

УДК 621.315:621.317

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ МАШИН ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Докт. СУБОЧ Й.

Щецинский политехнический институт (Польша)

Докт. техн. наук, проф. РОМАНЮК Ф. А.

Белорусский национальный технический университет

Использование диэлектрической спектроскопии в диагностике электрической изоляции и процессов ее старения во время эксплуатации находит все более широкое применение. Ряд работ указывает на то, что такая диагностика дает хорошие результаты, особенно в однородных полимерах, например в кабельной изоляции XLPE [1–3]. Использование электрической спектроскопии для диагностики слоевой изоляции, основанной преимущественно на комплексе эпоксидных и полиэфирных смол, упрочненных разного вида матами, тканями или волокнами, а также слюдой, связано с многими интерпретационными затруднениями [4, 5]. Это следует из сложной структуры такой изоляции. Ее конструкция, в основе которой лежит технология вакуумного насыщения под давлением (VPI), требует применения многокомпонентных полимерных матриц, упрочненных составом скрытых отвердителей, действующих в разное время и при разных температурах. Из [6, 7] следует, что такую слоевую систему составляют взаимно проникающие аморфные структуры (стекло, слюда, линейные связи смолы с отвердителем), а также системы с большой степенью упорядочения (пространственные связи смолы). Небольшое участие смол в массе увеличивает влияние интерфазы на процессы диэлектрической релаксации, а также их механические и электрические свойства. Эта фаза имеет свойства, зависящие от величины механических, термических и электрических напряжений, и является вязкоупругой структурой [8, 9]. В связи с этим точное теоретическое описание релаксационных процессов и их связей со степенью старения изоляции, выполненной методом VPI, затруднено. Несмотря на это, в настоящее время развиваются следующие методы измерения диэлектрической релаксации для оценки состояния изоляции в установках высокого напряжения (ВН):

- измерение изотермических токов релаксации (IRC);

- измерение возвратного напряжения (RMV);
- измерение комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне ультранизких частот (ULF);
- метод измерения тока абсорбции при линейном или пошаговом увеличении напряжения [10, 11].

Для качественного анализа физико-химических явлений старения в такой сложной изоляционной структуре необходимо проводить измерение рассеяния в области ULF. Поэтому данная работа касается измерений комплексной диэлектрической проницаемости в главной изоляции машин ВН с разным временем эксплуатации и различным техническим состоянием.

Были исследованы образцы главной изоляции индуктивного двигателя 6 кВ, 200 кВт и генератора 15,75 кВ, 230 МВ·А. Старение их изоляции происходило в разных условиях. Новую, непосредственно после изготовления, обмотку двигателя 6 кВ обозначили как образец А. Она имела изоляцию эпоксид–слюда–стекло, выполненную по технологии VPI. Образцы Б и В были фрагментами обмотки, в которой произошло межвитковое короткое замыкание. После извлечения обмотки, выреза поврежденного места и препарирования часть, в которой температура короткого замыкания достигала 150...200 °С, обозначили как образец Б, фрагмент обмотки, в котором температура повысилась до 250...300 °С, – как образец В. Кроме того, измерения провели для изоляции двигателя 6 кВ после замены обмоток через 10 лет эксплуатации. Измерили также новые, предназначенные для монтажа, стержни для генератора 15,75 кВ и изоляцию генератора, проработавшего четыре года. Все исследованные изоляционные системы были выполнены по технологии VPI. В условиях эксплуатации проведены измерения тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ' в области частот 0,1 мГц...10 Гц с помощью системы ULFAS. В лабораторных условиях для образцов А, Б, В дополнительно определили эти параметры в диапазоне частот 20 Гц...1 МГц с помощью моста RLC 428 НР.

В последние годы для оценки качества изоляции стали применять метод пошагового увеличения напряжения [10]. Суть его состоит в том, что в тесте применяются пять шагов напряжением $\Delta U = 0,3U_N$ так, что оно постепенно возрастает от 0 до $1,5U_N$. Время действия первого напряжения – 10 мин, а следующих – по 5 мин (рис. 1). Во время действия первого напряжения ток утечки измеряется через 1; 5 и 10 мин и обозначается как i_{1M} ; i_{5M} ; i_{10M} . Измерив эти три величины, проводят компьютерные вычисления ожидаемых значений тока утечки, которые должны наблюдаться в 15; 20; 25 и 30 мин в предположении экспотенциального затухания тока во времени. Токи эти обозначили как i_{15} ; i_{20} ; i_{25} ; i_{30} . Они представляют величины токов для идеальной изоляции.

В конце 2-го; 3-го; 4-го и 5-го шагов напряжения измеряются токи утечки i_{15M} ($0,6U_N$); i_{20M} ($0,9U_N$); i_{25M} ($1,2U_N$); i_{30M} ($1,5U_N$). На основании предположения, что активное сопротивление идеальной изоляции не зависит от приложенного напряжения, а время шагов одинаково, величины токов i_{iC} можно вычислить из уравнений:

$$i_{15C} = i_{15} + i_{5M};$$

$$i_{20C} = i_{20} + i_{10M} + i_{5M};$$

$$i_{25C} = i_{25} + i_{15} + i_{10M} + i_{5M}; \quad (1)$$

$$i_{30C} = i_{30} + i_{20} + i_{15} + i_{10M} + i_{5M},$$

где i_{NM} – измеренный ток утечки; i_{NC} – расчетный ток.

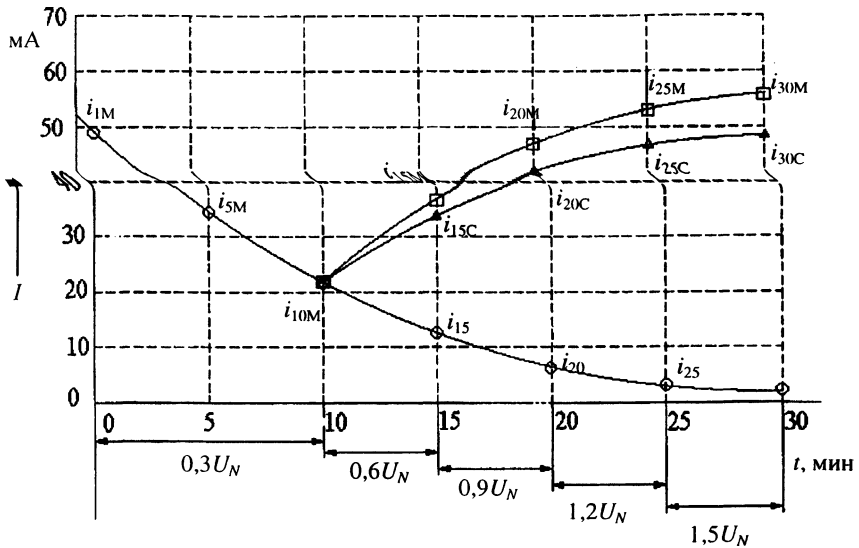


Рис. 1. Ток утечки и обозначения токов при разных шагах напряжения в тесте [10]

Вычисленные таким образом токи i_{NC} сравнивают с измеренными i_{15M} ; i_{20M} ; i_{25M} ; i_{30M} , которые для реальных изоляционных структур должны превышать вычисленные. Из рис. 1 можно получить следующие пропорции:

$$\frac{i_{15M}}{i_{15C}}; \frac{i_{20M}}{i_{20C}}; \frac{i_{25M}}{i_{25C}}; \frac{i_{30M}}{i_{30C}}. \quad (2)$$

Как критерий в оценке состояния изоляции применяется величина K_a , называемая коэффициентом абсорбции [10]:

$$K_a = \frac{i_{30M}}{i_{30C}}. \quad (3)$$

Коэффициент абсорбции K_a для новой изоляции высокого качества на основании эпоксидных смол должен быть меньше 2, для деградированной – даже до 5...7 [10]. Токи i_{15} ; i_{20} ; i_{25} ; i_{30} получены из аппроксимации кривых. Так как ток утечки не является идеально экспоненциальным, похожая аппроксимация выполняется и для остальных четырех шагов.

Нами получено, что для образца А (рис. 2а) $K_a = 0,88...1,09$, для Б (рис. 2б) $K_a = 4,7$ и для В (рис. 2в) $K_a = 1,16$. Эти результаты указывают на существенную разницу в оценке изоляции стержней, подвергнутых действию высокой температуры, по отношению к их первоначальному состоя-

нию. Исходя из полученных значений коэффициента K_a изоляцию образца Б следует считать деградированной в момент, когда образец В, подвергнутый воздействию высшей температуры, должен считаться хорошим. Эта очевидная ошибка в интерпретации качества изоляции на основании величин K_a будет обсуждаться ниже.

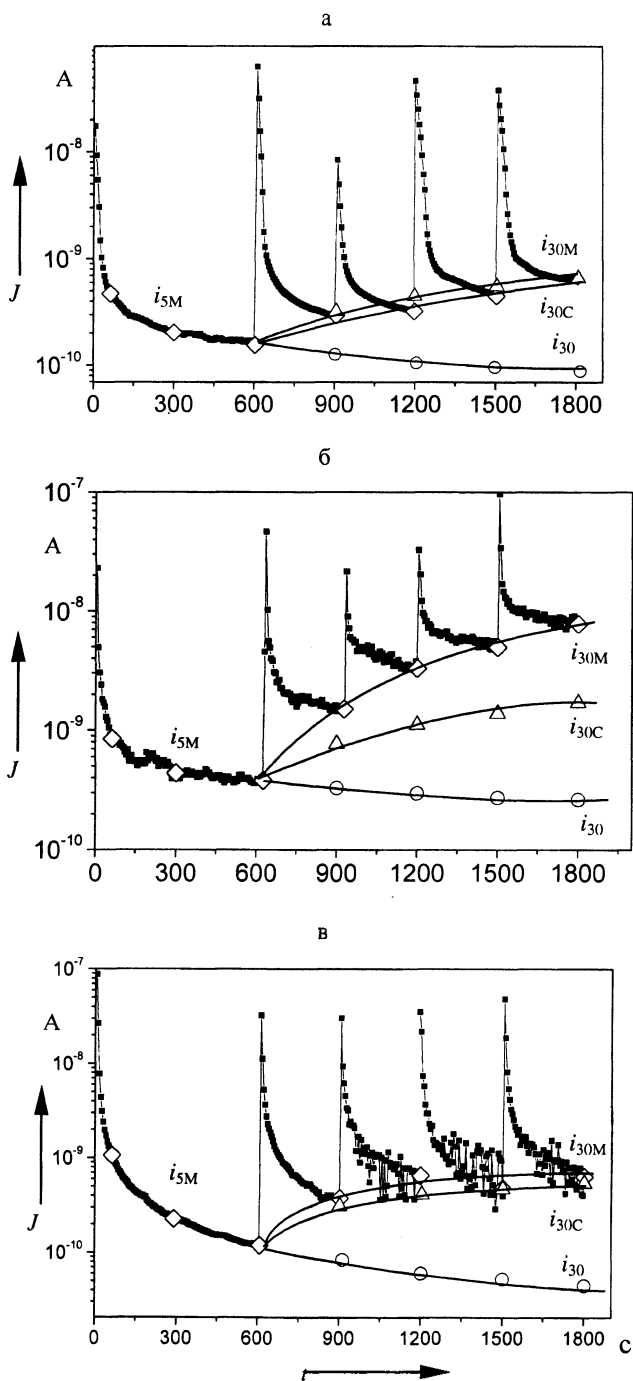


Рис. 2. Тест изоляции обмотки двигателя 6 кВ при пошаговом увеличении напряжения: а – новая обмотка (А); б – обмотка, изношенная при температуре 150...200 °С (Б); в – при температуре 250...350 °С (В)

Далее были проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 10^{-4} Гц...1 МГц. На рис. 3 приведены зависимости потерь ϵ'' от частоты f для образцов А, Б, В. Из их сравнения следует, что перегрев изоляции вызывает рост потерь, это общеизвестно. Зато менее очевидной является слабая зависимость от частоты измерений. Больше информации, касающейся влияния термического старения на структурные изменения и тем самым на релаксационные явления, можно получить с помощью частотного анализа диэлектрической проницаемости на основании зависимости $H-N$ [12]

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon' - j\epsilon'' = -j \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0 \omega} \right)^N + \frac{\Delta\epsilon}{(1 + (j\omega\tau)^\alpha)^\beta} + \epsilon_\infty, \quad (4)$$

где ϵ^* – комплексная диэлектрическая проницаемость; ϵ_∞ – диэлектрическая проницаемость для высоких частот; σ_0 – проводимость на постоянном токе; τ – время релаксации; α, β, N – постоянные; $\omega = 2\pi f$.

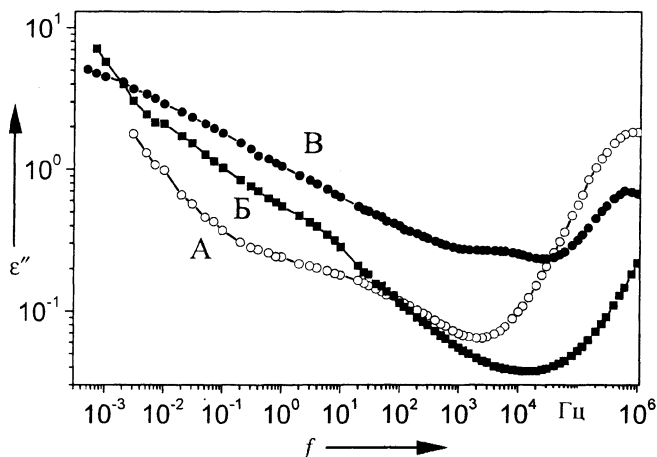


Рис. 3. Зависимости потерь ϵ'' от частоты f для образцов А, Б, В

Эта зависимость в графическом виде представлена на рис. 4. Из сравнения полученных зависимостей следует, что диапазон морфологических превращений в изоляции был очень большим. В общем можно констатировать, что в исследованном диапазоне частот 0,1 мГц...1 МГц наблюдается релаксация трех главных структур. Это можно представить (при условии, что $\beta = 1$) в форме.

$$\epsilon^*(\omega) = \sum_{k=1}^3 \left(\epsilon_{\infty k} + \frac{\Delta\epsilon_k}{(1 - i\omega\tau_k)^\alpha} \right) + \left(\frac{\sigma_0}{C_0 \omega} \right)^N. \quad (5)$$

Полученные из аппроксимации уравнения (5) параметры (табл. 1) указывают на наличие во всех образцах низкочастотной релаксации с посто-

янной времени τ_1 около $10^4 \dots 10^5$ с и расширяющимся при старении распределением собственных времен, на что указывает уменьшение величины α_1 . Как нам кажется, эта поляризация связана с расширением пространственного гетерозаряда на границе фаз наполнитель–полимер.

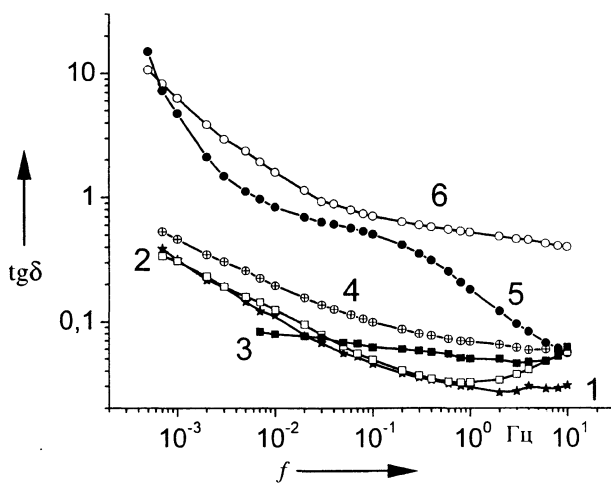


Рис. 4. Зависимости коэффициента потерь $\text{tg}\delta$ от частоты f в изоляции двигателя 6 кВ: 1 – новая обмотка; 2 – двигатель после замены обмоток; 3 – двигатель после 10 лет эксплуатации в мягких условиях; 4, 5, 6 – двигатель после 6, 10 и 15 лет работы в тяжелых условиях

Таблица 1

Параметры уравнения (5) для образцов А, Б, В

	$\Delta\epsilon_1$	$\tau_1, \text{с}$	α_1	$\Delta\epsilon_2$	$\tau_2, \text{с}$	α_2	$\Delta\epsilon_3$	$\tau_3, \text{с}$	α_3
А	98	$6,4 \cdot 10^4$	0,68	1,16	$8,2 \cdot 10^{-2}$	0,42	4,48	$2,3 \cdot 10^{-7}$	0,94
Б	36	$1 \cdot 10^5$	0,37	2,0	16,1	0,44	3,1	$6,3 \cdot 10^{-7}$	0,73
В	67	$1 \cdot 10^5$	0,29	0,29	$3 \cdot 10^{-5}$	0,78	1,49	$2,6 \cdot 10^{-7}$	0,96

Температуры, превышающие пункт фазовой перемены T_g , могут раскрывать насыщенные связи групп и вызывать переходные химические реакции, ведущие к возникновению структур с временем релаксации ряда $10 \dots 100$ с (рост τ_2 для образца Б до 16,1 с). Действие высокой температуры короткого замыкания (образец В) вызвало дальнейшее преобразование в направлении структур быстро и медленно релаксирующих. Интересным фактом является практически неизменное время дипольной релаксации в области частот $10^6 \dots 10^7$ Гц, которая, как нам кажется, касается боковых групп цепи смолы. Снижение поляризации $\Delta\epsilon_3$ и относительно постоянная величина коэффициента α_3 свидетельствуют о количественном уменьшении боковых групп во время действия высокой температуры, а также о перестройке их в структуры с большим временем релаксации.

Выводы, следующие из анализа диэлектрической релаксации, были проверены измерениями сканирующей калориметрии (DSC). Они показали, что температура стеклования смолы T_g в новой изоляции (А) равняется $114,4$ °С, а в случае перегретой изоляции (Б и В) наступает ее понижение до величин соответственно $80,4$ и $77,9$ °С. Отмечены также рост теплоем-

кости C_v , от величины $2,7 \cdot 10^{-3}$ J/g-deg для образца А до $9,3 \cdot 10^{-3}$ J/g-deg (Б), и следующее понижение до величины $5,7 \cdot 10^{-3}$ J/g-deg (В). Значительное понижение величины T_g указывает на то, что под влиянием температуры наступил процесс химических перемен и термической деградации в главной цепи матрицы. В образце Б в результате деградации возникла структура с большой плотностью пространственной упаковки, о чем свидетельствует рост C_v по сравнению с образцом А, что, как правило, отвечает меньшей поляризации ($\Delta\epsilon_1 = 36$). В свою очередь, вследствие действия высоких температур (образец В) структура смолы распалась на более свободные макромолекулы, составляющие аморфную фазу с большим содержанием свободного пространства с поляризацией пространственного заряда (понижение по отношению к образцу Б величины C_v и $\Delta\epsilon_1$). Рост пространственного заряда в релаксационных явлениях подчеркивает полученное уменьшение ионной проводимости в области ULF, о чем свидетельствуют изменения величины N , входящей в формулу (5): от $N = 1$ – для образцов А и Б до $N = 0,59$ – для образца В. Сходство результатов измерений T_g методом DSC и диэлектрической релаксации подтверждает, что образец В подвергся большей деградации, чем образец Б. Это значит, что метод определения качества изоляции на основании коэффициента абсорбции K_a не всегда дает правильную оценку ее состояния, особенно при воздействии на изоляцию температур, выше T_g .

Общее правило уменьшения концентрации полярных групп в полимерной матрице как следствие долговременного термического воздействия ниже пункта T_g нашло подтверждение при сравнении диэлектрических свойств главной изоляции двух двигателей 6 кВ, 200 кВт – новой и после 10 лет эксплуатации (рис. 4, 5, кривые 1, 2, 3). Как и для ранее измеренных образцов, были выполнены аппроксимации по формуле (4).

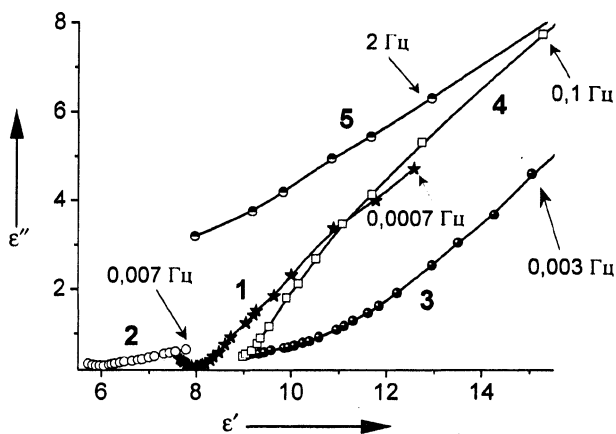


Рис. 5. Зависимость для изоляции двигателя 6 кВ с разным временем эксплуатации: 1 – новая обмотка; 2 – двигатель после 10 лет эксплуатации в мягких условиях; 3, 4, 5 – двигатель после 6, 10 и 15 лет работы в тяжелых условиях

Величины коэффициентов аппроксимации представлены в табл. 2. На основании рис. 4, 5 можно утверждать, что новая главная изоляция двигателя для частот ниже 0,1 Гц имеет большие диэлектрические потери по сравне-

нию с изоляцией эксплуатировавшегося двигателя. Ниже 0,8 Гц обнаруживается большая релаксационная структура, связанная с поляризацией на границе фаз. Измерения показали, что в работавшей 10 лет изоляции наступило, прежде всего, понижение емкости (меньшая действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости) при небольшом росте коэффициента потерь $\text{tg}\delta$ в диапазоне частот 0,1...10 Гц. Отмечено также перемещение минимума потерь с 0,8 Гц для новой изоляции до 6 Гц – для работавшей.

Таблица 2

Параметры формулы (4) для изоляции двигателей и генераторов ВН

Параметр	Двигатель 6 кВ, 200 кВт		Генератор 15,75 кВ, 230 МВ·А	
	Новая обмотка	10 лет эксплуатации	Новая обмотка	4 года эксплуатации
$\sigma_0, \text{S/cm}$	$1e - 20$	$5e - 17$	$5e - 16$	$5e - 16$
N	0,1	0,64	0,89	1,0
$\Delta\epsilon$	46	8,03	2,02	1,62
$\tau, \text{с}$	$1,3e + 4$	$1,7e + 3$	820	820
ϵ_i	8,01	4,9	4,05	3,88
α	0,66	0,22	0,47	0,43
β	1,0	1,0	1,0	1,0

Место установки этого двигателя (насос вентилятора наддува воздуха в котел) указывает, что он работал в относительно мягких условиях. Из практики эксплуатации следует, что температура его работы составляла около 50...60 °С в зависимости от времени года, т. е. ниже T_g . Анализ параметров табл. 2 указывает, что долговременное воздействие этой температуры вызвало, прежде всего, сокращение времени низкочастотной релаксации и меньшую поляризацию. Отмечены также рост постоянной проводимости тока на три порядка и рост величины коэффициента N от 0,1 до 0,64. Эти данные свидетельствуют о том, что, кроме физических процессов, касающихся уменьшения свободных пространств в матрице, выступают также химические реакции и преобразование боковых групп главной цепи смолы в неполярные и насыщенные молекулярные структуры. Изменения в $\Delta\epsilon$ (от 46 до 8,03) и времени релаксации (от $1,3e4$ до $1,7e3$ с) подтверждают, что в матрице произошли также очень большие изменения. Уменьшение коэффициента α указывает на то, что в итоге этого процесса возникли разные макромолекулярные структуры различной величины и с широким распределением времени поляризации. Отметим, что в этой релаксации вероятным является участие низкочастотного рассеяния. Полученные зависимости характерны для термического старения при температурах значительно более низких, чем температура стеклования T_g . Исследования на моделях изоляции показали, что перемещение зависимости в сторону меньших величин ϵ' диэлектрической проницаемости, а также снижение потерь в диапазоне ULF являются типичными для раннего периода старе-

ния, который характеризуется в основном физическими процессами стабилизации физико-химических свойств и улучшением механических параметров [13].

Измеренные характеристики изоляции генератора (рис. 6) указывают на большое сходство с соответствующими зависимостями, полученными для двигателей. Короткий срок эксплуатации и низкая температура (около 45...50 °С) вызвали небольшие изменения структуры матрицы и соответственно меньшее изменение характеристик. Параметры аппроксимации, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что релаксация в изоляции происходит практически по зависимости и вероятно касается пространственного заряда на границах фаз. Во время эксплуатации изменилась только поляризация $\Delta\epsilon$, и ϵ_1 указывает на морфологические изменения в междофазе, вызванные прежде всего реакцией свободных пространств в изоляции.

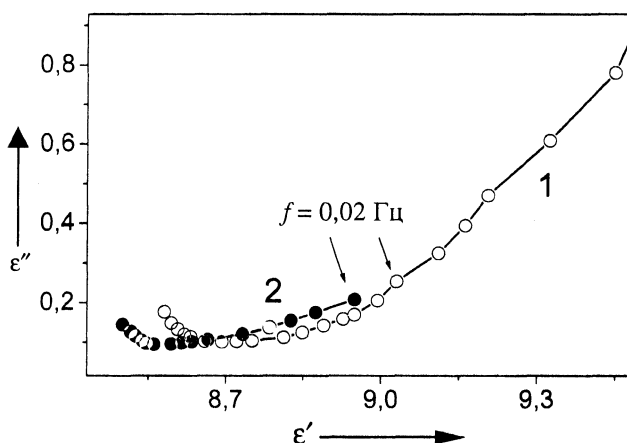


Рис. 6. Зависимость для изоляции генератора 15,75 кВ, 270 МВ·А:
1 – нового; 2 – после четырех лет эксплуатации

На рис. 4, 5 показаны зависимости для трех двигателей, эксплуатировавшихся в тяжелых условиях – как приводы водяных насосов системы охлаждения турбоагрегата. Частые пуски при полной нагрузке приводили к временному перегреву изоляции выше 130 °С, т. е. выше T_g . В результате деградационных процессов получены характеристики диэлектрической релаксации, похожие на соответствующие для образца В. Значительное повышение диэлектрических потерь и проницаемости обычно наступает одновременно с далеко продвинутой деградацией междофазы полимер–стеклянное волокно, полимер–слануда и потерей требуемых механических свойств, что способствует развитию электрического пробоя вдоль границы.

ВЫВОДЫ

1. На основании приведенных в работе данных, а также ранее полученных исследований [13] можно заключить, что частотные изменения потерь в изоляции являются чувствительным диагностическим методом в диапазоне от 10^{-4} Гц до 1 МГц. На основании результатов измерений в диапазоне

низких частот (ниже 10 Гц) можно оценить изменения характера проводимости, а также релаксации пространственного заряда на границе фаз. Диапазон высоких частот (выше 10 кГц) позволяет оценить структурные изменения в полимерной матрице.

2. В эксплуатационных исследованиях получено подтверждение наблюдавшихся явлений диэлектрической релаксации на изоляции в установках ВН, подвергнутых старению в условиях повышенных температур и высоких электрических напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Das-Gupta D. K., Scarpa P. C. N. Polarization and Dielectric Behaviour of aged Polyethylene // IEEE Trans. on Dielect. Elec. Insulation. – 1996. – Vol. 3, № 3. – P. 366–374.

2. Li H. M., Fouracre R. A., Crichton B. H. Transient Current Measurement for the Detection of Water Tree Growth in Polymeric Power Cables // IEEE Trans. on Dielect. Elec. Insulation. – 1995. – Vol. 2, № 5. – P. 866–874.

3. Seifert J. M., Stietzel U., Kärner H. C. The ageing of Composite Insulating Materials – New possibilities to detect and to classify ageing phenomena with dielectric diagnosis tools // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – Virginia, USA, 1998. – P. 373–377.

4. V. der Houhanessian, Zaengl W. S. On-site diagnosis of power transformers by means of relaxation current measurements // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – Virginia, USA, 1998. – P. 28–34.

5. Schrijver C. Optimierung der elektrischen Eigenschaften glass-faserverstärkter Kunststoffe: Thesis. – TU Braunschweig, 1998.

6. Karpowicz A., Matysiak I. Układ izolacyjny stosowany w generatorach produkcji ABB Dolmel Ltd // Materiały i układy elektroizolacyjne w przemyśle elektrotechnicznym: III Seminarium Techniczne. – Jaszowiec, 1996. – P. 107–113.

7. Rogowicz C. Impregnacja próżniowo-ciśnieniowa uzwojeń VPI // Materiały i układy elektroizolacyjne w przemyśle elektrotechnicznym: III Seminarium Techniczne. – Jaszowiec, 1996. – P. 115–119.

8. Kerner E. H. Proc. Phys. Soc. – 1956. – B69, 808.

9. Subocz J. Przewodnictwo elektryczne w silnie naprężonych mechanicznie kompozytach poliestrowych // Postępy w Elektrotechnologii. – Szklarska Poręba, 1994. – P. 201–206.

10. Ban D., Cettolo M., Miletic B. Electrical Motor Insulation Conditions dc Testing // IEEE Trans. DEI – 1998. – Vol. 5, № 6. – P. 917–921.

11. Rux L., McDermid W. Assessing the Condition of Hydrogenerator Stator Winding Insulation Using the Ramped High Direct-Voltage Test Method // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17, № 6. – P. 27–33.

12. Havriliak S. Jr., Havriliak S. J. Dielectric and Mechanical Relaxation in Materials: Analysis, Interpretation and Application to Polymers. – Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, 1997.

13. Subocz J. Relaxation spectroscopy in generators winding insulation. – Przegląd Elektrotechniczny. – Special Issue, rok LXXVII, 2001. – P. 314–317.

Поступила 21.10.2002