

А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев, И.А. Мирчук, А.В. Рогинский

ВЫЯВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Визначено можливі значення напруги початку часткових розрядів для моделі циліндричного повітряного зазору поблизу струмопровідної жили силового кабелю. Показано, що при однакових прикладених напругах до високовольтної ізоляції в останньому випадку активізуються повітряні включення меншої товщини в порівнянні з плоскою конструкцією. На підставі результатів проведених випробувань силового кабелю на напругу 3 кВ встановлено, що грубі технологічні дефекти в товщі ізоляції відсутні. Амплітуда розрядів в повітряних включеннях не перевищує 10 пКл при прикладеній випробувальній напрузі 5 кВ частоти 50 Гц. Показана ефективність виявлення технологічних дефектів у твердій композитній корпусній ізоляції обмотки статора турбо- і гідрогенераторів. Встановлено, що в макетах, ізоляція яких виконана стрічками меншої товщини, технологічні дефекти розташовані в товщі ізоляції. Для макета, ізоляція якого виконана стрічками більшої товщини, технологічні дефекти у вигляді розширення розташовані на кордоні розділу провідник - композитна ізоляція. Бібл. 19, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: технологічні дефекти, часткові розряди, напруга початку часткових розрядів, склослюдопаперова стрічка, амплітуда імпульсів часткових розрядів, місце розташування дефекту.

Определены возможные значения напряжения начала частичных разрядов для модели цилиндрического воздушного зазора вблизи токопроводящей жилы силового кабеля. Показано, что при одинаковых приложенных напряжениях к высоковольтной изоляции в последнем случае активизируются воздушные включения меньшей толщины в сравнении с плоской конструкцией. На основании результатов проведенных испытаний силового кабеля на напряжение 3 кВ установлено, что грубые технологические дефекты в толще изоляции отсутствуют. Амплитуда разрядов в воздушных включениях не превышает 10 пКл при приложенном испытательном напряжении 5 кВ частоты 50 Гц. Показана эффективность выявления технологических дефектов в твердой композитной корпусной изоляции статорной обмотки турбо- и гидрогенераторов. Установлено, что в макетах, изоляция которых выполнена лентами меньшей толщины, технологические дефекты расположены в толще изоляции. Для макета, изоляция которого выполнена лентами большей толщины, технологические дефекты в виде расслоения расположены на границе раздела проводник - композитная изоляция. Библ. 19, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: технологические дефекты, частичные разряды, напряжение начала частичных разрядов, стеклобумажная лента, амплитуда импульсов частичных разрядов, место расположения дефекта.

Введение. Наиболее типичными дефектами твердой высоковольтной изоляции в процессе производства электроизоляционных конструкций являются воздушные включения. Причиной их появления в толще изоляции могут быть погрешности изготовления. Так, в силовых кабелях – недостаточная сушка гранул полимера перед загрузкой их в экструдер или слишком высокая скорость охлаждения изоляции на выходе из экструдера [1-3].

Внутренние газовые включения в процессе вакуумно-нагнетальной пропитки и запечки неизбежно присутствуют в терморезистивных системах изоляции на основе слюдяных лент, применяемых в высоковольтных электрических машинах. Как правило, у каждого изготовителя электрических машин применяется своя конструкция и технология изготовления витковой и корпусной высоковольтной изоляции, отличающаяся от других изготовителей по типам и толщине применяемых материалов, по количеству слоев и суммарной толщине изоляции, по длительности и величине температурных воздействий при ее изготовлении [4-6].

При эксплуатации под переменным напряжением промышленной частоты высоковольтной твердой изоляции в воздушных включениях возникают частичные разряды (partial discharges) (ЧР). Системы высоковольтной изоляции всегда имеет некоторый фоновый уровень ЧР, не оказывающий какого-либо существенного влияния на ресурс электроизоляционной конструкции. В то же время частичные разряды раз-

рушают высоковольтную изоляцию, приводя к науглероживанию зоны вокруг дефекта. Это «скрытый» период развития дефекта. Развитие зоны дефекта, рано или поздно, приводит к дуговому пробоему всего изоляционного промежутка.

Целью статьи является обоснование эффективности выявления технологических дефектов в высоковольтной твердой изоляции электроизоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов.

Постановка проблемы. Для частичных разрядов нет стандартных нормированных значений. Имеющиеся локальные нормы и рекомендации справедливы только для небольших групп электроизоляционных конструкций [7, 8]. По этой причине в большинстве случаев количественная оценка состояния изоляции электрических машин по параметрам частичных разрядов может производиться только сравнением с результатами предыдущих измерений, выполненных на этом же оборудовании [9, 10].

Для силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена измерения характеристик ЧР производится при плавном подъеме испытательного напряжения до двукратного рабочего напряжения промышленной частоты в течение 10 секунд, а затем медленно снижается до 1,73 от номинального значения [11]. Уровень ЧР не должен превышать 10 пКл.

Частичные разряды характеризуются следующими параметрами: напряжение начала ЧР; амплитуда

© А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев, И.А. Мирчук, А.В. Рогинский

кажущегося заряда; частота импульсов ЧР. В современных системах диагностики применяются: максимальная амплитуда импульсов ЧР положительной и отрицательной полярности, измеряемая в милливольтгах (мВ); уровень ЧР положительной и отрицательной полярности (пКл); амплитудно-фазовые диаграммы импульсов ЧР (зависимость числа разрядов с определенными значениями кажущегося заряда от фазы напряжения промышленной частоты – так называемые PD-диаграммы) [7-10, 12-19].

Связь напряжения начала частичных разрядов с толщиной воздушных включений. Пусть в слое изоляции толщиной h содержится воздушное включение толщиной x (рис. 1, б). Для качественной изоляции обычно $x \ll h$ [18].

На рис. 1 обозначено: x – толщина воздушного включения в изоляции; h – толщина изоляции; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, C_x – емкость включения; C_{h-x} – емкость части изоляции напротив включения; C_0 – емкость остальной части изоляции [18].

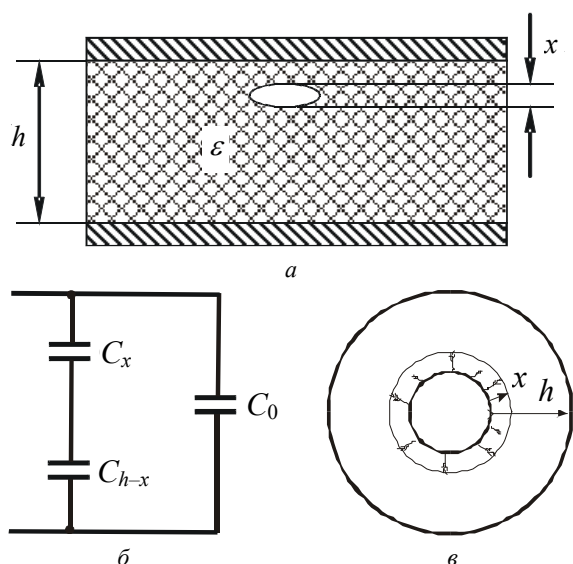


Рис. 1. Плоская (а) и цилиндрическая (б) модели для расчета напряжения начала ЧР на основании емкостной схемы замещения (б) изоляции

Определим, какая часть U_x внешнего напряжения U приходится на включение толщиной x (рис. 1, б).

Емкость включения определяется как

$$C_x = \varepsilon_0 S_x / x, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); S_x – площадь включения, m^2 .

Емкость сплошного слоя диэлектрика, расположенного напротив включения

$$C_{h-x} = \varepsilon \varepsilon_0 S_x / (h-x). \quad (2)$$

Из емкостной схемы замещения (рис. 1, б) находим U_x

$$U_x = U \frac{1/(\omega C_x)}{1/(\omega C_x) + 1/(\omega C_{h-x})} = U \frac{\varepsilon x}{h + (\varepsilon - 1)x}. \quad (3)$$

При $x \rightarrow 0$ напряжение на включении стремится к нулю $U_x \rightarrow 0$ (т.к. ее собственная емкость неограниченно возрастает), при $x \rightarrow h$ все внешнее напряжение

приходится на включение $U_x \rightarrow U$ (т.к. включение занимает весь изоляционный промежуток).

При достижении напряжения на включении уровня пробивного напряжения U_{xbr} включение пробьется

$$U_x \geq U_{xbr}. \quad (4)$$

Так как при этом пробивается только часть x изоляционного промежутка h , то разряд соответственно называют частичным. Соответствующее напряжение на электродах, при котором начинает выполняться условие (4), и есть напряжение начала ЧР [12-18].

Пробивное напряжение U_{xbr} включения зависит от его толщины x . Эта экспериментальная зависимость (кривая Пашена) показана на рис. 2, кривая 1. При уменьшении толщины x пробивное напряжение снижается и при $x = 7$ мкм достигает минимума $U_{xbr} = 320$ В ампл. = 226 В эфф., а далее даже несколько увеличивается [18]. В соответствии с эмпирическим законом Пашена пробивное напряжение газового промежутка является функцией произведения давления p на толщину x : $U_{xbr} = U_{xbr}(px)$.

Рассмотрим условия возникновения ЧР в толще изоляции. Результаты расчетов по (1) – (3) приведены на рис. 2, а (кривые 2 – 4) и рис. 2, б (кривые 2 – 5).

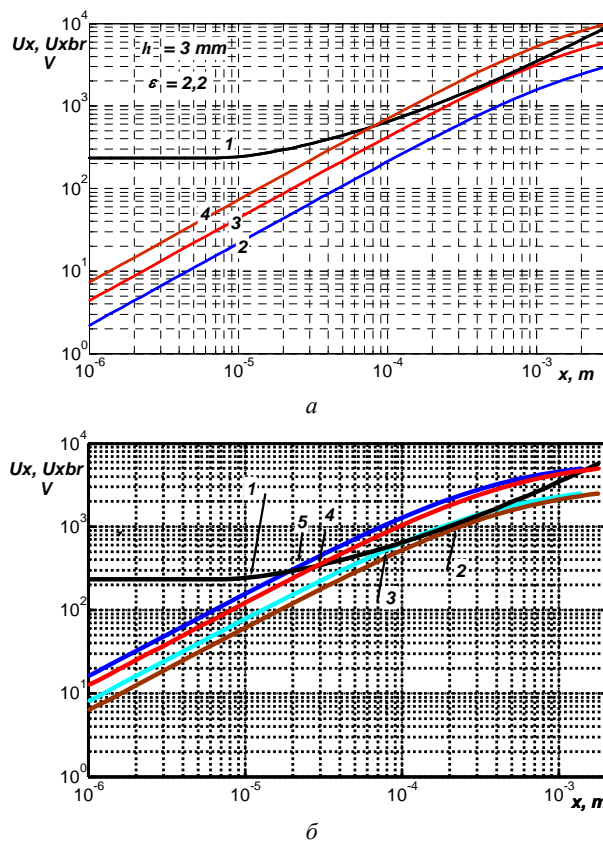


Рис. 2. Зависимости от толщины (x) воздушного включения его пробивного напряжения U_{xbr} и расчетных напряжений U_x на включениях

Напряжения на изоляции (рис. 2, а): 2,5 кВ (кривая 2), 5 кВ (кривая 3) и 10 кВ (кривая 4). Толщина изоляции $h = 3$ мм, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2,2$ (полиэтиленовая неполярная изоляция силовых кабелей). При напряжении 2,5 кВ ЧР в изоляции

невозможны (рис. 2,а): кривая 2 – $U_x(x)$ лежит ниже кривой 1 пробивного напряжения воздушных включений. При напряжении 5 кВ ЧР в изоляции возможны, если в ней есть воздушные включения толщиной 0,6 мм (пересечение кривых 3 и 1). При напряжении 10 кВ ЧР в изоляции возможны, если в ней присутствуют воздушные включения толщиной от 0,08 до 3 мм. Заметим, что это весьма большие включения по сравнению с толщиной диэлектрика, равной 3 мм. Измерение ЧР позволяет выявить наличие в изоляции весьма грубых дефектов.

Напряжения на изоляции (рис. 2,б): 2,5 кВ (кривая 2), 5 кВ (кривая 4) для толщины изоляции, равной 1,8 мм; 2,5 кВ (кривая 3) и 5 кВ (кривая 5) для толщины изоляции, равной 1,4 мм соответственно. Диэлектрическая проницаемость равна $\varepsilon = 4,5$ (характерные значения для композитной стеклослюдинитовой изоляции электрических машин). При напряжении 5 кВ ЧР в изоляции толщиной 1,8 мм возможны, если в ней есть воздушные включения толщиной от 0,03 мм и больше, т.е. от 30 мкм (см. рис. 2,б, кривая 4). Для композитной изоляции меньшей толщины (1,4 мм) при приложенном напряжении 5 кВ активизируются воздушные включения толщиной от 20 мкм (см. рис. 2,б, кривая 5).

На рис. 3 приведено влияние диэлектрической проницаемости композитной изоляции толщиной 1,8 мм на расчетные напряжения U_x на включениях. Кривая 2 соответствует $\varepsilon = 4,5$; кривая 3 – $\varepsilon = 4,8$ при одинаковом значении приложенного напряжения, равного 5 кВ. Увеличение диэлектрической проницаемости композитной изоляции, т.е. долевого содержания слюды, приводит к смещению кривой $U_x(x)$ в область меньших значений активизируемых воздушных включений (см. кривую 3 на рис. 3).

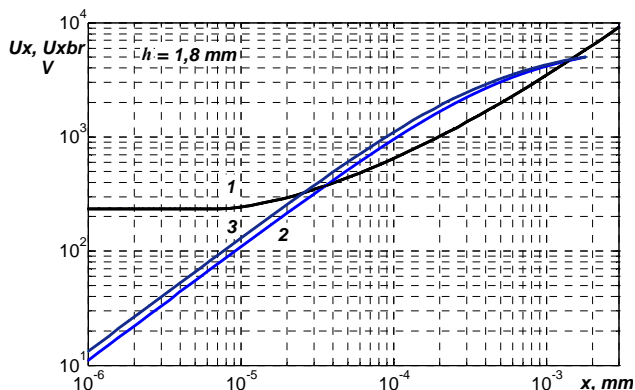


Рис. 3. Влияние диэлектрической проницаемости композитной изоляции на расчетные напряжения U_x на воздушных включениях

Влияние места расположения дефекта на напряжение начала частичных разрядов в силовом кабеле. В процессе охлаждения экструдированной полимерной изоляции на токопроводящую жилу возможно образование внутренних пустот в толще экструдированной изоляции. При этом вероятность образования пузырей и пустот у жилы, температура которой выше в сравнении с внешними слоями изоляции, значительно возрастает [2]. Следует учитывать, что напряженность электрического поля у жилы также

выше [18]. Определим возможные значения напряжения начала ЧР, используя модель цилиндрического воздушного зазора вблизи жилы (рис. 1,е).

Результаты представлены на рис. 4: сечение токопроводящей жилы 25 мм², толщина полиэтиленовой изоляции 3 мм, $\varepsilon = 2,2$.

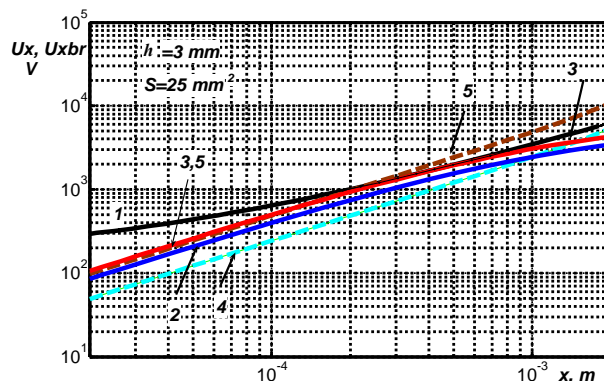


Рис. 4. Влияние места расположения технологического дефекта на напряжение начала ЧР в экструдированной изоляции силового кабеля

Кривая 1 – пробивное напряжение U_{xbr} включения; кривые 2 и 3 соответствуют случаю технологического воздушного дефекта у токопроводящей жилы при напряжении 4 и 5 кВ на изоляции; кривые 4 и 5 – при расположении воздушного дефекта вблизи внешней поверхности изоляции при напряжении 5 и 10 кВ на изоляции соответственно. Как показывают результаты расчета, при подаче испытательного напряжения в первую очередь активизируются технологические дефекты, расположенные у токопроводящей жилы. При напряжении на изоляции 5 кВ ЧР возникают во включениях толщиной от 200 мкм. При напряжении 10 кВ воздушные включения, расположенные вблизи поверхности изоляции, не активизируются (см. рис. 4, кривая 5),

Эффективность выявления технологических дефектов в твердой изоляции по характеристикам ЧР. На рис. 5 приведена осциллограмма ЧР в образце силового кабеля на напряжение 3 кВ (сечение токопроводящей жилы 25 мм², толщина полиэтиленовой изоляции 3 мм). В толще изоляции имеются воздушные включения, которые активизируются при испытательном напряжении 5 кВ частоты 50 Гц. Амплитуда ЧР не превышает 10 пКл, что соответствует требованиям стандарта [11]. Следует учесть, что при рабочем напряжении частичные разряды в кабеле не возникают.

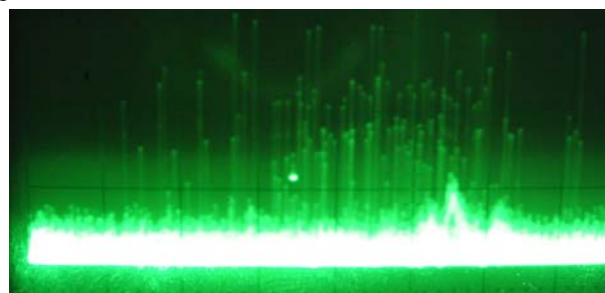


Рис. 5. Осциллограмма ЧР в толще твердой полиэтиленовой изоляции силового кабеля (метка в центре развертки – калибровочный сигнал амплитудой 2 пКл)

Экспериментальные исследования по выявлению технологических дефектов в высоковольтной композитной корпусной изоляции статорной обмотки турбо- и гидрогенераторов проведены на 5-ти макетах одинаковой толщины. Изоляция макетов выполнена стеклослюдобумажными лентами разной толщины разных производителей (по 6 образцов для каждого макета).

Метод контроля ЧР основывается, например, на использовании портативного анализатора с комплектом эпоксидно-слюдяных конденсаторов емкостью 80 пФ в качестве емкостных датчиков, которые позволяют измерять ЧР в высокочастотном диапазоне, в котором амплитуда ЧР значительно превышает амплитуду помех [8-10, 19]. Это позволяет автоматически надежно разделять ЧР и помехи. Принцип действия системы основан на детектировании импульсов напряжения частичных разрядов, возникающих внутри изоляции, посредством датчиков ЧР, с последующим их аналого-цифровым преобразованием с помощью измерителя ЧР и отображением амплитуды ЧР как положительной, так и отрицательной полярности. Следует учитывать, что измеряется максимальное напряжение импульса ЧР в мВ (см. рис. 5). Поставщики соответствующего измерительного оборудования обозначают измеренное значение не символом напряжения (U), а символом заряда (Q), считая, что между напряжением и зарядом существует очевидная связь. Коэффициент пропорциональности – электрическая емкость изоляционной системы, например, обмотки статора, которую всегда можно измерить.

Эффективный способ определить состояние изоляционной системы – сравнение результатов с базой данных [9, 10], представленных в табл. 1.

Таблица 1

Оценка состояния изоляции по максимальному значению амплитуды импульсов ЧР

Категория ЧР	Амплитуда импульсов ЧР, мВ
Незначительный	0-45
Низкий	46-98
Типичный	99-210
Умеренный	211-412

На рис. 6 приведены результаты измерений максимальной амплитуды импульсов ЧР положительной и отрицательной полярности в макетах с высоковольтной твердой композитной изоляцией на основе стеклослюдобумажных лент при напряжении 3,6 кВ (рис. 6,а) и 6 кВ (рис. 6,б).

Толщина лент: 1 – $h = 0,14$ мм, 2 – $h = 0,14$ мм, 3 – $h = 0,15$ мм, 4 – $h = 0,18$ мм, 5 – $h = 0,18$ мм. Амплитуда импульсов ЧР положительной полярности обозначена как 1, 2, ..., 5; амплитуда импульсов ЧР отрицательной полярности: 1', 2', ..., 5' соответственно. Импульсы ЧР отрицательной полярности возникают при положительной полуволне испытательного напряжения промышленной частоты, положительной – при отрицательной полуволне напряжения.

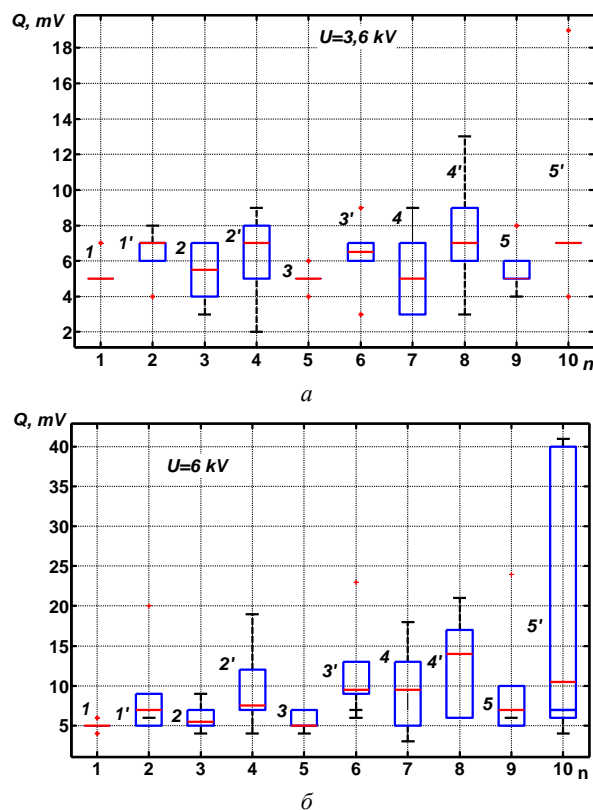


Рис. 6. Результаты статистического распределения максимальной амплитуды импульсов частичных разрядов в зависимости от приложенного напряжения промышленной частоты в композитной твердой высоковольтной изоляции

Сравнение положительных и отрицательных импульсов ЧР указывает на то, что разряды возникают именно внутри изоляции для макетов, толщина лент у которых меньше 0,18 мм (рис. 7,а). Амплитуда разрядов положительной и отрицательной полярности практически одинакова (сравни 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3', 4 и 4', рис. 6,б). Эти результаты согласуются с расчетными зависимостями (см. рис. 2,б и рис. 3). Для образцов со стеклослюдобумажной лентой толщиной 0,18 мм амплитуда импульсов отрицательной полярности практически в 4 раза превышает амплитуду импульсов положительной полярности (сравни 5 и 5', рис. 6,б).

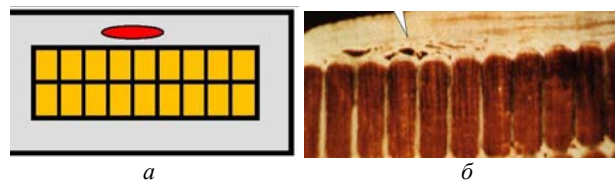


Рис. 7. Места расположения технологических дефектов в композитной изоляции обмоток электрических машин

Очевидно, что такое различие обусловлено местом расположения технологического дефекта в виде расслоения на границе раздела проводник – композитная изоляция (рис. 7,б). При напряжении 6 кВ амплитуда импульсов разрядов достигает верхнего значения 40 мВ в категории ЧР как незначительный уровень (см. табл. 1).

Выводы. Получены зависимости от толщины воздушного включения его пробивного напряжения и

расчетных напряжений на включениях для плоской и цилиндрической модели изоляции. При одинаковых приложенных напряжениях к высоковольтной изоляции в последнем случае активизируются воздушные включения меньшей толщины в сравнении с плоской конструкцией.

Определены возможные значения напряжения начала частичных разрядов и диапазон активизируемых технологических дефектов в зависимости от места расположения воздушного включения в конструкции силового кабеля коаксиальной конструкции.

Показана эффективность выявления технологических дефектов в твердой высоковольтной композитной корпусной изоляции статорной обмотки турбо- и гидрогенераторов. На основании сравнения амплитуды импульсов частичных разрядов положительной и отрицательной полярности установлено место расположения технологических дефектов в конструкции.

Результаты проведенных исследований подтверждают эффективность регистрации частичных разрядов в высоковольтной твердой изоляции для выявления дефектов на технологической стадии изготовления электроизоляционных конструкций, а также для настройки самого технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
2. Беспрозванных А.В., Мирчук И.А., Кессаев А.Г. Технологические параметры режима охлаждения полимерной изоляции силовых кабелей // *Электротехника і електромеханіка*. – 2019. – №3. – С. 44-49. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.07.
3. Рао Натти С., Шотт Ник Р. Технологические расчёты в переработке пластмасс / Практическое руководство. Пер. с англ. под ред. О.И. Абрамушкиной. – СПб.: Профессия. 2013. – 200 с.
4. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / В.Г. Огоньков и др.; под. ред. В.Г. Огонькова, С.В. Серебряникова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 304 с.
5. Пак В.М., Трубочев С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 416 с.
6. Беспрозванных А.В., Бойко А.Н., Рогинский А.В. Влияние диэлектрического барьера на распределение электрического поля в высоковольтной изоляции электрических машин // *Электротехника і електромеханіка*. – 2018. – №6 – С. 63-67. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.09.
7. IEEE Standards 1434. Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery. IEEE Park Avenue, New York, USA. – 2014. – 89 p.
8. CIGRE Working Group A1.01.06 Application. Of on-line partial discharge tests to rotating machines. CIGRE. December 2010. 58 p.
9. Iris Power TGA-BTM «Periodic On-line Partial Discharge Monitoring Using a Portable Instrument for Motors and High Speed Turbine Generators». Iris Power Ver 5. 08/10. Canada, 2010.
10. Interpretation of PD results – on-line testing. Version 3.2 Iris QMS 08/10. Ver. 3.2. 2008.
11. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоля-

цией на сверхвысокие напряжения. – К.: ИЭД НАНУ, 2013. – 552 с.

12. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979.

13. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. – 55 с.

14. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Методика измерения дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов // *Электричество*. – 1990. – №1. – С. 71-74.

15. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов // *Электричество*. – 1991. – №5. – С. 5-9.

16. Беспрозванных, А. Г., Кессаев А.Г. Анализ структуры поля и обоснование напряжений диагностики по частичным разрядам изоляции экранированных витых пар // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №6. – С. 61-65. doi: 10.20998/2074-272X.2014.6.11.

17. Беспрозванных А.В. Способы представления дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов в твердой изоляции // *Технічна електродинаміка*. – 2011. – №4. – С. 12-19.

18. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №1. – С. 23-29.

19. IEC Standard 60270. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. IEC, 2000. – 55 p.

REFERENCES

1. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Kholodnyy S.D. *Osnovy kabelnoy tehniki* [Basics of cable technology]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 432 p. (Rus).
2. Bezprozvannyh G.V., Mirchuk I.A., Kyessayev A.G. Technological parameters of the cooling mode of polymer insulation of power cables. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.3, pp. 44-49. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.07.
3. Rao Natti S., Shott Nik R. *Tekhnologicheskie raschety v pererabotke plastmass* [Technological calculations in plastics processing]. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2013. 200 p. (Rus).
4. Ogonkov V.G., Serebryannikov S.V. *Elektroizoliatsionnye materialy i sistemy izoliatsii dlia elektricheskikh mashin. V dvukh knigakh. Kn. 2* [Electrical insulation materials and insulation systems for electrical machines. In 2 books. Book 2]. Moscow, Publishing house MEI, 2012. 304 p. (Rus).
5. Pak V.M., Trubachev S.G. *Novye materialy i sistemy izoliatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin* [New materials and systems for isolation of high-voltage electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2007. 416 p. (Rus).
6. Bezprozvannyh G.V., Boyko A.N., Roginskiy A.V. Effect of a dielectric barrier on the electric field distribution in high-voltage composite insulation of electric machines. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.6, pp. 63-67. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.09.
7. *IEEE Standards 1434. Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery*. IEEE Park Avenue, New York, USA. 2014. 89 p.
8. CIGRE Working Group A1.01.06 Application. *Of on-line partial discharge tests to rotating machines*. CIGRE. December 2010. 58 p.
9. Iris Power TGA-BTM. *Periodic On-line Partial Discharge Monitoring Using a Portable Instrument for Motors and High Speed Turbine Generators*. Iris Power Ver 5. 08/10. Canada, 2010.
10. *Interpretation of PD results – on-line testing. Version 3.2* Iris QMS 08/10. Ver. 3.2. 2008.
11. Shidlovsky A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. *Kabeli s polimernoй izoliatsiei na*

sverkhvysokie napriazheniia [Polymer insulation cables for ultra-high voltages]. Kyiv, IED of NASU Publ., 2013. 552 p. (Rus).

12. Kuchinsky G.S. *Chastichnye razriady v vysokovol'tnykh konstruktsiiaakh* [Partial discharges in high voltage structures]. Leningrad, Energiia Publ., 1979. (Rus).

13. Vdoviko V.P. *Chastichnye razriady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniia* [Partial discharges in diagnosing high-voltage equipment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 55 p. (Rus).

14. Naboka B.G., Bezprozvannykh G.V., Gladchenko V.Ya. Method of measuring the differential amplitude spectra of partial discharge pulses. *Electricity*, 1990, no.1, pp. 71-74. (Rus).

15. Naboka B.G., Bezprozvannykh G.V., Gladchenko V.Ya. Diagnostics of high-voltage insulation using multichannel analyzers. *Electricity*, 1991, no.5, pp. 5-9. (Rus).

16. Bezprozvannykh G. V., Kessaev A. G. Analysis of the field structure and justification of the diagnostics voltage for partial insulation discharges of shielded twisted pairs. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.6, pp. 61-65. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.6.11.

17. Bezprozvannykh A.V. Ways of representation of differential peak spectra of pulses of partial discharges in solid insulation. *Technical electrodynamics*, 2011, no.4, pp. 12-19. (Rus).

18. Bezprozvannykh A.V. High electric field and partial discharges in bundled cables. *Technical electrodynamics*, 2010, no.1, pp. 23-29. (Rus).

19. IEC Standard 60270. *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*. IEC, 2000. 55 p.

Поступила (received) 05.04.2019

Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,

Кессаев Александр Геннадиевич¹, к.т.н.,

Мирчук Игорь Анатольевич², аспирант,

Рогинский Александр Владимирович³, аспирант,

¹ Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +38 057 7076010,

e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

² Приватное акционерное общество

«Украинский научно-исследовательский институт

кабельной промышленности»,

71101, Запорожская обл., Бердянск, ул. Промышленная, 2-Р,

тел/phone +38 066 8288554,

e-mail: garik710@ukr.net

³ Государственное предприятие «Завод «Электротяжмаш»,

61089, Харьков, Московский проспект, 299,

e-mail: roginский.av@gmail.com

G.V. Bezprozvannykh¹, A.G. Kyessayev¹, I.A. Mirchuk²,

A.V. Roginskiy³

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² Private Joint Stock Company «Ukraine Scientific-Research
Institute of Cable Industry»,
2-Р, Promychnennaya Str., Berdyansk, Zaporozhye Region,
71101, Ukraine.

³ SE Plant Electrotyazhmash,

299, Moskovsky Ave., Kharkiv, 61089, Ukraine.

Identification of technological defects in high-voltage solid insulation of electrical insulation structures on the characteristics of partial discharges.

Introduction. High-voltage insulation systems always have some background level of the partial discharges, which does not have any significant effect on the life of the electrical insulation design. At the same time, partial discharges destroy high-voltage insulation, leading to a carburization zone around the defect. This is the «hidden» period of development of the defect. The development of a defect zone, sooner or later, leads to an arc breakdown of the entire insulating gap.

Purpose. The substantiation of the efficiency of detection of technological defects in high-voltage solid insulation of electrical insulating structures according to the characteristics of partial discharges. **Methodology.** The conditions for the occurrence of partial discharges in the thickness of the polymer insulation are considered. The possible values of the voltage of the beginning of partial discharges are determined for a model of a cylindrical air gap near the conductor of a power cable. It is shown that with the same applied voltages to high-voltage insulation, in the latter case, air inclusions of smaller thickness are activated in comparison with a flat structure.

Practical value. The efficiency of detection of technological defects in solid composite case insulation of the stator winding of turbo- and hydrogenerators is shown. Based on the comparison of the amplitude of the pulses of partial discharges of positive and negative polarity, the estimated location of the technological defects in the insulation has been established. References 19, figures 7, table 1.

Key words: technological defects, partial discharges, voltage of the start of partial discharges, glass-mica paper tape, amplitude of pulses of partial discharges, location of the defect.