

Оценка состояния электрической изоляции по результатам измерения изотермического тока релаксации

- Кононенко А. И.¹, канд. техн. наук, АО “Научно–исследовательский институт приборов” (АО “НИИП”), Московская область, Лыткарино

Представлены экспериментальные данные по измерению изотермического тока релаксации (ИТР) в различных по своей природе типах промышленной электрической изоляции: из сшитого полиэтилена (СПЭ) силовых кабелей напряжением 6 кВ и терморезистивной изоляции обмоток статоров мощных вращающихся машин. Оценку степени старения/повреждения электрической изоляции проводили по показателям, которые определяли из так называемой кривой распределённого заряда. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что метод ИТР обладает высокой чувствительностью регистрации зарождающихся дефектов в этих изоляционных материалах и позволил определить для изоляции из СПЭ показатели старения и их начальные и предельные значения.

Ключевые слова: изотермический ток релаксации, техническое диагностирование, изоляция из сшитого полиэтилена, терморезистивная изоляция, силовые кабели, обмотки статоров.

Измерение изотермического тока релаксации и определение диагностических параметров. Измерение изотермического тока релаксации (ИТР) в качестве метода оценки состояния электрической изоляции используется достаточно давно. Сегодня на рынке доступны специальные приборы для измерения ИТР непосредственно в условиях эксплуатации электрооборудования. По сути ИТР – это разрядный ток, параметры которого определяются не только заранее заданными временем и напряжением зарядки, но и свойствами диэлектрика. Метод обладает высокой чувствительностью к наличию объёмных зарядовых состояний в диэлектрике и даёт возможность регистрировать дефекты, которые не вносят свой вклад в сквозной ток проводимости, например, дефекты в отдельных слоях многослойных диэлектрических материалов или объёмные дефекты в материалах с очень низкой объёмной проводимостью. Метод ИТР основан на модели теплового высвобождения носителей заряда из ловушек [1] и применяется для оценки состояния изоляции силовых кабелей среднего напряжения [2]. Экспериментальную кривую ИТР традиционно описывают уравнением

$$I_{IRC} = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (1)$$

где I_i и τ_i – интенсивность и время жизни i -го компонента тока релаксации; I_0 – установившийся ток.

ИТР определяется дефектами в объёме диэлектрика, которые имеют дискретный набор энергетических уровней, расположенных выше уровней

Ферми. В этом случае для энергии ΔE , необходимой для переноса захваченного в ловушке электрона с энергетическим уровнем E_{Tr} до нижнего края зоны проводимости E_C , и временем этого процесса t , согласно [1] выполняется уравнение

$$\Delta E = E_C - E_{Tr} = kT \ln vt, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; v – вероятность высвобождения электрона из ловушки. В работе [1] также представлена модель, позволяющая оценить величину ИТР для диэлектрика толщиной L

$$I_{IRC} = \frac{qLkT}{2t} f_0(E)N(E_{Tr}), \quad (3)$$

где q – заряд; $f_0(E)$ – начальная заселённость ловушек электронами; $N(E_{Tr})$ – плотность ловушек.

Подставляя в уравнение (3) значение I_{IRC} из уравнения (1) получаем

$$f_0(E)N(E_{Tr}) = \frac{2}{qLkT} t \left[I_0 + \sum_{i=1}^n I_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right]. \quad (4)$$

Для экспериментатора самым важным из уравнения (4) является то, что произведение ИТР на время t прямо пропорционально плотности ловушек $N(E)_{E=E_{Tr}}$. С другой стороны, из выражения (2) следует, что E_{Tr} прямо пропорциональна логарифму времени измерения

$$E_{Tr} = E_C - kT \ln vt. \quad (5)$$

Это означает, что зависимость $I_{IRC}t$ от $\ln t$ подобна зависимости $N(E)$ от $(E_C - E)$, которая описывает энергетическое распределение ловушек,

¹ Кононенко Александр Иванович: aikonenko@niipribor.ru

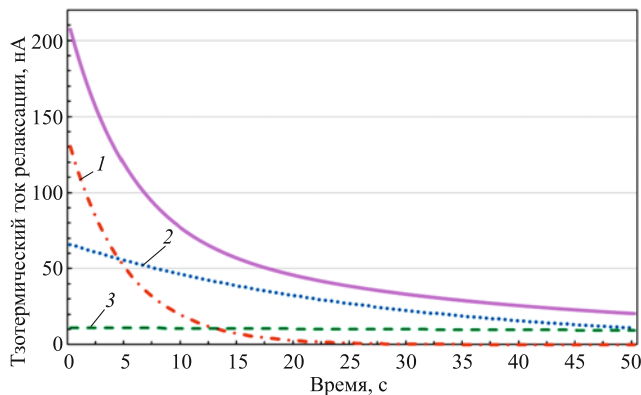


Рис. 1. Кривая изотермического тока релаксации и её компоненты (1 – 3)

заполненных электронами в верхней половине запрещённой зоны диэлектрика. На практике для оценки состояния электрической изоляции используют зависимость I_{IRCT} от $\log_{10} t$ или так называемую кривую распределённого (по времени или энергии) заряда.

На рис. 1, 2 представлены характерные кривые ИТР, распределённого заряда и их компонентов, полученные в ходе проведения диагностических работ. Традиционную кривую ИТР можно однозначно разложить на три компонента. Для однородной изоляции из СПЭ первый компонент длительностью от 5 до 10 с обычно ассоциируют с бездефектной областью изоляции, второй компонент длительностью от 25 до 70 с связывают с релаксацией заряда на границах раздела диэлектрик – полупроводящий слой, третий длительностью от 250 до 900 с – с дефектами в объёме изоляции. Использовать в качестве диагностических параметров (ДП) непосредственно I_i и τ_i , как правило, нельзя, так как они зависят и от ёмкости и от геометрии исследуемой изоляции. Поэтому в качестве ДП можно использовать параметры, характеризующие кривую распределённого заряда: её форму и, например, отношение между максимумами h_3 и h_2 (рис. 2) или отношение между площадями

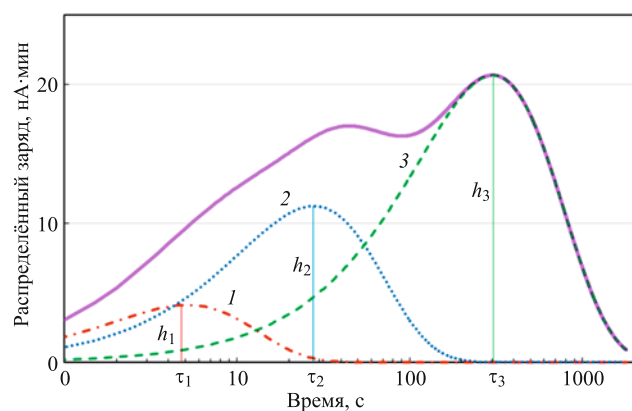


Рис. 2. Кривая распределённого заряда и её компоненты (1 – 3)

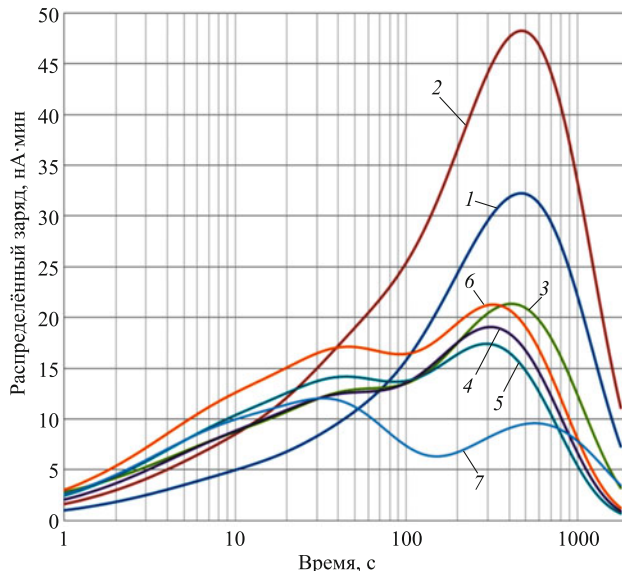


Рис. 3. Кривые распределённого заряда изоляции для кабелей типа ПвБвнг(А)-LS с различным уровнем старения $AI(h)$:

1 – 10,7; 2 – 6,75; 3 – 2,71; 4 – 2,54; 5 – 1,87; 6 – 1,84; 7 – 0,81

третьего S_3 и второго S_2 компонентов распределённого заряда, если полагать, что старение изоляции обусловлено ростом объёмных дефектов, а изменение зарядовых состояний на границах раздела практически отсутствует.

Оценка состояния силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. ИТР использовали для диагностики силовых кабелей типа ПвБвнг(А)-LS сечением жил 50, 70, 120 и 150 мм² после нескольких лет эксплуатации в помещении энергоблоков, их длина составляла от 150 до 300 м. Измерение ИТР проводили прибором AC-Tester, сопротивление изоляции – мегомметром S1-5005, тангенс угла диэлектрических потерь tgδ в диапазоне частот от 0,001 до 1000 Гц – прибором IDAX 350.

Для регрессионного анализа кривых ИТР применяли программу Fitter [3]. Экспериментальные кривые ИТР аппроксимировали суммой трёх экспонент, затем строили кривые распределённого заряда (рис. 3) как для каждой экспериментальной кривой, так и для каждого её компонента и определяли величины h_3 и h_2 (как это указано на рис. 2).

В качестве основного ДП был выбран показатель старения изоляции $AI(h)$, который определялся как отношение h_3/h_2 . Причём показатель $AI(h)$ рассчитывали как для нефиксированных начальных значений I_i и τ_i , так и при фиксированном значении τ_1 для подтверждения модельного положения о том, что первый компонент длительностью 5 – 10 с соответствует бездефектной области изоляции. Во втором случае значение τ_1 взяли равным 5 с, именно такое значение τ_1 было получено для кабеля с наименьшим значением $AI(h) = 0,8$ при проведении регрессии в первом случае. Дополни-

тельно рассчитывали и показатель старения изоляции $AI(S)$, который определялся как отношение площадей третьего и второго компонентов распределённого заряда S_3/S_2 .

В табл. 1 указаны параметры диагностики изоляции из СПЭ для обследованных кабелей. Приведены два показателя старения $AI(h)$ и $AI(S)$ и электрические характеристики кабелей: электрическое сопротивление $R_{1\text{мин}}$, коэффициент абсорбции K_a , индекс поляризации PI . В табл. 1 кабели расположены по возрастанию показателя $AI(h)$, значения этого показателя при фиксированном τ_1 обозначены как $AI(h)|_{\tau_1=5c}$. (В п. 3 табл. 1 указаны ДП кабеля, кривые ИТР и распределённого заряда которого были на рис. 1, 2).

Анализ экспериментальных данных показал: во-первых, модельное положение об отнесении первого короткоживущего компонента ИТР к бездефектной области изоляции справедливо, так как значения $AI(h)$ и $AI(h)|_{\tau_1=5c}$ совпадают. Во-вторых, для трёх кабелей (№ 11 – 13 в табл. 1) резкое падение поляризационных свойств изоляции по показателю PI сопровождается резким увеличением показателей старения $AI(h)$ и $AI(S)$.

Две причины изменения поляризационных свойств изоляции из СПЭ в нашем случае реализуются. Во-первых, это проникновение влаги по границе раздела проводник – изоляция из-за циклического нагрева и охлаждения кабеля, т.е. повышения и понижения давления по границе раздела. Этот механизм ярко выражен для кабелей питания аварийных насосов (№ 11 и 12 табл. 1), работоспособность которых проверяют раз в месяц. Они имеют пониженное сопротивление изоляции, K_a , PI и повышенные диэлектрические потери на частоте 0,001 Гц (рис. 4).

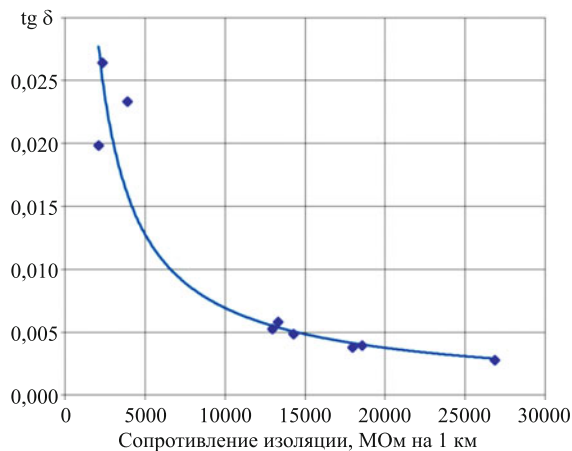


Рис. 4. Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 0,001 Гц в зависимости от сопротивления изоляции кабелей типа ПвБвнг(А)-LS

Другой механизм деградации изоляции является определяющим для кабеля № 13, ДП которого указаны в табл. 1. Он обладает большим сопротивлением (самым большим среди обследованных кабелей), низкими диэлектрическими потерями на частоте 0,001 Гц (рис. 4), большим значением K_a и, с другой стороны, низким значением PI и большим показателя старения AI . Следовательно, в данном случае мы наблюдаем “тушение” объёмной (миграционной) поляризации за счёт появления новых дефектов. Появление этих дефектов связано с некачественным изготовлением концевых заделок, наличием углублений в изоляции, образовавшихся при снятии полупроводящего слоя, и последующей ионизацией среды в этих местах. Во всех других обследованных кабелях в эксплуатации реализуются описанные ранее механизмы деградации изоляции в той или иной степени. Де-

Т а б л и ц а 1

Электрические параметры и показатели состояния изоляции кабелей типа ПвБвнг(А)-LS по измерению изотермического тока релаксации

№ п/п	Длина, м	$R_{1\text{мин}}$, МОм	PI	K_a	$AI(h)$	$AI(h) _{\tau_1=5c}$	$AI(S)$
1	165	14 973	3,1	2,7	0,81	0,81	11,8
2	127	16 764	2,8	2,9	1,79	1,80	18,2
3	164	15 039	2,8	2,7	1,84	1,84	19,7
4	128	15 494	2,9	3,1	1,86	1,86	12,9
5	165	18 532	2,5	3,1	1,87	1,87	20,1
6	128	20 193	3,1	2,9	1,92	1,92	20,5
7	143	19 591	2,5	3,3	1,97	1,97	18,9
8	128	20 320	3,0	3,4	2,30	2,55	26,5
9	139	21 684	2,1	3,0	2,54	2,54	30,8
10	128	12 928	3,1	2,9	2,71	2,70	35,2
11	242	2096	1,3	1,2	6,75	6,73	84,3
12	248	2778	1,0	1,2	10,70	10,39	166,5
13	244	26 840	1,1	3,0	12,36	12,36	346,6

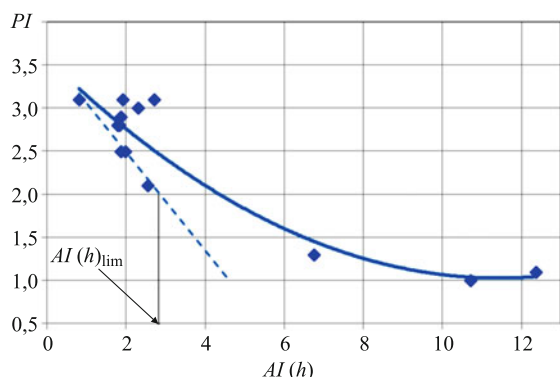


Рис. 5. Корреляционная зависимость между индексом поляризации и показателем старения

фекты изоляции развиваются на концевых участках кабелей и это подтверждается историей их эксплуатации. При проведении испытаний повышенным напряжением фиксировались “неожиданные” отказы отдельных кабелей. Переразделка концевых заделок восстанавливала их рабочее состояние.

Следовательно, деградацию изоляции из СПЭ силовых кабелей низкого и среднего напряжений, обусловленную как увлажнением, так и электрическим старением, можно контролировать по диагностическому параметру AI . Если эти дефекты оказывают влияние на сквозной ток проводимости, то контроль за ними можно осуществлять по традиционным электрическим параметрам. Очевидно, что все ДП имеют разную чувствительность к различным типам дефектов. Наиболее чувствительным традиционным ДП в нашем случае является индекс поляризации PI .

В отличие от ИТР, традиционные электрические методы контроля не могут зарегистрировать объёмные дефекты в изоляции, если они не вносят вклад в сквозной ток проводимости. В нашем случае можно считать, что изменение $AI(h)$ и $AI(S)$ в основном обусловлено появлением дефектов, которые регистрируются по показателям R_{\min} , PI и $tg\delta$ на частоте 0,001 Гц.

Для показателя PI общеприняты следующие критерии оценки состояния полимерной изоляции: $PI > 4$ – норма, PI от 2 до 4 – хорошее, PI от 1 до 2 – несоответствующее (сегодня они представлены в руководстве пользователя для любого цифрового мегомметра). Исходя из этих критериев и полученных экспериментальных данных были определены начальные и предельные значения для показателей $AI(h)$ и $AI(S)$. Для этого строили зависимости $AI(h) - PI$ и $AI(S) - PI$ и руководствовались следующим консервативным подходом:

1) предельным значениям показателей $AI(h)$ и $AI(S)$ соответствует $PI = 2$;

2) для определяющих корреляционных зависимостей принимали во внимание только крайние левые точки полученных экспериментальных дан-

ных (рис. 5), так как ИТР имеет более высокую чувствительность к изменению объёмных зарядовых состояний диэлектрика, чем PI .

Предельные значения AI составили: $AI(h)_{\lim} = 2,8$ и $AI(S)_{\lim} = 30,7$. В качестве начальных значений AI для несостаренной изоляции из СПЭ кабелей типа ПвБвнг(А)-LS можно использовать наименьшие полученные значения AI (№ 1 в табл. 1), т.е. $AI(h)_0 = 0,8$ и $AI(S)_0 = 11,8$. Следует отметить, что определение начальных значений AI на новых кабелях возможно только после их кондиционирования, т.е. “отжига” технологических дефектов, например, заряженных радикалов. Для этого достаточно несколько месяцев эксплуатации силовых кабелей.

Полученные данные показали, что вплоть до предельных значений наблюдается прямо пропорциональная зависимость между $AI(h)$ и $AI(S)$, т.е. в качестве ДП силовых кабелей среднего напряжения с изоляцией из СПЭ можно применять как $AI(h)$, так и $AI(S)$. В дальнейшем, при последующем наборе экспериментальных данных начальные и предельные значения для кабельной изоляции из СПЭ будут уточняться. На сегодняшний день для практической работы значение $AI(h)_{\lim} = 2,8$ является вполне допустимым. По принятым в данной статье модельным положениям это означает наличие в объёме изоляции дефектов, заряд которых в 2,8 раза превышает заряд на границе раздела изоляция – полупроводниковый слой. Конечно, важным моментом является распределение по объёму этого регистрируемого заряда, так как метод ИТР – интегральный. Другими словами, если старение изоляции из СПЭ идёт равномерно по всей длине кабеля, то предельное значение $AI(h)_{\lim}$ можно увеличить.

Таким образом, применение показателя $AI(h)$ даёт возможность оценивать техническое состояние силовых кабелей с изоляцией из СПЭ по всей траектории старения от момента зарождения дефектов до предельного состояния. Принимая во внимание, что для определения значения $AI(h)_{\lim}$ был использован консервативный подход, и полагая, что скорость старения СПЭ постоянна и прямо пропорциональна времени эксплуатации, гарантированно заниженный срок службы кабеля можно оценить по формуле

$$\tau_{AI} = \tau_d \frac{AI(h)_{\lim} - AI(h)_d}{AI(h)_d - AI(h)_0}, \quad (6)$$

где τ_d и $AI(h)_d$ – срок службы и значение $AI(h)$ на момент диагностики.

Контроль состояния изоляции обмоток статоров мощных вращающихся машин. Метод ИТР использовали для контроля состояния термоактивной изоляции типа “Монолит 2” обмоток статора восьми электродвигателей (ЭД) типа ВДА-173/99-6У4 мощностью 5600 кВт, срок служ-

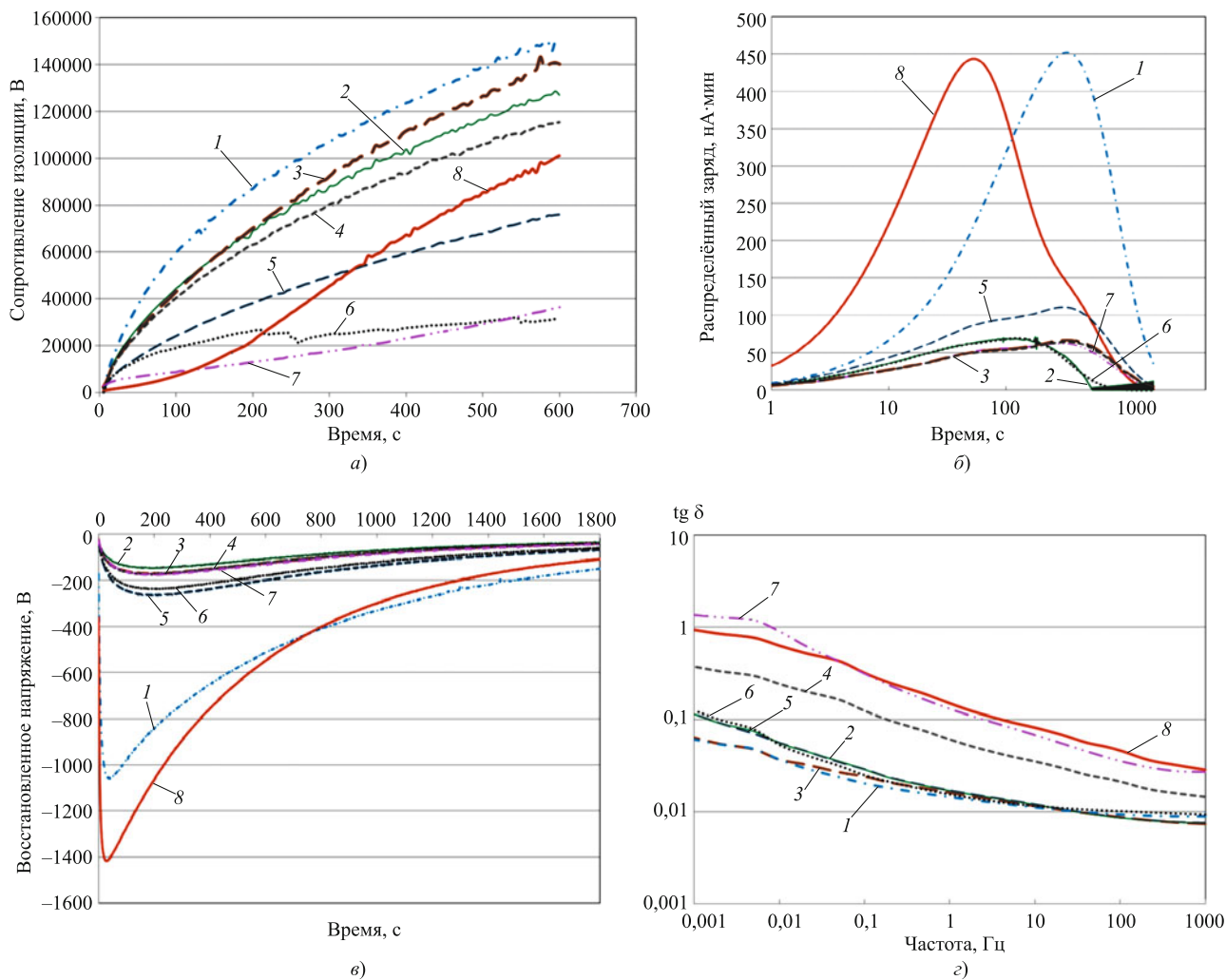


Рис. 6. Экспериментальные данные контроля состояния изоляции обмоток статора электродвигателей:

a – сопротивление изоляции; *б* – изотермический ток релаксации; *в* – восстановленное напряжение; *г* – тангенс угла диэлектрических потерь; 1 – $R_{1\text{мин}} = 43\,050$ МОм; 2 – 3165 МОм; 3 – 29 630 МОм; 4 – 28 730 МОм; 5 – 16 930 МОм; 6 – 15 210 МОм; 7 – 7187 МОм; 8 – 3873 МОм

бы которых составлял более 30 лет. Наряду с измерением ИТР проводили измерения сопротивления изоляции прибором Megger-S1 1054/2, восстановленного напряжения – прибором AC Tester и определяли частотно-диэлектрические потери в диапазоне частот от 0,001 до 1000 Гц прибором IDAX 350. При проведении электрических измерений приборы подключали к одной из фаз обмотки (все фазы на другой стороне были соединены) и корпусу статора. При такой схеме подключения изменение ДП обусловлено не только состоянием самой терморезистивной изоляции, но и состоянием её поверхности.

Результаты измерений представлены на рис. 6. В табл. 2 приведены традиционные ДП, рассчитанные из экспериментальных данных: коэффициент абсорбции K_a , индекс поляризации PI , максимум восстановленного напряжения U_{rm} и его положение T_{rm} на временной оси, максимумы компонентов кривой распределённого заряда h_1, h_2, h_3 .

Все ДП в табл. 2 расположены по мере уменьшения сопротивления изоляции $R_{1\text{мин}}$.

Сопротивление изоляции, измеренное через 1 мин после подачи напряжения $R_{1\text{мин}}$, у восьми обследованных обмоток существенно различается, максимальное значение равно 43 050 МОм, минимальное – 3873 МОм (№ 1 и 8 в табл. 2). Вместе с тем как у обмотки № 1, так и у обмотки № 2 отдельные слои многослойной изоляции либо поверхность имеют проводимость значительно выше, чем остальные. На это указывает значительное смещение положения максимума T_{rm} кривых восстановленного напряжения в сторону меньших времён (табл. 2 и рис. 6, в), т.е. скорость релаксации центров объёмной поляризации в изоляции обмоток № 1 и 8 (табл. 2) выше, чем в других обмотках [4, 5]. Увеличение проводимости связано с большим числом дефектов в отдельных слоях изоляции либо наличием сильного загрязнения обмоток. Зарядовое состояние этих дефектов является

причиной больших значений максимумов восстановленного напряжения U_{rm} .

Вместе с тем дефекты для изоляции № 1 и 8 имеют разную природу. Это явно видно из полученных экспериментальных данных. Во-первых, мы наблюдаем значительное различие в сопротивлении изоляции в измеряемом диапазоне от 0 до 10 мин (рис. 6, а), во-вторых, почти на порядок различающиеся диэлектрические потери в измеряемом диапазоне частот (рис. 6, з), в-третьих, наблюдается пересечение кривых восстановленного напряжения в районе 750 с (рис. 6, в), в-четвёртых, различаются положения максимумов кривых распределённого заряда на временной шкале (рис. 6, б) для обмотки № 8 с наименьшим сопротивлением изоляции, который существенно сдвинут влево по шкале времени по сравнению с максимумом обмотки № 1. Как было показано ранее, кривая распределённого заряда в методе ИТР фактически соответствует плотности заселённости электронами ловушек с разными энергетическими уровнями в запрещённой зоне диэлектрика. Следовательно, дефекты изоляции для обмотки № 8 имеют в основном более низкую энергию залегания от края зоны проводимости, чем дефекты изоляции для обмотки № 1. Возможность количественного разделения групп дефектов изоляции по энергии показывает в данном случае явное преимущество метода ИТР перед методом восстановленного напряжения. Пересечение кривых 1 и 8 на рис. 6, в для изоляции этих обмоток лишь качественно указывает на различия в энергетическом спектре дефектов.

Следует отметить, что обмотки статора работают в тяжёлых условиях высоких температур, механических воздействий, существенной виброактивности и переменных нагрузок. Термореактивная изоляция обмоток содержит связующие, которые после термической обработки не размягчаются при рабочих температурах. Макромолекулы связующих соединены поперечными ковалентными связями, т.е. химическими связями с большой энергией активации 200 – 460 кДж/моль. образу-

ется сетчатая химическая структура. Её электрические и механические характеристики в эксплуатации мало изменяются. Изоляционным барьером здесь является слюдинитовая бумага, связующими служат эпоксидные, полиэфирные и другие компаунды и лаки, обеспечивающие высокую адгезию, влагостойкость и монолитность, а подложкой служит стеклоткань [6].

Нагревание сетчатых полимеров приводит не к расплавлению, а к разрушению пространственной сетки, сопровождающемуся термодеструкцией, в том числе из-за наличия частичных разрядов в микрополостях реальной изоляции. В дальнейшем в процессе длительного приложения электрического поля твёрдые изоляционные материалы могут пробиваться из-за прорастания внутри них древовидных каналов – дендритов (триингов) [7]. Обычно дендриты не проводят электрический ток, их можно представить в виде непроводящих полых трубочек, связанных между собой. На этом этапе сопротивление изоляции может даже возрасти, что и наблюдается для обмотки № 1 (рис. 6, а). Дальнейшее прорастание дендрита до критического размера приводит к пробое изоляции. По-видимому, большое значение максимума третьего компонента кривой распределённого заряда h_3 обусловлено наличием электрических дендритов в связующем составе термореактивной изоляции.

Снижение сопротивления изоляции может быть как следствием её сильного загрязнения, увлажнения, так и частичного разрушения вследствие старения. Разрушение может быть вызвано возникновением пазового разряда из-за вибрации стержня [8]. Для изоляции обмотки № 8 снижение сопротивления изоляции не связано с увлажнением, так как значение коэффициента абсорбции $K_a = 2,6$ (табл. 2). Максимум кривой ИТР сдвинут влево, значение показателя h_2 очень большое, что формально можно трактовать как наличие дополнительных низкоэнергетических дефектов на границах раздела различных по своим диэлектрическим свойствам компонентов изоляции либо как наличие сильного загрязнения поверхности обмо-

Т а б л и ц а 2

Значения характерных параметров диагностики изоляции обмоток статоров электродвигателей

№ п/п	R_{1min} , МОм	K_a	PI	U_{rm} , В	T_{rm} , с	h_1 , нА·мин	h_2 , нА·мин	h_3 , нА·мин	tgδ на частоте 0,001 Гц
1	43 050	3,2	3,5	1058,7	35,0	10,8	61,3	447,6	0,0601
2	31 650	2,9	4,0	147,3	188,0	6,4	21,9	54,6	0,1138
3	29 630	3,1	4,7	170,9	189,0	8,3	28,3	66,7	0,0636
4	28 730	3,0	4,0	175,5	181,5	8,0	27,9	64,4	0,3681
5	16 940	2,8	4,5	265,7	197,0	11,9	46,2	110,0	0,1138
6	15 210	2,4	2,0	237,5	199,5	5,6	23,7	68,5	0,1241
7	7187	1,6	5,1	177,0	197,0	8,0	28,6	61,6	1,3583
8	3873	2,6	26,1	1428,8	26,0	30,6	373,4	148,9	0,9268

ток. Большие значения U_{rm} и h_2 , сдвиг T_{rm} в область малых времён и нетипичная зависимость R от времени свидетельствуют о том, что приложенное напряжение приводит к образованию зарядовых состояний на поверхности обмотки.

Пониженное сопротивление изоляции для обмотки № 7 (табл. 2) обусловлено, по-видимому, увлажнением поверхности обмотки, на что указывают как относительно низкое значение коэффициента абсорбции $K_a = 1,6$, так и самое большое среди обследованных обмоток значение $\text{tg}\delta$ на частоте 0,001 Гц (табл. 2).

Для контроля состояния обмоток изоляции старатора также можно использовать показатель $AI(h)$. На рис. 7 представлена зависимость $AI(h)$ от сопротивления изоляции для восьми обследованных обмоток. Исходя из полученных экспериментальных данных, можно сделать следующие выводы:

1) если показатель $AI(h)$ находится в пределах от 2 до 3, то состояние терморезистивной изоляции типа “Монолит 2” для электродвигателей ВДА-173/99-6У4 – хорошее;

2) если $AI(h)$ больше 3, то следует говорить о наличии процесса деструкции связующего состава в объёме этой изоляции;

3) если $AI(h)$ меньше 2, то это свидетельствует о наличии дефектов на поверхности обмоток либо о наличии её сильного загрязнения.

Качественно понятно, что диапазон $AI(h)$, указывающий на хорошее состояние терморезистивной изоляции, зависит от состава и технологии её изготовления, другими словами, для разных марок электродвигателей этот диапазон значений $AI(h)$ следует определять заранее перед проведением контроля состояния.

Более широкое внедрение в практику технического диагностирования метода ИТР несомненно позволит установить начальные и предельные значения параметра $AI(h)$ для изоляции различных типов электрических машин.

Выводы

По результатам технического диагностирования силовых кабелей с изоляцией из СПЭ напряжением 6 кВ и терморезистивной изоляции обмоток статоров мощных вращающихся машин в эксплуатации с применением метода ИТР получены следующие результаты:

1. Установлены показатель старения изоляции из СПЭ, его начальные и предельные значения для силовых кабелей среднего напряжения. Полученные данные дают возможность контролировать фактическое состояние и прогнозировать срок службы этих кабелей в эксплуатации.

2. Показана возможность регистрировать и контролировать развитие скрытых высокоомных дефектов, образующихся в процессе деструкции

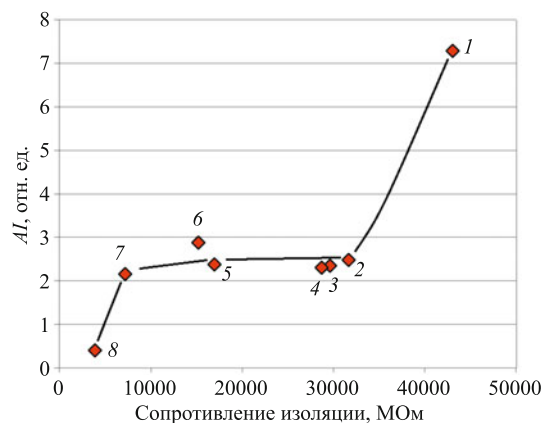


Рис. 7. Корреляция между показателем старения изоляции $AI(h)$ обмоток статоров и её сопротивлением:

1 – 8 – номерами обследованных электродвигателей в табл. 2

связующего состава терморезистивной изоляции обмоток статоров мощных вращающихся машин, и дефектов поверхности этих обмоток.

3. Показано, что метод является эффективным инструментом для оценки и прогнозирования состояния электрической изоляции кабелей и электрических машин: имеет понятную физическую основу, и это позволяет проводить научнообоснованную диагностику состояния; является неразрушающим методом контроля состояния; обладает высокой чувствительностью регистрации зарядовых состояний в диэлектриках, что даёт возможность проводить раннюю диагностику развивающихся дефектов. С другой стороны, измерение ИТР, как и всякий метод диагностики, имеет свои ограничения, во-первых, он является интегральным по своей природе, т.е. не обладает возможностью локализовать дефект, во-вторых, для определения начальных значений диагностических параметров для новой не состаренной электрической изоляции необходимо проводить предварительный “отжи” технологических зарядовых состояний в её объёме.

Список литературы

1. Simmons, J. G. Theory of Isothermal Current and the Direct Determination of Trap Parameters in Semiconductors and Insulators Containing Arbitrary Trap Distributions [Text] / J. G. Simmons, M. C. Tam // Physical Review B. – 1973. – Vol. 7. – P. 3706 – 3713.
2. Hoff, G. Condition Base Maintenance of PE / XLPE Insulated Medium Voltage Cable Network-Verification of the IRC Analysis to Determine the Cable Age [Text] / G. Hoff, H. G. Kranz // Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – 2002. – P. 53 – 56.
3. Bystritskaya, E. V. Nonlinear Regression Analysis: New Approach to Traditional Implementations [Text] / E. V. Bystritskaya, A. L. Pomerantsev, O. Ye. Rodionova // Journal of Chemometrics. – 2000. – Vol. 14. – Issue 5 – 6. – P. 667 – 692.
4. Тютнев, А. П. Физико-математическая модель явления восстановления напряжения и перспективы ее применения для прогнозирования технического состояния полимеров

Алексей Ибрагимович Таджикибаев (К 70-летию со дня рождения)



Исполнилось 70 лет заслуженному энергетику Российской Федерации Алексею Ибрагимовичу Таджикибаеву, доктору технических наук, профессору, академику АЭН, заведующему кафедрой “Диагностика и управление техническим состоянием энергетического оборудования” (ДЭО) ФГАОУ ДПО “ПЭИПК”.

А. И. Таджикибаев прошёл путь от рабочего предприятия ТЭК до ректора старейшего отраслевого института – Петербургского энергетического института повышения квалификации, который возглавлял бессменно более 10 лет. Алексей Ибрагимович опытный педагог с огромным жизненным и преподавательским опытом, учёный, организатор научной и учебно-методической работы. С его непосредственным участием за десятилетия преподавательской, научной и практической работы организовано и проведено обучение более 50 тыс. отечественных и иностранных специалистов-энергетиков. Он активно развивает международное сотрудничество. Проводит большую работу по обмену опытом с ведущими техническими университетами Европы, регулярно участвует в крупных международных форумах энергетиков, выступает с докладами на актуальные темы ТЭК.

Алексей Ибрагимович Таджикибаев, ученик и продолжатель дела Н. Н. Тиходеева, М. В. Костенко и других известных учёных, за более чем 35-летний стаж работы в электроэнергетике внёс и продолжает вносить значительный вклад в отечественную и мировую науку, подготовку научных инженерных кадров, развитие отрасли. По результатам многолетней научно-технической деятельности им подготовлено и опубликовано более 300 научных работ, в том числе 36 учебников, учебно-методических пособий, монографий, 37 авторских свидетельств.

Алексей Ибрагимович проводит активную работу по связям с научной общественностью и распространением научно-технических знаний в области энергетики, являясь председателем Российского национального комитета Международной конференции по распределению электроэнергии CIREД,

заместителем председателя оргкомитета международной научно-технической конференции “Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования”. Он активно работает с учёными-электротехниками многих стран Европы и Азии; его труды переведены на иностранные языки. За активное внедрение энергоэффективных технологий и распространение знаний в области электротехники А. И. Таджикибаев удостоен высоких званий “Почётный профессор университета г. Варна” и “Почётный профессор Будапештской высшей школы прикладных наук”.

Алексей Ибрагимович основал школу в области оценки технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов и систем, международный научно-технический семинар “Методы и средства оценки технического состояния энергетического оборудования”. В результате его научно-просветительской деятельности подготовлен ряд специалистов, которые являются сегодня ведущими в области оценки технического состояния оборудования. По итогам научной деятельности он защитил докторскую диссертацию на тему: “Научные основы систем оценки технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов”.

А. И. Таджикибаев внёс большой вклад в развитие и модернизацию организационной, хозяйственной, учебной и научной работы старейшего энергетического института – ФГАОУ ДПО “ПЭИПК”, что позволило проводить непрерывное образование руководителей и специалистов-энергетиков на уровне, соответствующем самым высоким мировым и европейским стандартам.

Под его руководством в различных областях электроэнергетики проведены исследования по заказам многих предприятий отрасли, среди которых “Ленэнерго”, “Красноярскэнерго”, “Псковэнерго”, Берёзовская ГРЭС, Зейская ГЭС, Саяно-Шушенская ГЭС, “МРСК Северо-Запада” и др.

Алексей Ибрагимович имеет более 30 поощрений за многолетний добросовестный труд, за долголетнюю и плодотворную работу в системе топливно-энергетического комплекса, большой личный вклад в развитие энергетики; он награждён почётными грамотами Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации, правительства Санкт-Петербурга, многочисленными региональными, международными и общественными наградами. А. И. Таджикибаеву присвоены звания заслуженного энергетика Российской Федерации и заслуженного работника ЕЭС России.

Научная эрудиция, исследовательские и организаторские способности, доброе отношение к людям и коллегам позволили профессору А. И. Таджикибаеву завоевать заслуженный авторитет и уважение.

От всей души поздравляем Алексея Ибрагимовича с юбилеем! Желаем ему новых творческих успехов, здоровья и благополучия!

[Текст] / А. П. Тютнев, Р. Ш. Ихсанов, Е. Л. Гринь, Г. П. Сафонов, А. И. Кононенко, А. М. Сорокин, И. В. Руденко // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2006. – Том 48. – № 11. – С. 2007 – 2014.

5. Kononenko, A. The Experience in Applying New Recovery Voltage Parameters for the Impregnated Paper Insulation Cable Condition Diagnostics [Text]: Presented at 9th International Conference on Insulated Power Cables / A. Kononenko, A. Hohryakov. – France, Paris – Versailles, 2015. – 21 – 25 June.
6. Пак, В. М. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин [Текст] / В. М. Пак,

С. Г. Трубачев; под ред. В. М. Пака. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 416 с.

7. Александров, Г. Н. Техника высоких напряжений [Текст] / Г. Н. Александров, В. Л. Иванов, К. П. Кадомская, Н. А. Козырев, М. В. Костенко, Г. С. Кучинский, И. Ф. Половой, Б. М. Рябов, В. А. Хобберг; под ред. М. В. Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
8. Самородов, Ю. Н. Дефекты генераторов [Текст] / Ю. Н. Самородов. – М.: ЗАО “Энергетические технологии”, 2005. – 350 с.