

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ ИМПУЛЬСОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ

А.В.Беспрозванных, докт. техн. наук,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина.

Геометрические параметры и число воздушных включений в твердой изоляции определяются на основе решения уравнения Вольтерра только в случае монотонного изменения дифференциальных амплитудных спектров (ДАС) импульсов частичных разрядов. В противном случае определяются усредненные параметры воздушных включений. Оценка качества твердой изоляции осуществляется путем представления совокупности ДАС в двойном логарифмическом масштабе. Сравнение семейств ДАС выполняется по ширине полосы спектров частичных разрядов без математической обработки. Библ. 13, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: частичные разряды, твердая изоляция, дифференциальные амплитудные спектры.

Введение. Наиболее типичными дефектами твердой изоляции являются воздушные включения и дендриты [1,5–8,10]. Включения носят локальный характер, имеют относительно небольшую толщину x в направлении силовых линий электрического поля, зато большую площадь S_x в направлении, поперечном действию поля. Дендриты – наоборот, сильно вытянуты вдоль поля при весьма малом сечении в поперечном направлении. Включения представляют меньшую опасность для изоляции, однако, они могут дать начало образованию дендритов. Поэтому целью испытаний твердой изоляции обычно является выявление наличия в ней включений, а в идеальном случае также определение их толщины, разрядной площади, количества и мест расположения. Это позволяет удалить дефект (участок кабеля, конденсаторную секцию, обмотку), выявить природу и предотвратить в дальнейшем образование подобных включений.

Включения, которые могут инициировать развитие дендритов, выявляются путем возбуждения в них частичных разрядов (ЧР). Частичные разряды представляют собой пробои включений, возникающие при подаче испытательных напряжений. Обнаруживаются ЧР по возникновению в электрической цепи коротких электрических импульсов (длительностью около 1 мкс и менее) амплитудой единицы – десятки микровольт. Заметить импульсы ЧР на фоне испытательного напряжения диапазона киловольт и выше достаточно сложно. Оборудование для контроля ЧР в кабелях стоит от 400 до 800 тыс. долларов [9]. И при этом оно выполняет только функции индикации наличия опасных включений и локализации места их расположения по длине кабеля. Испытания выполняются при одном значении испытательного напряжения, что не позволяет определять размеры включений.

Так как воздушные включения в толще твердой изоляции являются статическими дефектами, то при ступенчатом подъеме испытательного напряжения они полностью активизируются как по толщине, так и по площади. Это позволяет полностью оценить степень их опасности.

Методика определения параметров включений путем выполнения измерений ЧР при нескольких значениях испытательного напряжения (путем *сканирования* по напряжению) выдвинута давно. Одна из первых работ в этом направлении – пионерская работа Хирабаяши [12]. Она была предназначена для диагностики твердой изоляции электрических машин, получила практическое подтверждение на модельных объектах с полыми стеклянными шариками [11], применена для диагностики тонкослойной конденсаторной изоляции [2,4].

Алгоритм определения геометрических размеров воздушных включений. Процедура определения размеров включений по характеристикам ЧР сводится к следующим действиям.

1. Для каждого значения испытательного напряжения (обычно в диапазоне от напряжения начала ЧР $U=U_0$ до $U=(1,5-2)U_0$) измеряются гистограммы распределения импульсов ЧР по амплитуде – так называемые *дифференциальные амплитудные спектры* (ДАС) ЧР.

2. Рассчитывается функция распределения включений по электрическим параметрам – напряжению зажигания и амплитуде – $\psi(U_{ipd}, q)$.

Для этого решается ряд интегральных уравнения Вольтерра вида

$$n(U) = 2fN_0 \int_{U_0}^U \left(2\frac{U}{U_i} - 1\right) \cdot \psi(U_i, q) \cdot dU_i, \quad (1)$$

где U_i – текущее напряжение начала ЧР; U_0 – минимальное напряжение начала ЧР; N_0 – общее число включений; f – частота испытательного напряжения; $n(U)$ – число ЧР за секунду с амплитудой, соответствующей выбранному каналу q амплитудного дискриминатора.

При этом предполагается, что между числом частичных разрядов за полупериод $n_{T/2}$ и приложенным напряжением существует прямая пропорциональная зависимость

$$n_{T/2} = 2U/U_i - 1. \quad (2)$$

Число ЧР за 1 секунду принимается в $2f$ раз большим, из-за чего в (1) появляется соответствующий множитель. Физический смысл выражения вида $N_0 \psi(U_i, q) dU_i$ – это число включений, напряжение зажигания которых лежит в интервале от U_i до $U_i + dU_i$ (амплитуда ЧР при этом соответствует каналу q амплитудного дискриминатора).

3. Рассчитывается функция распределения включений по геометрическим параметрам – толщине и разрядной площади – $\varphi(x, S_x)$. Для этого используется очевидная связь этой функции распределения с предыдущей

$$\varphi(x, S_x) dx dS_x = \psi(U, q) dU dq, \quad (3)$$

где dx – прирост размеров активных включений при росте испытательного напряжения на dU ; dq – прирост кажущейся амплитуды ЧР при росте разрядной площади на dS_x .

При этом предполагается, что падение напряжения на воздушном включении толщиной $x \ll h$ (толщина изоляции) составляет [1]

$$U_x = U \frac{\varepsilon x}{h + (\varepsilon - 1)x}, \quad (4)$$

где U – приложенное напряжение; ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Если падение напряжения на включении достигнет пробивного напряжения воздуха $U_{xbr}(x)$ в соответствии с эмпирическим законом Пашена, то воздушное включение пробьется. Точки пересечения кривых $U_x(x)$ и $U_{xbr}(x)$ определяют диапазон размеров включений от x_1 до x_2 , в которых вспыхивают ЧР. По мере увеличения напряжения ЧР охватывают все больший диапазон размеров включений. При этом суммарная частота ЧР увеличивается как за счет роста частоты ЧР в «старых» включениях, активизированных на предыдущих ступенях испытательного напряжения, так и за счет «новых» включений, активизированных при очередном подъеме напряжения. Наблюдая за ростом частоты ЧР при подъеме напряжения, можно оценить количество «новых» включений.

Между кажущейся амплитудой ЧР во включении и его разрядной площадью существует функциональная связь

$$q = U_{xbr} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_x}{h - x}. \quad (5)$$

Следовательно, напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с (4), а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании (5). Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными.

Как видно, интерпретация с целью определения геометрических параметров включений семейств ДАС, полученных при сканировании напряжения, опирается на ряд допущений (1)–(5). От степени их выполнения в каждом конкретном случае зависит правильность определения геометрических размеров.

Цель статьи – способы представления ДАС, полученных при измерении характеристик частичных разрядов, для определения параметров воздушных включений и оценки качества твердой изоляции.

Дифференциальные амплитудные спектры импульсов ЧР.

В исходном виде дифференциальные амплитудные спектры ЧР представляют собой таблицы чисел. Они представляются рядом способов: в виде линий уровня (рис. 1), в виде гистограмм, т.е. в виде частот появления импульсов данной амплитуды, в полулогарифмическом (рис. 2, а) и двойном логарифмическом (рис. 2, б) масштабе с совмещением спектров соответственно.

Каждый из способов имеет свои преимущества, но существенные различия видны при любом способе представления.

На ДАС, представленным в виде линий уровня (рис. 1, а – до сушки, рис. 1, б – после сушки), виден общий характер анализируемых данных. Извилистые линии связаны с недостаточным временем накопления информации, из-за чего не происходит естественного усреднения стохастических

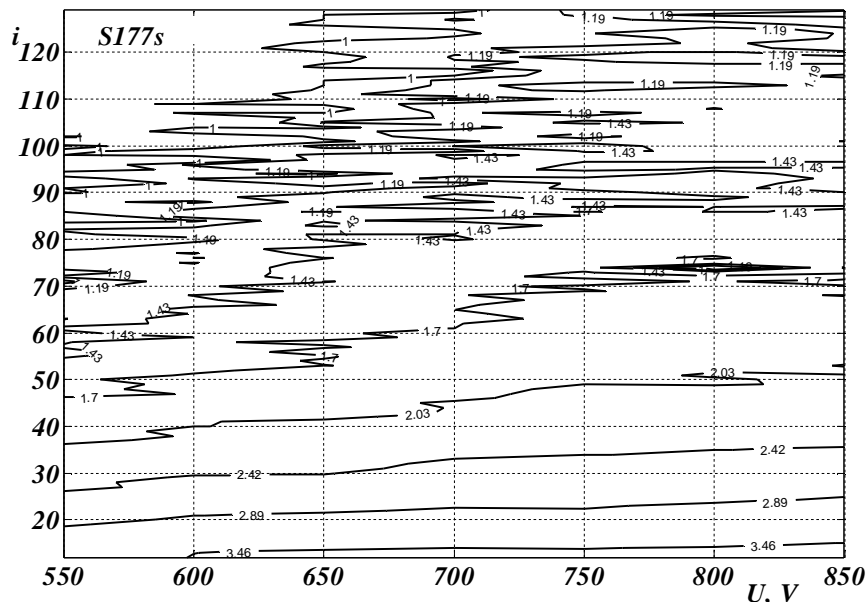
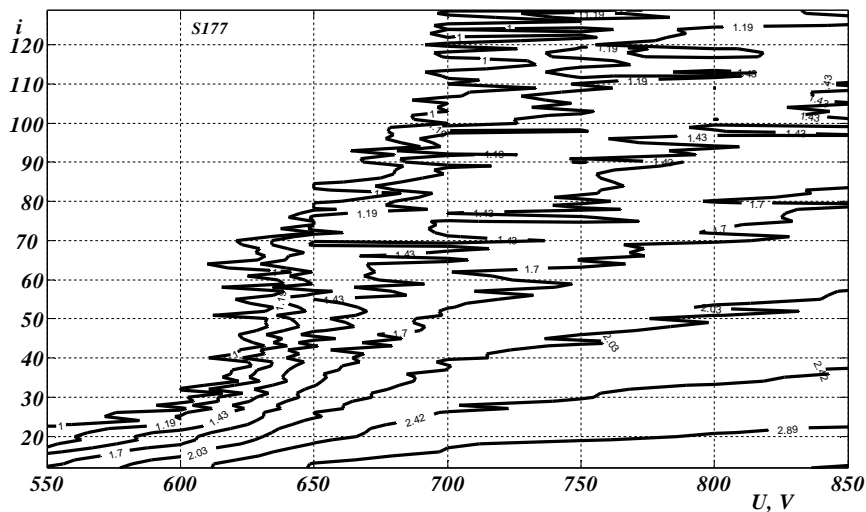


Рис. 1, а, б

данных и подавления шумов. Только начиная с уровня 2,03 (число импульсов ЧР свыше 100), линии становятся относительно гладкими. При времени накопления данных 12,8 с частота ЧР составляет $100/12,8 \approx 8$ Гц. Так как при снятии ДАС с помощью многоканального анализатора АИ-1024-95 фиксируются только импульсы ЧР одной полярности (положительной), полная частота ЧР составляет 16 Гц. Это означает, что устойчивые характеристики ЧР наблюдаются уже при их частоте около 20 Гц и выше (а не при 100 Гц, как указано в [2]). Другими словами, достаточно, чтобы ЧР во включении возникали не каждый полупериод (тогда частота их составляет 100 Гц), а хотя бы один раз за 5 полупериодов (тогда их частота составляет именно 20 Гц). В противном случае следует увеличить время τ накопления информации. Если принять τ не 12,8 с, как при получении ДАС на рис. 1, 2, а в 2 раза большим, т.е. 25,6 с, то общее чистое время одного обследования при 8 уровнях испытательного напряжения

составит: $8 \cdot 25,6 = 204,8 \approx 3$ мин. С учетом времени подъема напряжения на очередную ступень это будет около 5–6 мин. Как показывает опыт, при таких больших временах обследования начинают проявляться эффекты затухания ЧР, например, из-за увеличения давления в замкнутых включениях, не соединенных с атмосферой. Со временем давление во включениях падает, и ЧР возобновляются с

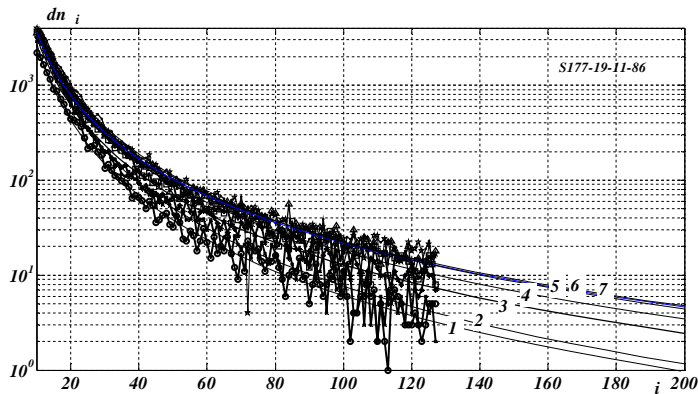
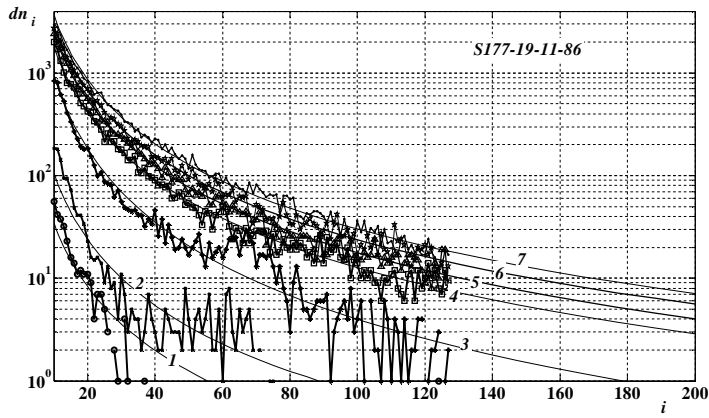


Рис. 2, а, б

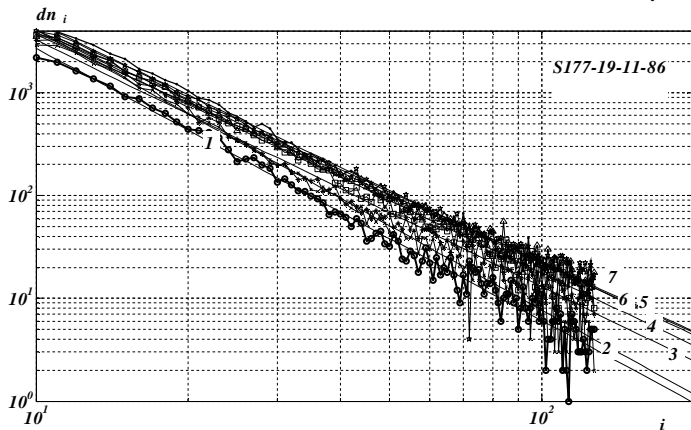
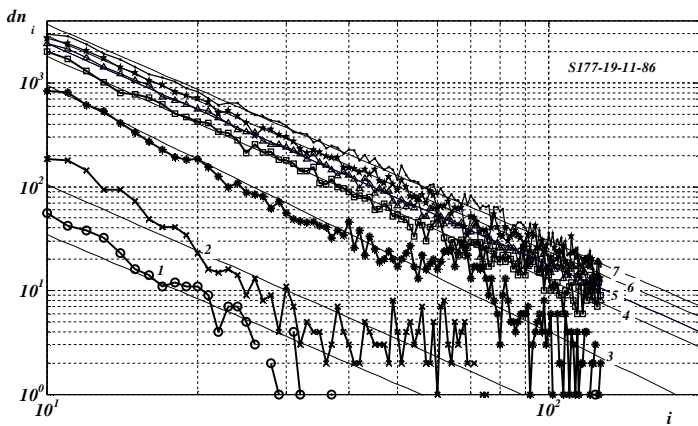


Рис. 2, в, г

прежней частотой. Сказанное приводит к возникновению медленных флуктуаций частоты ЧР, тем более заметных, чем длиннее интервал наблюдения [3]. Подобные флуктуации параметра, амплитуда которых нарастает с увеличением времени наблюдения, называются *фликкер-шумами*. Указанный выше механизм возникновения фликкер-шумов не является единственным. Другие механизмы, вероятно, связаны с накоплением и рекомбинацией поверхностных и объемных зарядов, периодическими изменениями поверхностной проводимости, ионизирующим действием космических лучей и др. Таким образом, общей природой возникновения фликкер-шумов должен быть некий механизм «памяти». Таких элементов «памяти» в диэлектриках более чем достаточно, так как они обладают исключительно высоким объемным и поверхностным сопротивлением, электретным эффектом, сложной сетью микро- и макровключений, частично связанных между собой, дефектами структуры химической, физической и технологической природы. Для уменьшения дисперсии характеристик ЧР время наблюдения должно быть ограниченным. Неизбежные при этом высокочастотные флуктуации частоты ЧР большой амплитуды следует сглаживать, используя другое представление ДАС, например, в форме рис. 2. Спектры сняты при коэффициенте усиления широкополосного усилителя $K_y=100 \times 10$; времени накопления информации $\tau=12,8$ с и напряжении: 1 – 550 В; 2 – 600 В; 3 – 650 В; 4 – 700 В; 5 – 750 В; 6 – 800 В; 7 – 850 В.

Вогнутый характер гистограмм рис. 2, (а – до сушки, рис. 2, б – после сушки) можно представить как результат наложения множества экспоненциальных распределений, каждое из которых связано с включениями определенных размеров и, возможно, разной природы возникновения (остаточные, подпрессовочные, усадочные и др.).

Более конструктивным подходом является учет особенностей ДАС, которые выявляются в двойном логарифмическом масштабе: они спрямляются (рис. 2, в – до сушки, рис. 2, г – после сушки). Следовательно, ДАС описываются степенными функциями вида $\Delta n_i = 10^{p(2)} i^{p(1)}$, или после логарифмирования – полиномом

первого порядка

$$\lg(\Delta n_i) = p(1)\lg(i) + p(2) \quad , \quad (6)$$

где $p(1)$ – угловой коэффициент, $p(2)$ – параметр сдвига.

При этом оказывается, что если параметр сдвига с ростом приложенного напряжения меняется монотонно, то на основании решения интегрального уравнения Вольтерра (1) можно определить функции распределения электрических характеристик включений в твердой изоляции (рис. 3, а – до сушки), а на основании (3) – функции распределения геометрических характеристик включений (рис. 3, б – после сушки).

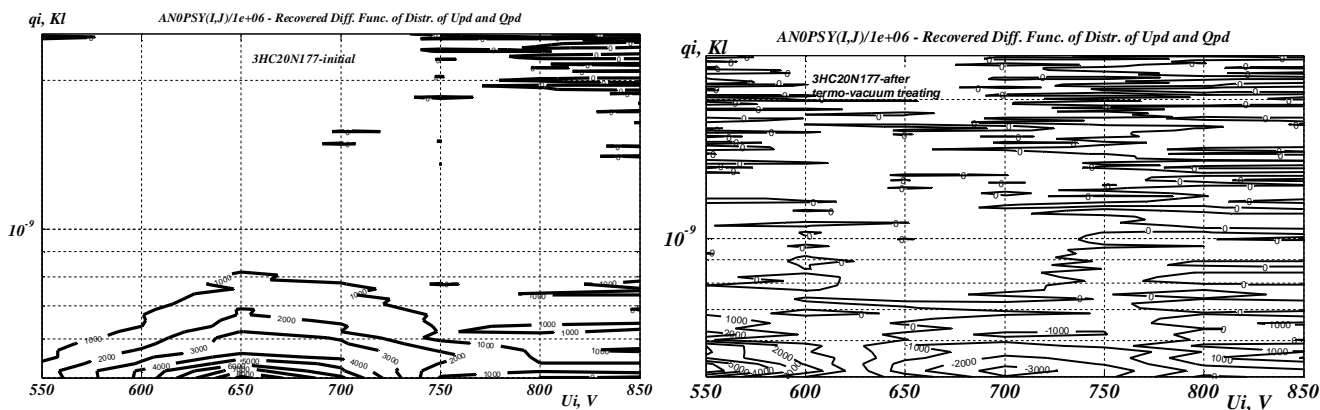


Рис. 3, а, б

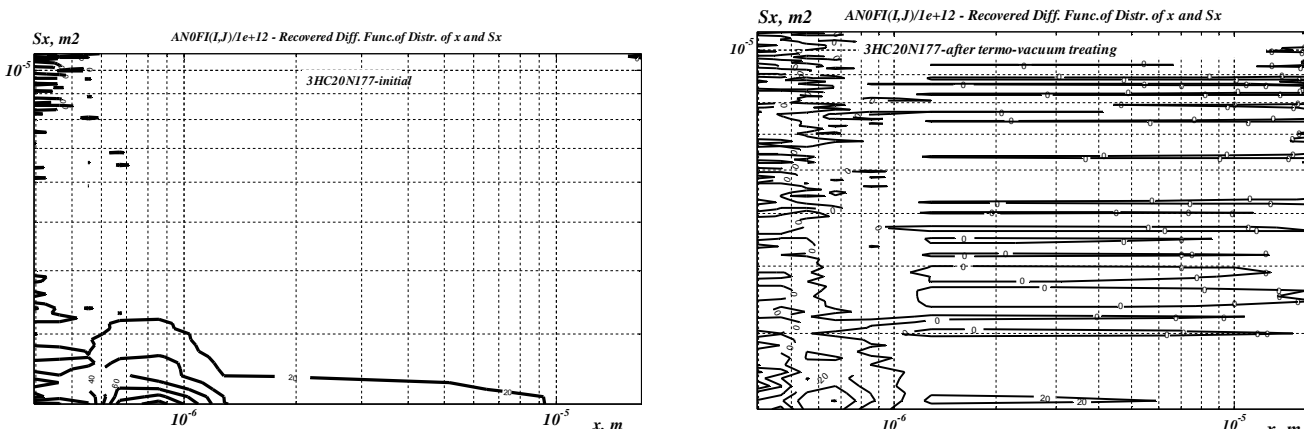


Рис. 3, в, г

Если параметр сдвига с ростом приложенного напряжения меняется немонотонно при монотонном изменении суммарного числа ЧР с ростом приложенного напряжения, то определить параметры воздушных включений в таком случае не представляется возможным.

В таблице, где приведены угловые коэффициенты ($p(1)$) и параметры сдвига ($p(2)$) аппроксимирующих полиномов первого порядка для ДАС, построенных в двойном логарифмическом масштабе, и на рис. 4 показана такая ситуация. Как видно, угловые коэффициенты почти постоянны – (2,1–2,4), а параметр сдвига растет с ростом напряжения.

U, В	В исходном состоянии		После сушки	
	$p(1)$	$p(2)$	$p(1)$	$p(2)$
550	-2,06	3,60	-2,40	5,91
600	-2,14	4,16	-2,34	5,93
650	-2,38	5,36	-2,23	5,80
700	-2,15	5,41	-2,26	5,87
750	-2,14	5,53	-2,33	6,02
800	-2,08	5,53	-2,40	5,91
850	-2,09	5,65	-2,34	5,93

Для данных рис. 4, а, позиция 2, параметр сдвига меняется с ростом напряжения немонотонно. В то же время суммарное число ЧР растет с ростом напряжения монотонно – рис. 4, б, позиции 1, 2 (кривая 1 – в исходном состоянии, кри-

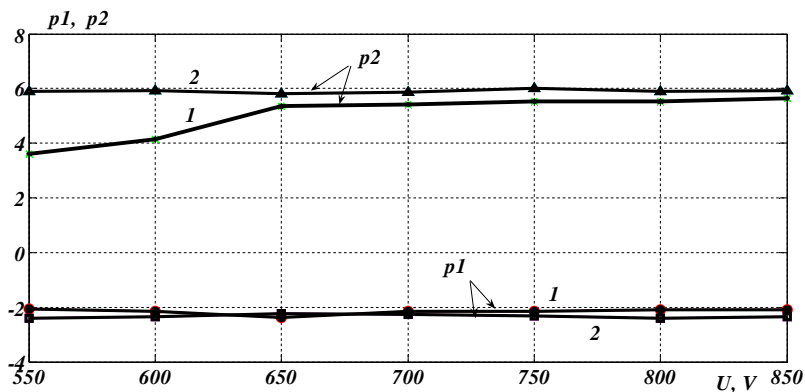


Рис. 4, а

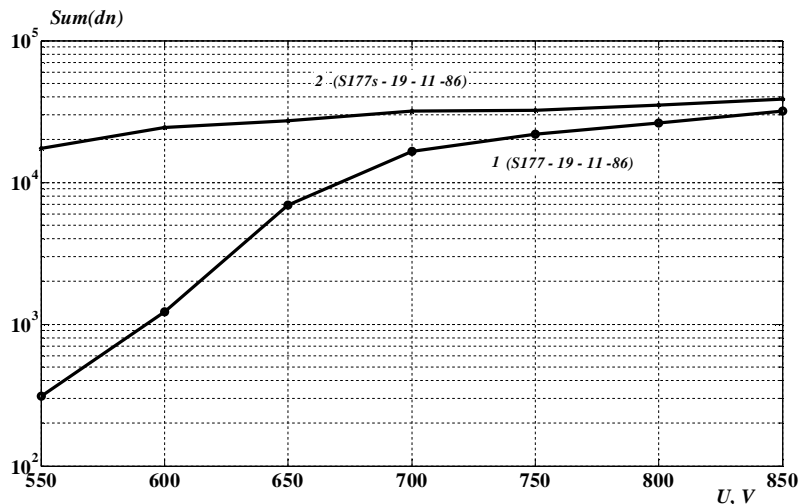


Рис. 4, б

прирост числа ЧР относительно небольшой. Следовательно, доля мелких включений практически не изменяется.

На фото (рис. 5: а – широкие спектры (изоляция с меньшим количеством включений), б – узкие спектры (изоляция с большим количеством включений)) приводятся примеры ДАС ряда одно-

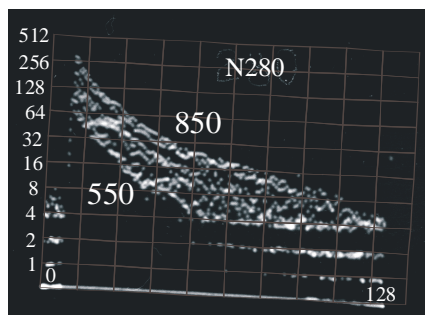
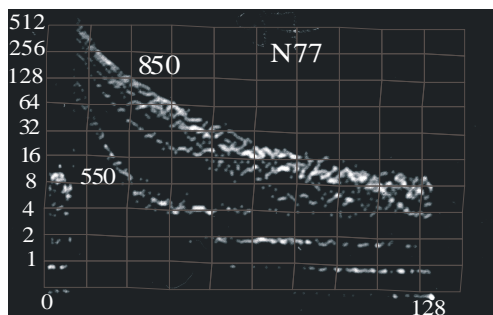


Рис. 5, а

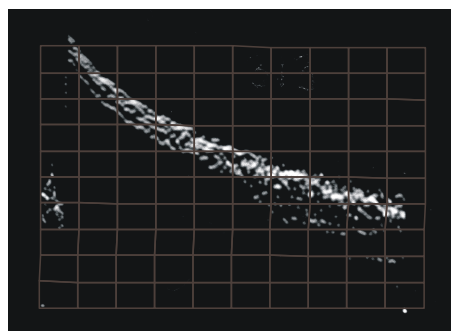
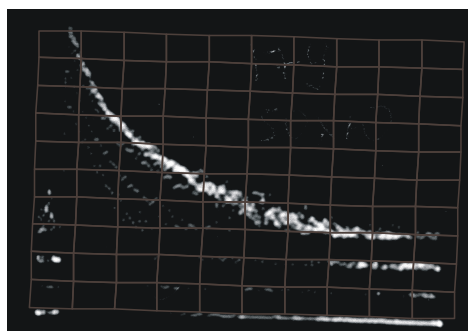


Рис. 5, б

вая 2 – после сушки). Поэтому усредненные характеристики включений – толщина и разрядная площадь – находятся по зависимости от напряжения суммарного числа ЧР. Но дифференциальные характеристики в этом случае найти затруднительно.

В таких ситуациях работоспособным является метод сравнительного анализа по ДАС, построенный в логарифмическом масштабе: широкому семейству ДАС, подобному рис. 2, в, соответствует изоляция более высокого качества; узким, подобным рис. 2, г, наоборот, – низкого качества (с большим содержанием воздушных включений). После сушки доля крупных включений в толще изоляции увеличивается, возможно, из-за расслаивания диэлектрика за счет быстрого испарения адсорбированной влаги. Поэтому уже при начальном напряжении (550 В) активизируются крупные включения. При дальнейшем подъеме напряжения

типных секций, по которым выделяются изделия, содержащие большее количество грубых дефектов (рис. 5, б). Их активизация идет при низких испытательных напряжениях, из-за чего дальнейшее повышение напряжения уже не приводит к сильным изменениям ДАС, и семейство спектров выглядит узким. Дефектные изделия сразу обнаруживаются на дисплее амплитудного анализатора импульсов, минуя математическую обработку [13].

Выводы.

Измерение амплитудных характеристик импульсов ЧР при варьировании испытательного напряжения от $U_{нчр}$ до $(1,5-2)U_{нчр}$ (сканирование по напряжению) позволяет определить параметры воздушных включений в изоляции – их толщины, разрядные площади, количество. Для этого необходимо, чтобы дифференциальные амплитудные спектры импульсов ЧР менялись монотонно с ростом испытательного напряжения: приращение числа импульсов ЧР по всем каналам должно быть положительным.

В случае если ДАС с ростом напряжения изменяются немонотонно, алгоритм восстановления параметров включений, основанный на решении интегрального уравнения Вольтерра (1), оказывается неработоспособным. Для таких ситуаций предлагается рассматривать совокупности ДАС в двойном логарифмическом масштабе, подобном рис. 2, в, г, в котором происходит их спрямление.

Сравнение семейств ДАС выполняется по ширине полосы спектров, причем более высокому качеству диэлектрика (с меньшим количеством воздушных включений) соответствуют более широкие полосы спектров.

1. *Кучинский Г.С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1979. – 224 с.
Kuchinskii G.S. Partial dischargers in high-voltage designs. – Leningrad: Energia, Leningradskoe otdelenie, 1979. – 224 p. (Rus.)
2. *Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я.* Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 5–9.
Naboka B.G., Besprozvannykh A.V., Gladchenko V.Ya. Diagnostics of high-voltage isolation with the help multichannel analyzer // Elektrichestvo. – 1991. – №5. – P. 5–9. (Rus.)
3. *Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я.* Медленные процессы в твердом диэлектрике и оптимальная температура полимеризации // Электричество. – 2003. – № 5. – С. 51–54.
Naboka B.G., Besprozvannykh A.V., Gladchenko V.Ya. Slow processes in solid dielectric and optimum temperature of polymerization // Elektrichestvo. – 2003. – №5. – P. 51–54. (Rus.)
4. *Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я.* Методика измерения дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов // Электричество. – 1990. – № 11. – С. 71–74.
Naboka B.G., Besprozvannykh A.V., Gladchenko V.Ya. Technique of measurement of differential peak spectra of pulses of partial dischargers // Elektrichestvo. – 1990. – №11. – P. 71–74 (Rus.)
5. *Резинкина М.М., Щерба А.А.* Диагностика и мониторинг высоковольтных силовых электрических кабелей с полиэтиленовой изоляцией // Техн. электродинамика. – 2006. – № 5. – С. 84–87.
Rezinkina M.M., Shcherba A.A. Diagnostics and monitoring of high-voltage power electric cables with polyethylene insulation // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – № 5. – P. 84–87. (Rus.)
6. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.В. и др.* Анализ микронеоднородности электрического поля как фактора повышения интенсивности электрофизических процессов в полимерной изоляции высоковольтных кабелей и самонесущих изолированных проводов // Техн. электродинамика. – 2008. – № 4. – С. 3–12.
Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.V. and all. The analysis of micro heterogeneity of an electric field as factor of increase of intensity of electro physical processes in polymeric isolation of high-voltage cables and self-supporting isolated wires // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – № 4. – P. 3–12. (Rus.)
7. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д. и др.* Моделирование и анализ неоднородных электрических полей в высоковольтных силовых кабелях // Техн. электродинамика. – 2006. – № 1. – С. 96–105.
Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Podoltsev A.D. and all. Modeling and the analysis of non-uniform electric fields in high-voltage power cables // Tekhnichna elektrodynamika. – 2006. – № 1. – P. 96–105. (Rus.)
8. *Шувалов М.Ю., Ромашикин А.В., Овсиенко В.Л.* Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // Электричество. – 2000. – №5. – С. 49–57.
Shuvalov M.Yu., Romashkin A.V., Ovsienko V.L. The analysis of defects in isolation of power high-voltage cables by methods of videomicroscopy and microexperiment // Elektrichestvo. – 2000. – №5. – P. 49–57. (Rus.)
9. *Каталог* фирмы Hipotronics. – 2002. – 10 с.
Catalogue of Hipotronics. – 2002. – 10 p. (Rus.)

10. *Cavallini A., Conti M., Montanari G.* Early detection of electrical tree through advanced PD measurement inference techniques – Jicable: Versailles, France. – June 2003. – P. 612–616.

11. *Rueth W.* Calculation of insulation void density and size from partial discharge pulse height analysis. Annu. Report.: Conf. Elect. Insul. and Dielec. Phenom, Whitehaven. – 1981.

12. *Shoji Hirabayashi, Ycshikasu Shibuya, Takatoshi Haseganwa.* Estimation of the size partial discharge of voids in Coil Insulation of rotating machine // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – December 1974. – № 4. – P. 129–136.

13. *А.с. №1577524 SU A1 5G01 R31/14.* Способ неразрушающего контроля конденсаторов с твердым диэлектриком / Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я., Малахов В.А. (СССР). Опубл. 08.03. 90.

Patent №1577524 SU A1 5G01R31/14. Way of not destroying control of condensers with solid insulation / Naboka B.G., Besprozvannykh A.V., Gladchenko V.Ya., Malakhov V.A. (USSR). – Public 08.03. 90. (Rus).

УДК 621.315.4

Г.В.Безпрозванных, докт.техн.наук,

**Национальный технический университет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна.**

Способи зображення диференційних амплітудних спектрів імпульсів часткових розрядів у твердій ізоляції

Геометричні параметри та кількість повітряних вкраплень у твердій ізоляції визначаються на основі рішення рівняння Вольтерра тільки в разі монотонної зміни диференційних амплітудних спектрів (ДАС) імпульсів часткових розрядів. У протилежному випадку знаходяться опосередковані параметри повітряних вкраплень. Оцінка якості твердої ізоляції здійснюється шляхом відображення сукупності ДАС у подвійному логарифмічному масштабі. Порівняння сімейств ДАС виконується за шириною смуги спектрів часткових розрядів без математичної обробки. Бібл. 13, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: часткові розряди, тверда ізоляція, диференційні амплітудні спектри.

G.V.Bezprozvannykh,

**National technical university “Kharkov polytechnic institute”,
Frunze str., 21, Kharkov, 61002, Ukraine.**

Ways of representation of differential peak spectra of pulses of partial discharges in solid insulation

Geometrical parameters and number of air inclusions in solid insulation are defined on the basis of the decision of equation Volterra only in case of monotonous change of differential peak spectra (DPS) of pulses of partial dischargers. Otherwise the average parameters of air inclusions are defined. The estimation of quality of solid insulation is carried out by representation of set DPS in double logarithmic scale. Comparison of curves DPS is carried out on width of a strip of spectra of partial dischargers without mathematical processing. References 13, tables 1, figures 5.

Key words: partial dischargers, solid insulation, differential peak spectra.

Надійшла 21.12.2010

Received 21.12.2010