV и LIRV возможно сделает метод ВН более востребованным для оценки старения многокомпонентных промышленных изоляционных материалов, объемные дефекты старения которых на протяжении долгих лет эксплуатации не вносят дополнительный вклад в сквозной ток проводимости. Подтверждением этого можно считать результаты контроля состояния

изоляции обмоток статоров мощных электродвигателей (ЭД), некоторые из них представлены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика представительных обследованных электродвигателей и показатели состояния изоляции обмоток статора

Номер ЭД	Время эксплуатации, годы	Мощность, кВт	LIRV, отн.ед.	PIRV, 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

Контроль изоляции обмоток проводили по измерению и определению $R_{из}$, K_a , PI, тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 0,001 Гц $tg\delta_{0,001}$, PIRV, LIRV, интенсивности и величины частичных разрядов (ЧР). Сразу отметим, что последний параметр оказался неинформативным. ЧР регистрировали высокочастотным трансформатором тока, установленным на питающем кабеле. При такой схеме измерения регистрировали высокую активность ЧР от технологических микрополостей изоляции со стороны соединения звездой. Эти технологические дефекты никак не влияют на работоспособность ЭД, и со временем эксплуатации активность ЧР в них падает [5], что было подтверждено и нашими измерениями (см. табл. 4).

Из восьми представленных в табл. 4 обследованных ЭД только для первых трех зафиксировано старение по показателям PIRV, LIRV, $tg\delta_{0,001}$ и PI. Индекс электропроводности LIRV явился наиболее чувствительным к старению изоляции обмотки статора, это

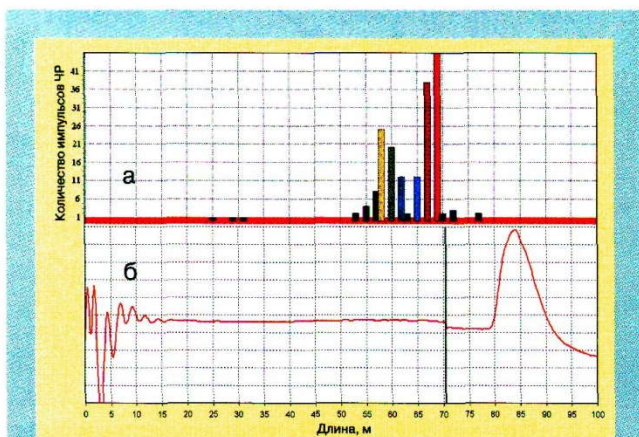


Рис. 5. Регистрация усушки бумажной изоляции силового 6 кВ кабеля на участке 50 – 70 м а - распределение частичных разрядов по длине кабеля, б - временная рефлектометрия

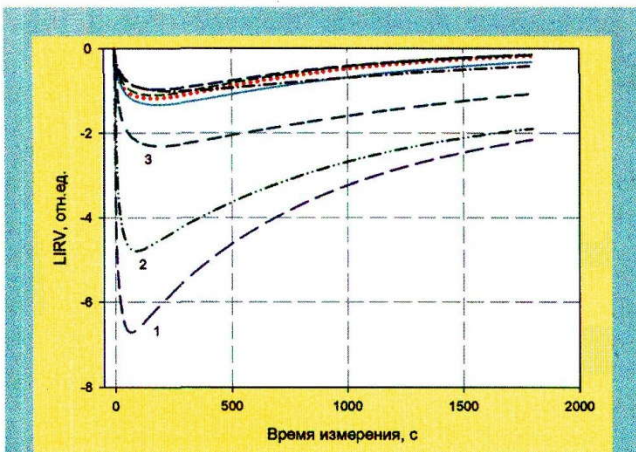


Рис. 6. Кривые восстановленного напряжения изоляции обмоток статоров обследованных ЭД, нормированные для оценки электропроводности
 числа 1, 2, 3 - номера ЭД из табл. 5

наглядно видно из кривых ВН на рис. 6, нормированных для оценки электропроводности.

Анализ экспериментальных данных дает основание считать, что старение изоляции обмоток статора ЭД можно контролировать на ранней стадии по накоплению зарядовых состояний на дефектах в объеме изоляции по показателю PIRV, а процесс увеличения электропроводности по показателю LIRV. Вполне возможно, что в ухудшенном и предельном состояниях не будет наблюдаться рост PIRV из-за «тушения» миграционной поляризации сквозными токами утечки. В этом случае для оценки состояния изоляции следует использовать показатель LIRV.

В табл. 5 представлены критерии оценки технического состояния микалентной компаундированной изоляции обмоток статора мощных ЭД, которые разработаны на основе экспериментальных данных и положений стандарта IEEE 43-2000 [6].

Таблица 5

Классификация состояния статора ЭД по результатам измерения восстановленного напряжения микалентной изоляции обмотки

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

Полученные экспериментальные данные дают возможность проводить консервативный прогноз срока

службы изоляции обмотки статора, используя линейную зависимость показателей состояния PIRV и LIRV 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 выбранного показателя состояния, I_d – величина показателя состояния на момент контроля состояния, τ_d – срок службы изоляции обмоток статора ЭД на момент контроля состояния в годах.

За срок службы следует принимать наименьший, рассчитанный по формуле (4) по показателям PIRV и LIRV. 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 формуле (4) дают возможность проводить долговременное прогнозирование для планирования ремонтных работ статора и замены ЭД.

Следует принимать во внимание, что критериальные значения I_0 и I_f для различных типов изоляционных материалов могут не совпадать. Поэтому для обеспечения контроля состояния следует определить хотя бы начальные значения I_0 для показателей PIRV и LIRV, соответствующие несостаренной изоляции. Измерение ВН после пуска оборудования или кабелей в эксплуатацию также полезно для определения дефектов, полученных при изготовлении изоляции или монтаже оборудования.

Выводы

Внедрение в практику технического диагностирования состояния электрической изоляции новых показателей PIRV и LIRV существенно повышает достоверность и эффективность диагностирования. Для ПБИ и изоляции обмоток статоров вращающихся машин это достигается

- 1) возможностью одновременного контроля двух относительно независимых процессов старения изоляции – накопления/изменения объемного зарядового состояния и увеличения электропроводности;
- 2) осуществлением контроля состояния на основе результатов одного измерения;
- 3) правильной интерпретацией экспериментальных данных о протекающих процессах старения электрической изоляции;
- 4) потенциальной возможностью применения метода ВН на основе показателей PIRV и LIRV для различных промышленных диэлектриков;
- 5) возможностью контроля электрической изоляции по всей траектории старения от начального состояния до предельного благодаря высокой чувствительности PIRV и LIRV к объемным дефектам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононенко А.И., Хохряков А.В. Оценка состояния бумажной электрической изоляции по результатам измерений восстановленного напряжения // Электротехника. 2010. № 5. С. 47-55.
2. Кононенко А.И. Новый подход к контролю состояния электрической изоляции по результатам измерения восстановленного напряжения: сб. научн. тр.: 5-я междунар. научн.-технич. конф. «Электрическая изоляция - 2010» / Политехнический университет. Санкт-Петербург, 2010. 1 – 4 июня. С. 255-263.
4. Холодный С.Д. Технологическая термообработка изоляции кабелей и проводов. М.: Изд-во МЭИ, 1994.
3. R. Neimanis, T.K. Saha, 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.
5. E. Gulski, J.J. Smit, H.J. Van Breen, P.P. Seitz, F. De Vries, F. Petzold. «Partial Discharge Diagnosis of Stator Insulation Using Damped AC Voltages» Electrical Insulation. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on 11-14 June, Toronto, Ont., 2006.
6. IEEE Std. 43-2000. Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machines.

Кононенко Александр Иванович – канд. техн. наук, начальник отдела
(495) 5523807 kononenko@niipriborov.ru

Хохряков Алексей Владимирович – начальник группы отдела
(495) 5523807 Hohryakov@niipriborov.ru

Слабоус Роман Владимирович – инженер-испытатель отдела испытаний на эксплуатационную устойчивость электротехнических материалов и изделий АС и ЯУ
(495) 5523807 Slabous@niipriborov.ru

Ратников Денис Александрович – инженер-испытатель отдела испытаний на эксплуатационную устойчивость электротехнических материалов и изделий АС и ЯУ
(495) 5523807 Ratnikov@niipriborov.ru

ФГУП «НИИП»