

УДК. 614.8

*Рудаков С.В., канд. техн. наук, доц., УГЗУ,  
Швец С.В., канд. техн. наук, доц., УГЗУ*

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ  
НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ ПУТЕМ ОЦЕНИВАНИЯ  
СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**  
(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

В статье предложена методика контроля параметров изоляции кабельных изделий, находящихся в эксплуатации на атомных объектах, которая своевременно выявит старение компонентов изоляции кабелей, что в свою очередь позволит предотвратить чрезвычайную ситуацию на объекте. Показано применение данной методики для образцов кабелей, которые находились на эксплуатации на атомной станции.

**Постановка проблемы.** Надежность энергоснабжения – это безопасная эксплуатация атомной станции (АС). Эти понятия на АС адекватны и тождественны. Увеличение единичной мощности энергоблоков сопровождается увеличением мощности питающих трансформаторов, приводных механизмов, рассредоточением оборудования, увеличением длины кабельных сетей. Все это приводит к увеличению емкостных проводимостей всей сети, что, безусловно, усложняет процессы, сопровождаемые однофазными замыканиями на землю. Выход из строя любого из вышеперечисленных компонентов АС может привести к возникновению чрезвычайной ситуации на данном объекте. В этой связи, если говорить о надежности работы атомной станции и о предупреждении чрезвычайной ситуации, то необходимо своевременно и достоверно проводить контроль состояния кабельных изделий.

Обязательной частью работ в рамках продления срока службы энергоблоков является оценка состояния кабельных линий, определение возможности и условий, при которых допустима их эксплуатация в дополнительный срок службы. Исследования механизмов старения изоляционных материалов в лабораторных условиях и полученные результаты старения кабелей в условиях эксплуатации явились основой для разработки методов неразрушающей диагностики состояния и мероприятий по управлению сроком службы кабелей на атомных станциях. Для контроля со-

стояния контрольных кабелей разработаны практически неразрушающие методы диагностики, основанные на механическом индентировании оболочки кабеля, на измерении скорости распространения ультразвуковых волн в полимерных оболочках, на исследовании изменения состава и структуры микросрезов изоляционных материалов массой несколько миллиграмм физико-химическими методами.

Для осуществления неразрушающего контроля состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, полиэтиленовой изоляцией и поливинилхлоридной изоляцией разработаны и совершенствуются методы, основанные на регистрации свойств, имеющих поляризационную природу – возвратное напряжение и тангенс угла диэлектрических потерь на сверхмалых частотах. Эти свойства дают возможность контролировать параметры миграционной поляризации и контролировать, таким образом, старение и увлажнение изоляции силовых кабелей.

В силовых кабелях, находящихся в эксплуатации на атомных электрических станциях (АЭС), контроль характеристик (частичной емкости, угла диэлектрических потерь) каждой из компонент (полиэтилен, ПВХ-пластикат) изоляции по отдельности невозможен. Силовые кабели содержат ряд изоляционных компонентов (например: фазная изоляция, поясная изоляция, внутренняя оболочка, внешняя оболочка, межфазное заполнение), старение которых носит индивидуальный характер. Это является следствием как несколько различных уровней внешних воздействующих факторов старения - повышенной температуры, напряженности электрического поля, влаги, термомеханических напряжений, ионизирующей радиации, так и разной природы этих материалов. Задача достижения равномерного старения всех компонентов конструкции кабеля пока даже не ставится. Поэтому, выявление наиболее слабого звена представляется перспективным способом неразрушающей диагностики изоляции. Представляет интерес информация о параметрах изоляции каждого провода в отдельности. Для этого необходимо выбрать такую коммутацию проводов, чтобы электрическое поле в основном сосредотачивалось вокруг изоляции контролируемого провода.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ работ по оценке состояния и прогнозированию срока службы кабелей на энергоблоках показал [1-2], что замена кабелей необходима только в "горячих точках" эксплуатации, где интенсивность дегра-

---

Предотвращение чрезвычайных ситуаций на атомных станциях путем оценивания состояния изоляции кабельных изделий

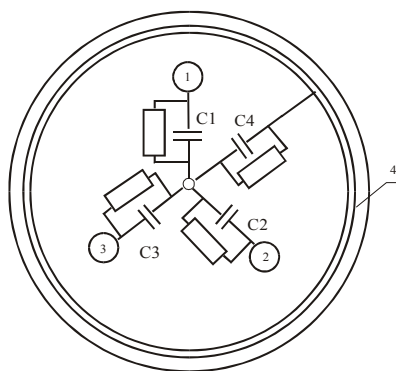
дационных факторов выше, чем в среднем по блоку. Для обнаружения и локализации "горячих точек" применяется тепловизионная техника, проводится дозиметрия кабельных трасс гермообъёма, используется другая традиционная техника.

Для оценки возможного дополнительного срока службы кабелей, подверженных деградиационным факторам проектных аварий, разработана методика проведения дополнительных испытаний на устойчивость к проектным авариям образцов кабелей, изъятых из эксплуатации. Полученные экспериментальные данные показали, что наличие даже незначительного предварительного старения поливинилхлоридной изоляции может привести к отказу выполнения кабелем с такой изоляцией своих функций в процессе воздействия максимальной проектной аварии.

Существует несколько методов нахождения характеристик одного (искомого) компонента изоляции на фоне совокупных измерений: частотный, временной, пространственный [3-4]. При использовании этих методов не учитывается частичное проникновение электромагнитного поля в изоляцию отдельных элементов кабеля (полупроводящее покрытие, защитная внутренняя и внешняя оболочка). Необходимо учесть погрешность измерения, возникающую при таком влиянии полей.

**Постановка задачи и ее решение.** Разработать методику оценки состояния изоляции отдельных жил кабеля для оценки его состояния в целом.

Типичная конструкция кабеля содержит жилу, фазную изоляцию жилы, полупроводящее покрытие по изоляции и экран, вспомогательные изолированные жилы, защитную внутреннюю оболочку, броню, внешнюю защитную оболочку. Схема замещения основной изоляции кабеля представлена на рис.1.



**Рис. 1 – Схема замещения трехфазного кабеля**

Здесь обозначено: 1, 2, 3 - жилы; 4 - экран (броня). Между четырьмя электродами образуются 4 емкости:  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  - частичные емкости каждой из жил на свои экраны;  $C_4$  - емкость экранов по отношению к броне кабеля. Сопротивления, подключенные параллельно частичным емкостям, отражают потери в изоляции. Их принято характеризовать тангенсами углов диэлектрических потерь:  $\operatorname{tg}\delta_1$ ,  $\operatorname{tg}\delta_2$ ,  $\operatorname{tg}\delta_3$ ,  $\operatorname{tg}\delta_4$ .

Таким образом, схема замещения рис.1 содержит 8 неизвестных: 4 - частичных емкостей и 4 - соответствующих им  $\operatorname{tg}\delta$ .

Пусть доступными для подсоединения к измерительному прибору есть электроды 1 - 4. (Экран жил используем только для проверки конечных результатов определения параметров по совокупным наблюдениям).

Для нахождения всех неизвестных следует выполнить 4 измерения, определяя каждый раз по две характеристики - емкость и тангенс угла потерь.

Решая системы алгебраических уравнений (САУ), можно определить значения частичных емкостей и соответствующие тангенсы углов диэлектрических потерь [2].

Были измерены параметры отрезка шахтного медного гибкого бронированного кабеля сечением  $3 \times 95 \text{ мм}^2$  с комбинированной изоляцией жил (ПЭ+ПВХ пластикат) и оболочкой из ПВХ пластиката. Длина отрезка - 3,4 м. Результаты представлены в табл.1.

Таблица 1 – Результаты измерений параметров кабеля

	Частота измерений, кГц					
	0,1		1,0		10,0	
	$C$ , пФ	$\operatorname{tg}\delta$ , %	$C$ , пФ	$\operatorname{tg}\delta$ , %	$C$ , пФ	$\operatorname{tg}\delta$ , %
a	1497,70	3,457	1408,24	4,724	1301,33	5,704
b	1478,80	3,394	1391,28	4,663	1287,12	5,650
c	1491,58	3,288	1406,64	4,514	1304,51	5,500
d	858,88	3,034	809,79	4,143	756,34	4,874
e	877,57	3,213	828,52	4,306	772,42	4,996
f	860,10	3,508	807,56	4,760	747,52	5,469

Решение САУ для различных вариантов (опыты a, b, c, d) подключения электродов кабеля к средству измерительной техники на частоте 0,1 кГц имеет четыре варианта, из которых необходимо выбрать один.

C1	C2	C3	C4
922.58	6328.34	954.60	933.00
5410.70	955.74	967.27	991.15
<b>1010.91</b>	<b>985.67</b>	<b>973.48</b>	<b>5020.50</b>
1678.52	1570.86	1031.35	1746.89

Третий вариант соответствует физическому смыслу решаемой задачи: емкости фаз C1 - C3 должны быть близкими по величине, емкость внутренней оболочки C4 - может отличаться от них.

Фактические значения емкостей фаз по результатам измерений с использованием внутренних экранов составили  
 $C1=1005,63$  пФ  $C2= 975,90$ пФ  $C3=971,28$ пФ  $C4=5011,8$ пФ

Погрешности восстановления отдельных емкостей составили (в процентах):

для C1 – 0,525%, для C2 – 1%, для C3 – 0,226%, для C4 – 0,173%, т.е. средняя погрешность составляет:  $(0,525+1+0,226+ 0,173)/4 = 0,5\%$ .

Точность восстановления емкости по результатам совокупных измерений может быть достаточно высокой, если схема замещения правильно отражает частичные емкости кабеля, а измерения выполнены точно.

Многовариантность решения - следствие нелинейности системы, которая сводится к уравнению четвертого порядка. Нам не удалось получить аналитическое решение этой системы, поэтому пришлось использовать численное решение СЛАУ.

В результате найдены  $\text{tg}\delta_1 - \text{tg}\delta_4$ :

$$\text{tg}\delta_1 = 3.07\% \quad \text{tg}\delta_2 = 3.40\% \quad \text{tg}\delta_3 = 2.89\% \quad \text{tg}\delta_4 = 4.37\%$$

Соответствующие фактические значения  $\text{tg}\delta_1 - \text{tg}\delta_4$  составили:

$$\text{tg}\delta_1 = 3.08\% \quad \text{tg}\delta_2 = 3.47\% \quad \text{tg}\delta_3 = 2.89\% \quad \text{tg}\delta_4 = 4.40\%$$

Относительные погрешности восстановления  $\text{tg}\delta$  таким образом равны: -0.324%, -2.01%, 0%, -0.681%, а средняя погрешность составила -0,8%.

Погрешности восстановления  $\text{tg}\delta$  оказались почти в 1,5 раза больше погрешности восстановления емкости. Это следствие накопления ошибок при решении СЛАУ, коэффициенты которой определяются по экспериментальным данным с определенной погрешностью.

Результаты восстановления параметров частичных емкостей представлены в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати расчетов параметров частичных емкостей трехфазного кабеля

Частота измерений 0,1 кГц						
abc-d		abc-e		abc-f		
	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %
1	1010.91	3.07	999.93	3.11	1002.34	3.14
2	985.67	3.40	975.46	3.43	977.70	3.46
3	973.48	2.89	963.64	2.93	965.80	2.96
4	5020.50	4.37	5229.83	4.26	5182.32	4.12
Частота измерений 1,0 кГц						
abc-d		abc-e		abc-f		
	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %
1	958.86	4.08	945.37	4.10	948.60	4.21
2	928.00	4.56	915.72	4.57	918.67	4.67
3	924.75	3.92	912.60	3.94	915.52	4.04
4	4626.93	6.33	4874.94	6.32	4813.00	5.91
Частота измерений 10,0 кГц						
abc-d		abc-e		abc-f		
	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %
1	896.80	4.57	885.62	4.58	888.02	4.65
2	860.87	5.11	850.97	5.10	853.10	5.17
3	867.50	4.45	857.36	4.46	859.54	4.53
4	4144.80	8.97	4334.63	9.06	4292.36	8.78

Истинные значения параметров изоляции фаз и внутренней оболочки приведены в табл. 3.

Таблиця 3 – Параметры фазной изоляции жил и внутренней оболочки, измеренные непосредственно

Частота измерений, кГц						
0,1		1,0		10,0		
	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %	C, пФ	tgδ, %
1	1005,63	3,080	951,46	4,160	889,63	4,660
2	975,90	3,466	916,96	4,658	850,55	5,208
3	971,28	2,893	921,81	3,933	864,82	4,454
4	5011,8	4,40	4636,0	6,42	4138,0	9,03

Сравнивая данные таблиц 2 и 3, можем заключить, что точность восстановления параметров изоляции кабелей по результатам совокупных измерений может быть достаточно высокой.

На рис.2 представлена диаграмма компонентов изоляции кабеля, где  $^0$  – 1-я жила;  $\Delta$  - 2-я жила; \* - 3-я жила.

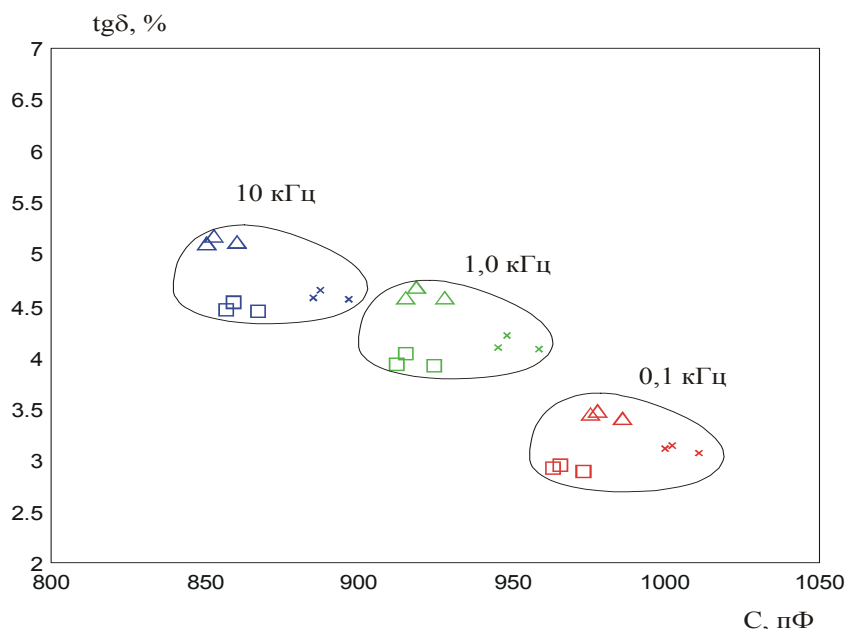


Рис. 2 –  $C - tg\delta$  диаграмма компонентов изоляции каждой жилы кабеля по отдельности

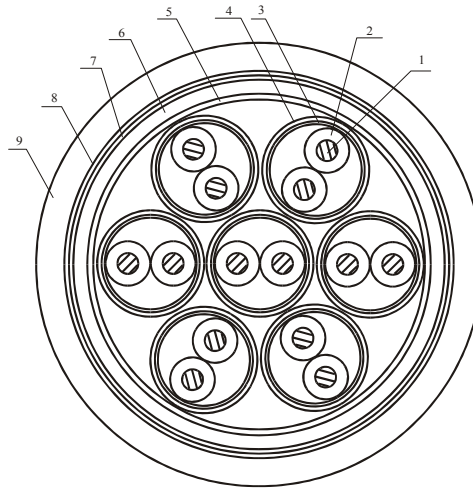
Как видно из представленных данных, характеристики изоляции второй жилы существенно хуже остальных. Изоляционные свойства оболочки еще хуже чем свойства изоляции 2-й жилы.

Такой разброс параметров компонентов изоляции одного и того же изделия – признак его низкого качества.

На рис. 3 показана конструкция кабеля КПЭТИнг (контрольный полиэтиленовый термостойкий ионизационостойкий и негорючий), который используется на АЭС Украины.

Образцы кабелей КПЭТИнг 7x0,5 используются для контроля процессов старения изоляции. Были взяты отрезки кабелей, хранившихся на складе в течение 16 лет (С), находившиеся в эксплуатации в чистой зоне АЭС (В) и - в гермозоне (А). Образец А с потемневшими участками огнестойкой обмазки - продукты разложения полимерной изоляции кабеля под действием ионизирующего облучения (доза - 30 Мрад) и высокой температуры (ускоренное термостарение при 150 °С). Образец В с зеленоватыми окис-

лами медной защитной оплетки, образовавшиеся после его выдержки в термовлагокамере. На образце С следов окислов нет.



**Рис. 3 – Схема 7-парного кабеля КПЭТИнг: 1 - жила; 2 - полиэтилен; 3 - полиимидная пленка; 4 - экран; 5 - полиимидная пленка; 6 - полиэтиленовая оболочка; 7 - полиимидная пленка; 8 - экран; 9 - оболочка из ПВХ пластиката (может заменяться оплеткой из медного луженого провода)**

Обследование образцов таких кабелей показало, что кабель из гермозоны атомного реактора (А) (рис.4) имеет повышенное значение  $\text{tg}\delta$  по сравнению с таким же кабелем из чистой зоны (В) или с кабелем, который хранился на складе (С). Кроме того, наблюдается сильная корреляция значений  $\text{tg}\delta$  соседних жил. Это наводит на мысль о том, влага проникает в микропоры в зоне контакта между жилами.

Были обследованы образцы С, В и А кабелей КПЭТИнг в исходном состоянии и после ускоренного старения. Старение имитировало действие внешних воздействующих факторов, характерных при длительной нормальной эксплуатации кабелей в зоне реактора АЭС, а также в случае предусмотренных аварийных ситуаций. Ускоренное старение включало радиационное и термическое старение, а также воздействие водяных паров в термовлагокамере.

Радиационное старение образцов кабелей достигалось путем их облучения электронами высоких энергий. Электроны высоких энергий свободно проникают сквозь броню, экраны и даже жилы кабеля, за счет чего достигается равномерное облучение изоляции объекта испытаний. Поглощенная доза составила 30 Мрад (0,3 МГрей). Такую дозу облучения кабели получают за весь срок нор-

Предотвращение чрезвычайных ситуаций на атомных станциях путем оценивания состояния изоляции кабельных изделий



мальной эксплуатации в зоне реактора современной АЭС даже с учетом возможной утечки теплоносителя первого контура охлаждения реактора (тест ЛОСА). Интенсивность облучения возрастает по экспоненциальному закону - примерно в 10 раз за каждые два года эксплуатации энергоблока, т.е. за 30 лет - в  $10^{15}$  раз.

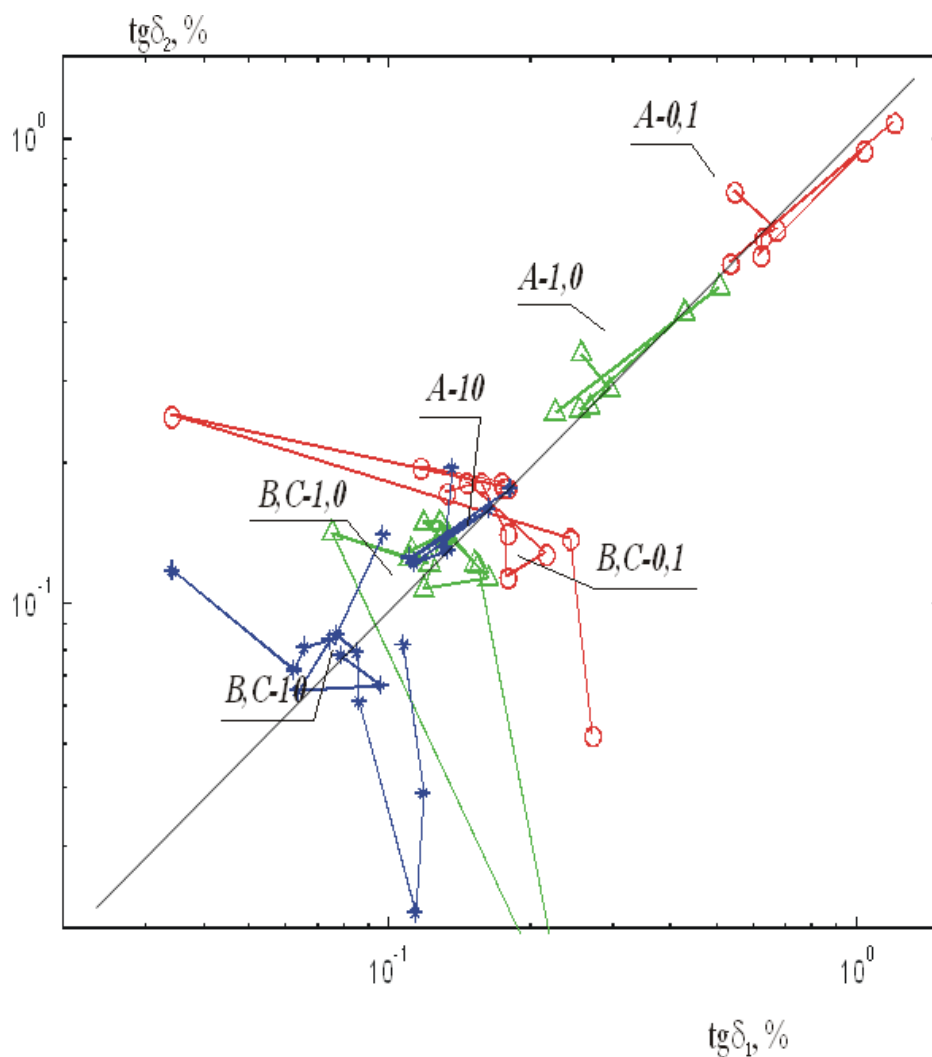


Рис. 4 – Корреляционные зависимости между значениями  $\text{tg}\delta$  изоляции соседних жил образцов А, В и С при разных частотах: о - 0,1 кГц; ^ - 1,0 кГц; \* - 10 кГц

Ускоренное термическое старение осуществлялось путем выдержки кабелей в термостате при температуре 150 °С в течение 10 часов.

После радиационно-термического старения значения  $\text{tg}\delta$  кабелей С, В - увеличились. Это свидетельствует о термоокислительных процессах старения диэлектрика - терморационно сшитого полиэтилена. Слои полиимидной изоляции, по-видимому,

Рудаков С.В., Швецов С.В.

не успевает заметно состариться при таких внешних воздействиях. Он обладает значительно более высокой радиационной и термической стойкостью, чем полиэтилен. Для образца А наблюдаем снижение  $\operatorname{tg}\delta$  при частоте 0,1 кГц и рост - при 10 кГц. Это объясняется, по-видимому, тем, что данный образец после 16 лет работы в гермозоне был насыщен влагой, а под воздействием высокой температуры - подсох, из-за чего  $\operatorname{tg}\delta_{0,1}$  - снизился. На высоких частотах (10 кГц) влияние подсушки образца незаметно, зато просматривается явление термоокислительной деструкции полимера - рост  $\operatorname{tg}\delta_{10,0}$ .

Увлажнение приводит к росту  $\operatorname{tg}\delta$ , хотя и в разной степени для разных образцов: в наибольшей степени это происходит для образца А, извлеченного из гермозоны. Повышенные гигроскопические свойства этого образца могут быть связаны с большей степенью его окисления, которое происходило в гермозоне реактора при повышенной температуре (до 60 °С) и высокой влажности (до 98 %).

Таким образом, измерения  $\operatorname{tg}\delta$  и частичных емкостей могут обладать достаточно высокой чувствительностью и информативностью для того, чтобы их можно было использовать при неразрушающем контроле состояния изоляции контрольных кабелей, важных для обеспечения безопасной эксплуатации энергетических объектов.

### **Выводы.**

Своевременное выявленное отклонение значений параметров изоляции отдельного контрольного кабеля от нормативных, помогает спрогнозировать старение изоляции остальных кабелей, находящихся в одинаковых условиях эксплуатации, что способствует предотвращению чрезвычайных ситуаций на АС.

Определение параметров изоляции конструктивных элементов кабелей по результатам измерений сводится к решению систем уравнений, которые в общем случае являются нелинейными по отношению к искомым параметрам. Возникающая при этом неоднозначность решений представляет определенную проблему для правильной интерпретации данных. Неоднозначность можно устранить, если использовать такие схемы измерений, при которых все частичные емкости включены только параллельно. В рассмотренной же задаче было параллельно-последовательное включение частичных емкостей. Оно не могло быть сведено к параллельному включению без доступа к экранам жил.

---

Предотвращение чрезвычайных ситуаций на атомных станциях путем оценивания состояния изоляции кабельных изделий

Наблюдения за образцами контрольных кабелей КПЭТИнг, хранившихся на складе (С), работавших в чистой зоне (В) и в гермозоне (А) блока АЭС, а затем подвергнутых дополнительному старению, свидетельствуют о термоокислительном старении изоляции и ее гигроскопическом увлажнении. Исключения составляют образцы типа (А) (из гермозоны), для которых наблюдается снижение  $\text{tg}\delta$  после термостарения, свидетельствующее о преобладании для них процессов подсушки изоляции над процессами термоокислительного старения.

Изменение значения тангенса угла диэлектрических потерь в несколько раз свидетельствует о высокой чувствительности выбранного показателя качества изоляции и эффективности предложенной выше методики его измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рудаков С.В. Статистические характеристики случайных помех при косвенных измерениях параметров частичных емкостей кабелей // Вестник НТУ «ХПИ» – Х. НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 9, т.3. С. 88 – 92.
2. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Рудаков С.В. Контроль параметров изоляции трехфазных кабелей методом косвенных // Вестник НТУ «ХПИ» – Х. НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 7, т.1. С. 103-108.
3. Боев М.А. Техническая диагностика низковольтной полимерной изоляции // Труды Международной научно-технической конференции «Изоляции-99». – Санкт-Петербург, 1999. - С.19–С.20.
4. Кравченко Р.І., Коваленко В.В. Дослідження з визначення показників пожежної небезпеки систем кабельних трубопроводів, коробів та лотоків // Бизнес и безопасность. – 2005. - № 6. – С. 75.
5. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике. – Киев: ИСИО, 1995. – 120с.  
nuczu.edu.ua