Modelling of Electrical Discharge Processes for Optimization of Corona-Protection System of High Voltage Rotating Machines Insulation

Andreev A.M., Andreev I.A., Belko V.O., Reznik A.S., Smirnov A.N., Stepanov A.A.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St.Petersburg, Russia

Abstract. The aim of this work is to study the influence of technological defects in stator windings electrical insulation system on the inception of partial discharges in the stator slot of air-cooled electric rotating machines. By means of Comsol Multiphysics finite-element modeling software the electrophysical processes in high-voltage stator insulation with corona-protection coatings are numerically studied for both Resin-Rich (RR) and vacuum pressure impregnation (VPI) technologies. The most important results are the conclusions made about the possibility of slot partial discharges in the insulation system of stator windings, taking into account the possible types and sizes of technological defects of the anticorona coating in the slot area. The verification of the results of mathematical modeling by experimental study of slot partial discharges on test samples with artificial defects of anti-corona coatings made possible to establish the most dangerous types and geometric sizes of defects, which lead to the inception of slot partial discharges, which determined the practical significance of the results. Quantitative dependencies between the geometric dimensions of coating defects and the characteristics of slot partial discharges (inception voltage, maximum apparent charge, and average current) are experimentally established. The obtained data have practical importance for the development of the optimal technology for manufacturing the system of electrical insulation of the stator winding of high-voltage air-cooled electric machines.

Keywords: electric machine, stator slot, anti-corona system, slot partial discharge. DOI: 10.5281/zenodo.3898227 UDC: 621.3.048

Modelarea proceselor de descărcare electrică pentru optimizarea sistemului de protecție corona pentru izolarea mașinilor de înaltă tensiune

Andreev A. M., Andreev I.A., Belko V.O., Reznik A.S., Smirnov A.N., Stepanov A.A.

Universitatea Politehnică din Sankt Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a studia efectul tehnologiei de fabricație a sistemului de izolare electrică a înfăsurării statorului, în special a defectelor tehnologice, în conditiile aparitiei descărcărilor partiale în crestăturiile statorului masinilor rotative electrice răcite cu aer. Acest obiectiv este atins prin utilizarea pachetului software de modelare a elementelor finite Comsol Multiphysics, cu ajutorul căruia se realizează un studiu numeric al proceselor electrofizice în izolația crestăturilor a înfășurărilor statorice cu acoperire anti-coronă, realizate folosind tehnologii de sertizare hidrostatice (Resin Rich) și impregnarea unor tije individuale cu aplicarea descărcărilor în vid (Single Bar VPI). Rezultatele cele mai importante constau în lansarîn izolația crestăturiilor statorului, ținând cont de tipurile și dimensiunile posibile ale defectelor tehnologice ale învelisului anticorona din regiunea crestăturii. S-a execiutat verificarea rezultatelor modelării matematice prin studiul experimental al descărcărilor parțiale în crestătură în mostre prototip a izolației cu defecte artificiale ale sistemelor anti-corona ce a făcut posibilă stabilirea celor mai periculoase tipuri și dimensiuni geometrice de defecte care duc la apariția descărcărilor parțiale în crestătură, ceea ce și determină semnificația practică a rezultatelor investigației. Au fost stabilite experimental relatii cantitative între dimensiunile geometrice ale defectelor în acoperire si caracteristicile descărcărilor partiale în crestătură (tensiunea de apariție, saarcina electrică aparentă maximă sivaloarea medie a curentul descărcărilor parțiale). Legițățile stabilite au o semnificație practică pentru testarea tehnologiei optime aplicabile pentru fabricarea sistemului de izolare electrică a înfășurării statorului mașinilor electrice de înaltă tensiune cu răcire cu aer.

Cuvinte-cheie: mașină electrică, crestătrura statoului, sistem anti-corona, descărcare parțială.

© Андреев А.М., Андреев И.А., Белько В. О., Резник А.С., Смирнов А.Н., Степанов А.А., 2020

Моделирование электроразрядных процессов для оптимизации коронозащитной системы изоляции высоковольтных машин

Андреев А.М., Андреев И.А., Белько В.О., Резник А.С., Смирнов А.Н., Степанов А.А

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является изучение влияния особенностей технологии изготовления системы электрической изоляции статорной обмотки, в частности, технологических дефектов, на условия возникновение пазовых частичных разрядов в пазе статора вращающихся электрических машин с воздушным охлаждением. Поставленная цель достигается за счет применения программного комплекса конечностноэлементного моделирования Comsol Multiphysics, с помощью которого произведено численное исследование электрофизических процессов в пазовой части системы изоляции статорных обмоток с противокоронным покрытием, изготовленных по технологиям гидростатического опрессования (Resin Rich) и вакуум- нагнетательной пропитки индивидуальных стержней (Single Bar VPI). Наиболее важными результатами являются сделанные выводы о возможности возникновения пазовых частичных разрядов в системе изоляции статорных обмоток с учетом возможных типов и размеров технологических дефектов противокоронного покрытия в пазовой области. Проведенная верификационная проверка результатов математического моделирования путем экспериментального исследования пазовых частичных разрядов в макетных образцах с искусственными дефектами противокоронных систем позволила установить наиболее опасные типы и геометрические размеры дефектов, приводящие к возникновению пазовых частичных разрядов, что определило практическую значимость полученных результатов. Экспериментально установлены количественные зависимости между геометрическими размерами дефектов покрытия и характеристиками пазовых частичных разрядов (напряжением возникновения, максимальным кажущимся зарядом и средним током). Установленные закономерности представляют практическое значение для отработки оптимальной технологии изготовления системы электрической изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин с воздушным охлаждением.

Ключевые слова: электрическая машина, статорный паз, противокоронная система, пазовый частичный разряд.

введение

В мировой практике в высоковольтных устройствах (кабельных муфтах, врашающихся электрических машинах и др.) с целью снижения локальной напряженности электрического поля И. тем самым предотвращения возникновения опасных типов частичных разрядов (ЧР), традиционно противокоронной применяются системы защиты. Эффективность работы таких систем определяется не только конструкцией, но также технологией изготовления и свойствами конструкционных материалов. Неоптимальная конструкция, наличие дефектов в противокоронных системах могут причиной стать возникновения ЧP. приводящих к ускоренному разрушению изоляции электротехнического устройства.

В частности, для вращающихся электрических машин наибольшее количество (более 65%) повреждений, приводящих к их преждевременному выходу из строя, связано с процессами разрядной активности в пазовых областях системы изоляции статорной обмотки [1,2].

Проблема возникновения ЧР в статорном пазе (так называемые пазовые частичные разряды), известная в мировой практике как проблема «твердого» стержня [3-5], возникла после перехода ОТ микалентной компаундированной к термореактивной изоляции, не разбухающей в процессе эксплуатации электрической машины. В воздушных зазорах, образующихся в пазе при укладке таких стержней, возникают пазовые ЧР, которые в короткий срок способны вывести из строя электрическую машину [6-Для предотвращения пазовых ЧР 9]. применяется тонкопленочное полупроводящее покрытие, наносимое на внешнюю поверхность изолированного Традиционно стержня. для ЭТОГО используются покровные лаки и ленточные материалы. наполненные проводящими (графит, сажа) мелкодисперсными частицами обеспечения [10]. Лля належного электрического контакта противокоронных покрытий с сердечником статора используется упругая гофрированная прокладка ИЗ электропроводящего термореактивного пластика (рис. 1) [11,12]. Одновременно с обеспечения функцией належного электрического контакта упругая прокладка фиксирует стержни в пазе, не допуская их вибрацию и, тем самым, снижает вероятность усиления интенсивности пазовых ЧР за счет разрушения покрытия.



Рис.1. Конструкция противокоронной системы в пазе статора вращающейся электрической машины [11,12].¹

Тем не менее, пазовые ЧР могут возникнуть в виде пробоев газовых промежутков, образующихся между стенками паза и поверхностью корпусной изоляции стержня с дефектным или неправильно изготовленным противокоронным покрытием. Существуют три основных причины возникновения таких ЧР [6]:

• некачественно изготовленное пазовое покрытие, не обеспечивающее выполнения своей функции из-за чрезмерно высокого электрического сопротивления (выше 25 кОм) или из-за плохого качества наложения покрытия на пазовую часть стержня;

 плохой электрический контакт пазового покрытия с сердечником статора изза наличия изолирующей пленки;

• вибрация ослабленных стержней в пазах, приводящая к истиранию и разрушению пазового проводящего покрытия.

На практике бывает трудно определить, какой из этих трех процессов инициировал ЧР, так как внешние проявления могут быть подобны и один процесс может вызывать другой или процессы могут протекать одновременно. Практически неизученными являются вопросы, связанные с влиянием возможных технологических дефектов на процессы возникновения пазовых ЧР. Тем не менее, после возникновения пазовые ЧР начинают интенсивно разрушать как поверхность противокоронного слоя, так и поверхность гофрированной прокладки, что может привести к катастрофическому снижению ее механических свойств, вплоть до полной потери способности фиксировать стержни в пазе (рис. 2).



Рис.2. Фотография упругой гофрированной проводящей прокладки после воздействия пазовых ЧР.²

В результате возникающей вибрации стержней в пазовой области могут возникнуть чрезвычайно опасные вибро-искровые разряды [6,12-14], в короткий срок приводящие к выходу из строя систему изоляции статорной обмотки.

В связи с вышеизложенным, на этапе конструирования и выбора конструкционных материалов для противокоронных систем актуальным является установление граничных условий, определяющих отсутствие вероятности возникновения разрядов в пазах статора.

I. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТАТОРНОЙ ОБМОТКЕ

C исключения разрядной целью активности в пазовой области статорной обмотки необходимо на этапе конструирования пазовой противокоронной системы И отработки технологии ee изготовления произвести работы по расчету условий (особенности граничных конструкции технологии. свойства И конструкционных материалов), обеспечивающих отсутствие пазовых ЧР в процессе эксплуатации.

Для этого в программном комплексе конечностноэлементного моделирования Comsol **Multiphysics** разработаны геометрические модели и произведено численное исследование электрофизических процессов конструкции в пазовой противокоронной системы изоляции статорной обмотки мощного турбогенератора с воздушным охлаждением. На основании этих расчетов были сделаны выводы о возможности возникновения пазовых ЧР в системе изоляции статорных обмоток в условиях различных электрофизических свойств компонентов противокоронной пазовой системы, вариантов конструкции с учетом возможных типов и размеров технологических дефектов.

При расчете электрофизических процессов противокоронной пазовой системе В обмотки статорной турбогенератора с воздушным охлаждением использовалась геометрическая модель (рис. 3), размеры и физические свойства компонентов которой (относительная диэлектрическая проницаемость є и объемное удельное сопротивление ρ_{v}) соответствовали реальной конструкции системы изоляции турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 200 МВт. Расчет напряженности электрического проводился поля для различных геометрических размеров статорного электрофизических паза И характеристик элементов пазового уплотнения. Для всех расчетных вариантов односторонняя толщина корпусной изоляции составляла 3,54 мм, величина $\varepsilon = 5$, а величина ρ_v внешнего противокоронного покрытия изменялась в пределах от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4$ Ом·м.



1.-плетеный стержень, 2- корпусная изоляция с внутренним коронозащитным покрытием, 3- внешнее противокоронное покрытие, 4- упругая проводящая гофрированная прокладка, 5- защитная полупроводящая эмаль, 6- лист сердечника, 7- изоляционная эмаль между листами сердечника.
Рис. 3. Схематическое изображение заполнения статорного паза (используемая геометрическая модель).³

Расстояние внешней поверхности от корпусной изоляции поверхности ло статорного паза (пазовый зазор) изменялось от 0,5 до 1,0 мм. Выбор толщины упругой гофрированной прокладки производился из условия, чтобы во всех расчетных вариантах остаточный зазор между стенкой паза и стержнем под гребнем волны прокладки после уплотнения не должен превышать 0,2 мм. Для прокладки гофрированной упругой учитывался ряд дополнительных геометрических параметров, а именно, шаг волны (50 мм) и полуширина зоны контакта волнистой прокладки со стенкой паза (12 мм).

При расчете электрического поля в пазе выбирались следующие граничные условия:

• граница стержня – переменный (50 Гц) потенциал заданного значения номинального

напряжения ($U_{\text{ном}}$);

• нижняя граница листов статора – нулевой потенциал;

• левая и правая границы расчетной области — условия нулевой нормальной составляющей электрического тока.

Расчетная сетка строилась для области, ограниченной сверху и снизу линиями потенциала $U_{\rm HOM}$ и U = 0, т. к. именно в этой зоне происходят исследуемые процессы. Минимальный размер элемента расчетной сетки составлял 10^{-8} м.

Для оценки влияния технологических дефектов на процессы возникновения пазовых ЧР в системе изоляции статорной обмотки был проведен расчет электрического поля с использованием модифицированной

³ Appendix 1

геометрической модели, представленной на рис. 4.



Рис.4. Схематичное изображение геометрической модели дефектного пазового уплотнения.⁴

Для определения условий возникновения пазовых ЧР и поверхностных разрядов в дефектах при моделировании оценивались

нормальная составляющая напряженности электрического поля в воздушном зазоре и тангенциальная составляющая напряженности электрического поля по корпусной поверхности изоляции с отсутствующим противокоронным покрытием. Результаты расчета нормальной составляющей напряженности электрического поля в воздушном зазоре при различных размерах дефекта покрытия приведены на рис.5. Как видно, условия для возникновения пазовых ЧР создаются при увеличении линейного размера дефекта покрытия выше 3 мм, т.к. при этих значениях величина напряженности зазоре превышает в теоретическое значение пробивной напряженности воздушного зазора В соответствии с законом Пашена [15-17], что значению соответствует расчетному напряженности возникновения ЧР (Енчр).



Рис. 5. Зависимость нормальной составляющей электрического поля в пазовом уплотнении от диаметра дефекта. ⁵

Расчеты тангенциальной составляющей напряженности электрического поля и потенциала на поверхности свободной от полупроводящего слоя изоляции показали, что для дефектов диаметром более 1 мм существует вероятность возникновения

поверхностных разрядов в дефектах. На рис.6 представлено семейство кривых, иллюстрирующих распределение электрического потенциала на поверхности дефекта в зависимости от его геометрических размеров.

^{4,5} Appendix 1



Рис. 6. Распределение электрического потенциала на поверхности дефекта противокоронного покрытия. ⁶

Критерий для потенциала возникновения поверхностных разрядов составлял 1,6 кВ в середине дефекта [9]. Таким образом, область, которой вероятность возникновения в поверхностных разрядов незначительна, она выделена на рис. 6. На основании расчета суммарного поверхностного заряда на поверхности дефекта были сделаны оценки величины максимального кажущегося заряда поверхностных ЧР в зависимости от размера дефекта (рис. 7). Как видно, при увеличении

диаметра повреждения поверхности более 2 величина кажущегося MM заряда поверхностных ЧР превышает 2000 пКл, что привести существенному может к противокоронной разрушению системы. Следовательно, ЭТИ результаты также подтверждают, что высокую опасность представляют дефекты с диаметром более 2 MM.



Рис. 7. Расчетная зависимость кажущегося заряда поверхностных ЧР, развивающихся в дефектах противокоронного покрытия.

II. Экспериментальное исследование разрядной активности

Для верификации результатов численного расчета электрофизических процессов в пазе статора, производилось экспериментальное исследование разрядной активности на макетах статорных стержней, внешнее пазовое противокоронное лаковое покрытие имело искусственно созданное повреждение поверхности круглой формы. Диаметр дефектов варьировался в пределах от 1,5 до 12 мм. Макет стержня помещался в «имитатор статорного паза» [18,19], и уплотнялся гофрированной проводящей прокладкой, так чтобы остаточный зазор между стенкой имитатора и макетом не превышало 0,2 мм.

Измерение ЧР проводилось электрическим методом в соответствие со стандартами [20-22] по схеме с последовательно соединенным измерительным сопротивлением и соединительным конденсатором. В качестве измерителя ЧР использовался цифровой комплекс СКИТ ЧР. На начальном этапе определялись значения напряжения возникновения ЧР (U_{НЧР}) для каждого исследованного макетного образца (рис. 8) путем ступенчатого подъема испытательного напряжения (величина ступени – 1000 В, время выдержки 2 минуты) при одновременном измерении ЧР на каждой ступени. Было установлено, что увеличение площади дефекта приводит к практически линейному снижению величины напряжения возникновения ЧР.



Рис. 8. Зависимость напряжения возникновения ЧР в макетных образцах от диаметра искусственных дефектов. ⁸

На последующих этапах регистрировались интегральные характеристики ЧР в каждом из исследуемых макетов при испытательном напряжении $U_{\rm ном}$ (12 кВ). Для получения статистически значимых и сопоставимых экспериментальных результатов, время измерения ЧР составляло 5000 с. В виду того, что импульсы ЧР, возникающие в дефектах, имеют стохастический (случайный) характер, т.е. все их параметры существенно меняются во времени и имеют большой случайный разброс, регистрировались точечные амплитудно-фазовые спектры ЧР в виде массива данных $n_{iчP} - q_{iчP} - \phi_{iчP}$. В этих спектрах информация регистрировалась в двухмерных координатах $q_{\rm ЧP} = f(\varphi_{\rm ЧP})$, где каждый зарегистрированный импульс ЧР $n_{i\rm ЧP}$ наносился в виде точки в момент его появления по фазе напряжения $\varphi_{i\rm ЧP}$ с соответствующей амплитудой (величиной кажущегося зарада) $q_{i\rm ЧP}$ (рис. 9). Последующая математическая обработка этих спектров позволяла определить величину максимального кажущегося заряда ЧР $q_{\rm ЧPmax}$, соответствующего частоте повторения выше 10 имп/с [20] (рис. 10) и средний ток ЧР $I_{\rm cp}$ (рис. 11).

⁸ Appendix 1



Рис. 9. Амплитудно-фазовые спектры ЧР, развивающихся в макетных образцах с искусственным дефектом различной площади при U_{ном}.⁹

Как следует из амплитудно-фазовых спектров, увеличение площади искусственного дефекта приводит к росту кажущегося заряда и, главным образом, к существенному увеличению частоты повторения импульсов ЧР. При малой площади повреждения противокоронного покрытия (d = 1,5 мм) наблюдаются единичные импульсы ЧР, симметрично возникающие на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения. Начиная с диаметра более 4 мм фиксируется существенный рост интенсивности ЧР, при этом изменяется форма амплитудно-фазовых спектров. Они становятся несимметричными с преимущественным расположением большинства зарегистрированных импульсов на отрицательном полупериоде. Хорошо известно [4,21,23,24], что такие спектры характерны для пазовых ЧР. Следовательно, для дефектов большой площади существует высокая вероятность формирования пазовых ЧР, переходящих в скользящие разряды по поверхности корпусной изоляции. Об этом же свидетельствует характер графиков зависимостей максимального кажущегося заряда (рис. 10) и среднего тока ЧР (рис. 11) от диаметра искусственного дефекта.



Рис.10. Зависимость q = f(d) для модельных образцов с искусственным дефектом. ¹⁰



Рис.11. Зависимость $I_{cp} = f(d)$ для модельных образцов с искусственным дефектом. ¹¹

Таким образом, экспериментальным путем подтверждены результаты математического моделирования электрофизических процессов в пазовой противокоронной системе статорной обмотки турбогенераторов с воздушным охлаждением.

III. Выводы

1. Разработаны численные модели и проведено математическое моделирование пазовой противокоронной системы высоковольтных турбогенераторов с воздушным охлаждением.

2. Изучено влияние технологических дефектов на распределение электрического поля в пазовой противокоронной системе, на основе чего определены условия для возникновения опасных типов пазовых разрядов. Установленные закономерности представляют практическое значение для отработки оптимальной технологии изготовления системы электрической изоляции статорной обмотки.

3. По результатам экспериментальной проверки путем регистрации ЧР в макетных образцах противокоронных систем с искусственными дефектами наглядно продемонстрирована необходимость предварительного математического моделирования электрофизических процессов в системе изоляции высоковольтного турбогенератора с воздушным охлаждением.

АРРЕNDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. A design of anticorona system in the stator slot of a rotating electric machine.

²Fig. 2. An image of the side ripple packers after PD impact.

³Fig. 3. A schematic image of the stator slot (1 - stator rod, 2 - insulation with anti-corona coating, 3 - external anti-corona coating, 4 - semiconductive elastic side ripple packers, 5 - semiconductive protective coating, 6 - core sheet, 7 - insulating coating between the core sheets).

⁴Fig. 4. Schematic image of a geometric model of a anti-corona coating defect in slot area.

⁵Fig. 5. The dependence of the normal component of the electric field in the slot on the diameter of the defect.

⁶Fig. 6. Electric potential distribution on the surface of the semiconductive coating defect.

⁷**Fig. 7.** Estimated dependence of the apparent charge of surface PDs developing in defects of the anti-corona coating.

⁸Fig. 8. The dependence of the PD inception voltage in test samples on the artificial defect diameter.

⁹**Fig. 9.** The phase-resolved partial discharge pattern of internal discharge activity developing in test samples with an artificial defect of various sizes at nominal voltage.

¹⁰Fig. 10. Dependence q = f(d) for model samples with an artificial defect.

¹¹Fig. 11. Dependence $I_{av} = f(d)$ for model samples with an artificial defect.

Литература (References)

- Brush K., Hilmer T. Corona Protection in Rotating High Voltage Machines// Inductica, 2006, Berlin, p.1/6 – 6/6.
- [2] CIGRE Study Committee SC11, EG11.02, "Hydrogenerator Failures – Results of the Survey", 2003.
- [3] Vakser B.D., Nindra B.S. Insulation Problems in High Voltage Machines// IEEE Trans. Energy Conversion. 1994, v. 9, pp. 143-149.
- [4] Hudon C., Belec M. Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics // IEEE Trans. Dielec. Elect. Insulation. 2005, v. 12, pp. 297-319.
- [5] G.C. Stone. Electrical Insulation for Rotating Machines. A. John Wiley INC. 2004. 370 p.
- [6] Stone G. C. Impact of Slot Discharge and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators//IEEE Electr. Insul. Mag., 2008. v.24, No 5. p.14-20.
- [7] Maudy W.H. Deterioration Mechanisms in Recent Air Cooled Turbine Generators// Proc. ASME Power, Atlanta, 2006, p.1-7.
- [8] Emery F.T. The Application of Conductive and Stress Grading Tapes to Vacuum pressure Impregnated High Voltage Stator Bars// IEEE Electr. Insul. Mag., 1996. July. pp. 15-22.
- [9] Wilson A. Slot Discharge Damage in Air Cooled Stator Winding// IEE Proceeding-A, 1991,v.138, No3, pp.153-158.

¹¹ Appendix 1

- [10] C. V. Maughan, "Root-cause diagnostics of generator service failures," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005., San Antonio, TX, 2005, pp. 1927-1935.
- [11] Jackson R., Wilson A. Slot-Discharge Activity in Air-Cooled Motor and Generators//IEE Proc. 1982, v.129, No 3 p. 159-167.
- [12] Liese M., Brown M. "Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking on High Voltage Windings" // IEEE Trans. Dielec. Elect. Insulation. 2008, v. 15, No 4, pp. 927-932.
- [13] Liese M. Vibration Sparking, an Ignored Damage Mechanism of High Voltage Windings// Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, pp. 1-6.
- [14] Xia Y. Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots// IEEE Trans. Dielec. Elect. Insulation. 2013, v. 20, No 1, pp. 42-53.
- [15] Bartnikas R. Partial Discharge. Their Mechanism, Detection and Measurement// IEEE Trans. Dielec. Elect. Insulation. 2002, v. 9, pp. 763–808.
- [16] Mason J.H. Discharges// IEEE Trans. Elect. Insulation. 1978, v. 13, pp. 211 – 238.
- [17] Repp H., Nissen K.W., Rohl P. Partial Discharges in Voids: Inception Conditions and Dielectric Limits// Siemens Forsch, 1983, Bd 12, No 2, pp. 101-106.
- [18] Andreev I.A., Otsenka sostoyaniya sistemy izolyatsii statornoj obmotki vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin po rezul'tatam izmereniya

Сведения об авторах.



Андреев Александр Михайлович. СПбПУ. Доктор технических наук. Область интересов: высоковольтная техника E-mail: alexandre1949@yahoo.com





Андреев Иван Александрович. СПбПУ. Кандидат технических наук. Область интересов: численное моделирование E-mail: andreev.ia@gmai.com

Степанов Александр Андреевич. СПбПУ. Область интересов: электрическая изоляция E-mail: <u>Step-a-nov@yandex.ru</u> statisticheskikh harakteristik chastichnykh razryadov [Assessing the state of the insulation system of the stator winding of high-voltage electrical machines according to the results of measuring the statistical characteristics of partial discharges]/ I.A. Andreev, V.V.Amosov, Yu.Z.Lyakhovskij // Elektrotekhnika – Electrical Engineering. - №3.- 2011.-pp.12-16.

- [19] Farahani M. Partial Discharge and Dissipation Factor Behavior of Model Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines under Different Stresses// IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, v.21, pp. 5-20.
- [20] IEC 60270 High-voltage Test Techniques Partial Discharge Measurements, 2000, 52 p.
- [21] IEC TS 60034-27 2000 Rotating electrical machines –Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines.
- [22] IEC TS 60034-27-2 2012 Rotating electrical machines -Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines.
- [23] Belec M., Hudon C., Nguyen D.N. Statistical Analysis of Partial Discharge Data// Conf. Rec. Int. Symp. on Elec. Insul., 2006, pp. 122-125.
- [24] Sahoo N.C., Salama M.M.A., Bartnikas R. Trends in Partial Discharge Pattern Classification: A Survey// IEEE Trans. Dielec. Elect. Insulation. 2005, v.12, pp. 248–268.







Белько Виктор Олегович. СПбПУ. Кандидат технических наук. Область интересов: электрофизика, моделирование E-mail: <u>vobelko@spbstu.ru</u>

Резник Александр Сергеевич. СПбПУ. Кандидат технических наук. Область интересов: диагностика электрической изоляции E-mail: reznik as@spbstu.ru

Смирнов Александр

Николаевич. СПбПУ. Область интересов: электрическая изоляция E-mail: <u>shuric.83@mail.ru</u>