

Моделирование разрядной активности в системе изоляции статорных обмоток турбогенераторов

**Э. Р. Маннанов^{1,2✉}, А. М. Костельов¹, В. О. Белько²,
А. М. Андреев², В. Н. Железняк¹**

¹ АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ email-mannanov@mail.ru

Аннотация. Цель статьи состоит в численном исследовании условий инициации пазовых частичных разрядов в воздушных промежутках паза статора высоковольтного турбогенератора в условиях, воспроизводящих реальную конструкцию паза статора турбогенератора мощностью 220 МВт с воздушным охлаждением; учитывающих распределение поля рабочих температур и электрического напряжения в пазу статора, изменение электрофизических свойств материалов – диэлектрической проницаемости, электрического сопротивления материалов основной изоляции и элементов системы коронозащиты, в зависимости от локальной температуры. Критерием условий инициации ПЧР служит превышение уровня напряженности электрического поля над электрической прочностью воздушного промежутка в любой локальной зоне конструкции паза статора, для чего применена нелинейная функциональная зависимость электрической прочности воздушного промежутка. Исследования выполнялись посредством моделирования паза статора в численной среде, в которой воспроизведена геометрия фрагмента конструкции паза статора. По результатам расчетов определены значения допустимого диапазона удельного объемного электрического сопротивления внешнего коронозащитного покрытия, которые позволяют обеспечить отсутствие условий возникновения ПЧР в процессе длительной эксплуатации турбогенератора; также установлено, что наиболее опасны локальное повреждение внешнего коронозащитного покрытия и локальный обрыв волнистой прокладки бокового уплотнения. Полученные результаты носят прикладной характер для использования в инженерных подразделениях с целью исследования работоспособности элементов конструкции системы коронозащиты при проработке конструктивных решений в процессе детального проектирования турбогенераторов с воздушным охлаждением.

Ключевые слова: обмотка статора, система изоляции, численное моделирование, пазовый частичный разряд

Для цитирования: Моделирование разрядной активности в системе изоляции статорных обмоток турбогенераторов / Э. Р. Маннанов, А. М. Костельов, В. О. Белько, А. М. Андреев, В. Н. Железняк // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 69–80. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-69-80.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Discharge Activity Simulation in Turbogenerators Stator Windings Insulation

E. R. Mannanov^{1,2✉}, A. M. Kostelov¹, V. O. Belko²,
A. M. Andreev², V. N. Zheleznyak¹

¹JSC «Power Machines», Saint Petersburg, Russia

²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

✉ email-mannanov@mail.ru

Abstract. The research goal is to numerically study the conditions for the initiation of partial discharge in the air gaps of the stator slot of a high-voltage turbogenerator in conditions that reproduce the actual design of the stator groove of a 220 MW air-cooled turbogenerator; taking into account the distribution of the field of operating temperatures and electrical voltage in the stator groove, changes in the electrophysical properties of materials such as dielectric constant, electrical resistance of basic insulation materials and elements of the corona protection system, depending on the local temperature. The criterion of the conditions for the initiation of the PD is the excess of the electric field strength level over the electrical strength of the air gap in any local zone of the stator slot structure, for which a nonlinear functional dependence of the electrical strength of the air gap is applied. The studies were performed by modeling the stator groove in a numerical environment in which the geometry of a fragment of the stator groove structure is reproduced. According to the results of the numerical study, the values of the permissible range of the specific volume electrical resistance of the external corona protective coating are determined, which make it possible to ensure the absence of conditions for the occurrence of PD during longterm operation of the turbogenerator, and it is also established, that the most dangerous defects are local damage to the external crown protection coating and local breakage of the ripple spring of the side seal, the results obtained are of an applied nature for use in engineering departments in order to study the operability of the structural elements of the crown protection system when working out design solutions during the detailed design of air-cooled turbo-generators.

Keywords: stator winding, insulation system, numerical simulation, slot partial

For citation: Discharge Activity Simulation in Turbogenerators Stator Windings Insulation / E. R. Mannanov, A. M. Kostelov, V. O. Belko, A. M. Andreev, V. N. Zheleznyak // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 69–80. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-69-80.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Современные тенденции в развитии мощных высоковольтных турбогенераторов направлены на повышение эксплуатационной надежности, увеличение срока службы вплоть до 60 лет и межремонтных интервалов. Однако в процессе длительной эксплуатации возможно повреждение основной изоляции высоковольтной статорной обмотки в условиях инициации разрядных процессов, что приводит к значительным проблемам при эксплуатации турбогенераторов. Известно, что к наиболее разрушительным механизмам изоляции относятся пазовые частичные разряды (ПЧР), которые могут возникать в небольших газонаполненных зазорах, подвергающихся воздействию электрического поля между стержнями и стенками паза. Обычно ПЧР не вызывает немедленного разрушения изоляции вра-

щающейся машины, но длительное воздействие разрядов может оказать разрушительное воздействие на изоляцию [1]–[3]. Согласно результатам исследований [4]–[8] оценки интенсивности разрушения изоляции под действием ПЧР различны – от 1–2 до десятков лет. Явление разрядной активности в пазу следует считать опасным и необходимо определить рекомендуемый и допустимый уровни сопротивлений короногасящих покрытий и принять меры к минимизации возникновения разрядной активности, в частности ПЧР.

В многочисленных публикациях [9]–[12] на основе численных и экспериментальных исследований данные о значениях удельного поверхностного сопротивления покрытия, необходимого для подавления ПЧР между поверхностью стержня и сердечником, существенно разнятся, ограничива-

ясь допустимыми значениями верхнего диапазона в пределах от 0.1 до 25 кОм.

Другая важная проблема заключается в отсутствии данных по исследованиям в направлении определения критичных повреждений в системе коронозащиты стержня паза статора, которые могут приводить к инициации ПЧР. В [13] представлена предварительная оценка условий инициации ПЧР на основе численного моделирования в условиях возникновения технологических дефектов локального повреждения внешнего коронозащитного покрытия, которые подтверждаются данными эксперимента с искусственными дефектами. Следует отметить, что на основе экспериментальных исследований в макетах и прототипах реальных конструкций не представляется возможным полностью воспроизвести реальную конструкцию паза статора, что и приводит к таким существенным разбросам в допустимых значениях сопротивлений. При этом численные модели не учитывают изменение пробивного напряжения воздуха в зависимости от размера воздушного промежутка при переходе к субмиллиметровым диапазонам.

Представляется целесообразным для противокоронных систем определить граничные условия инициации ПЧР, а также выявить наиболее характерные технологические отклонения и дефекты противокоронных систем, которые в процессе длительной эксплуатации могут служить источником инициации ПЧР в условиях максимально приближенных к реальной конструкции. С целью упрощения задачи и возможности дальнейшего практического применения исследования целесообразно выполнить методом численного моделирования, в условиях максимально приближенных к реальной конструкции.

1. Методы исследования. Современная конструкция системы коронозащиты статорных обмоток турбогенераторов, изготавливаемых по технологии как Resin Rich, так и Single VPI, включает пазовое коронозащитное покрытие стержней, покрытие стенок паза и боковое уплотнение, которое зачастую выполняется упругими полупроводящими прокладками (рис. 1). В представленной конструкции неизбежно возникновение зазоров различных размеров между гофрированными прокладками и полупроводящим покрытием стержня. Эти зазоры будут заполнены водородом или воздухом в зависимости от системы охлаждения турбогенератора [14], [15].

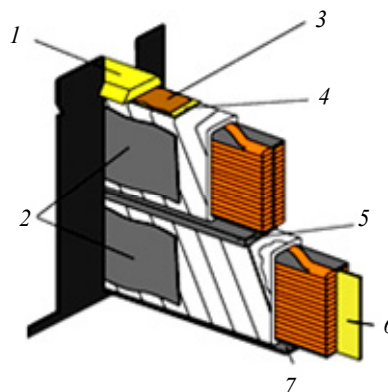


Рис. 1. Коронозащитные покрытия в изоляции:

1 – пазовый клин; 2 – боковая волнистая проводящая прокладка; 3 – верхняя волнистая прокладка; 4 – проводящая волнистая прокладка; 5 – проводящая прокладка между стержнями; 6 – вертикальный разделитель; 7 – нижняя проводящая прокладка

Fig. 1. Corona-protective coatings in insulation:

1 – slot wedge; 2 – Conductive slot side ripple spring; 3 – top ripple spring; 4 – top bar protection strip; 5 – conductive interlayer; 6 – vertical separator; 7 – conductive bottom strip

Цель исследования состоит:

- в определении допустимого диапазона сопротивлений внешнего коронозащитного покрытия для исключения ПЧР;

- выявлении наиболее опасных для инициации ПЧР повреждений элементов конструкции системы коронозащиты стержня в пазу статорной обмотки.

Критерий условий инициации ПЧР – это превышение уровня напряженности электрического поля над электрической прочностью воздушного промежутка в любой локальной зоне конструкции паза статора. Аргументами функциональной зависимости электрической прочности воздушных промежутков служат их размер и температура. Графическое представление указанной зависимости представлено на рис. 2.

Также следует учитывать, что на распределение электрического поля влияет изменение электрофизических свойств материалов – диэлектрической проницаемости, удельного электрического сопротивления корпусной изоляции, удельного сопротивления материалов элементов системы коронозащиты в зависимости от локальной температуры.

Для проведения численных исследований реализована методика проведения численных параметрических исследований электрофизических процессов в системе изоляции обмотки статора турбогенератора на основе среды Comsol Multiphysics. Расчетная зона – это система изоляции, выполненная в соответствии с описанием рис. 1. Геометрия расчетной области представляет собой фрагмент пазо-

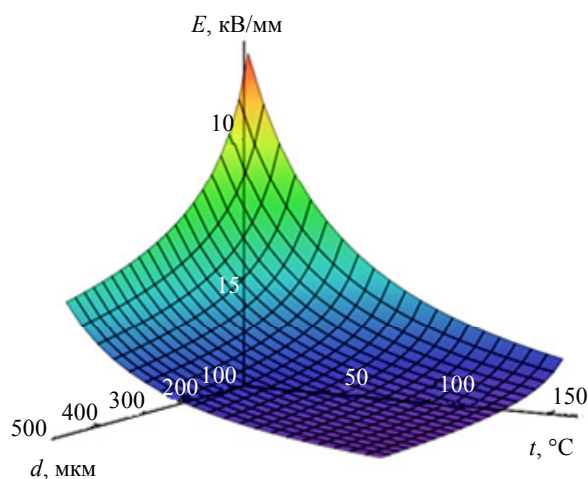


Рис. 2. Зависимость электрической прочности воздушного зазора E от его размеров d и температуры t

Fig. 2. The dependence of the electrical strength of the air gap on its size and temperature, which determines the conditions for the initiation of slot PDs in the structure

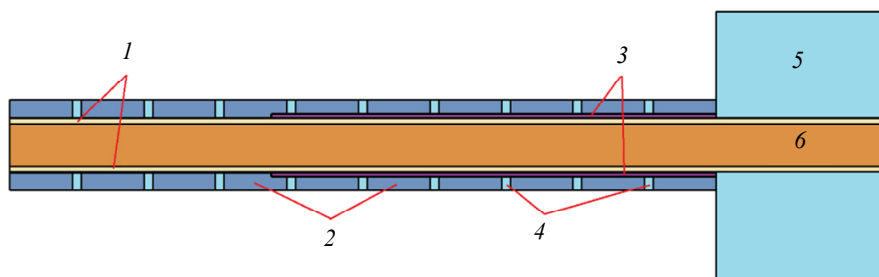


Рис. 3. Полный геометрический вид: 1 – основная изоляция; 2 – статор; 3 – коробка; 4 – вентиляционные каналы; 5 – воздух; 6 – медный стержень

Fig. 3. Full geometric view: 1 – main insulation; 2 – stator; 3 – box; 4 – ventilation ducts; 5 – air; 6 – copper rod

вой части системы изоляции. Для исследования была выбрана конструкция статора турбогенератора мощностью 220 МВт с воздушным охлаждением. Она включает в себя медный стержень (исключая отдельные жилы), корпусную изоляцию, внутреннюю и внешнюю системы коронозащиты, пазовую коробку, волнистую прокладку и воздушные зазоры, возникающие между волнистой прокладкой и стержнем или стенкой паза статора. Упрощенный вид расчетной области показан на рис. 3.

Как видно из рисунка, геометрическая модель также учитывает реальные размеры пакетов и вентиляционных каналов сердечника статора.

В данных исследований рассматривалась система изоляции обмотки статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 220 МВт, для которой исходные данные по геометрическим размерам области моделирования, распределению температур в изоляции, а также граничные условия и допущения модели были представлены ранее [11], [12] (рис. 4).

Модель позволяет выполнить расчет распределения напряженности электрического поля в любой области по длине стержня, однако для упрощения решаемой задачи целесообразно сосредоточиться на отдельных участках, которые представляются наиболее определяющими с точки зрения характера электрофизических процессов. На рис. 4 показаны сечения, вдоль линий которых выполнялись исследования и анализ результатов моделирования (линии I, II, III).

Важной особенностью расчета в модели служит введенный критерий появления частичных разрядов в воздушных промежутках.

Учитывая результаты исследований [16], где было показано, что в субмиллиметровых промежутках от 0.1 до 2.0 мм разрядные напряжения при нормальном атмосферном давлении не ложатся на кривую закона Пашена (левая ветвь), а также модифицированный закон Пашена для

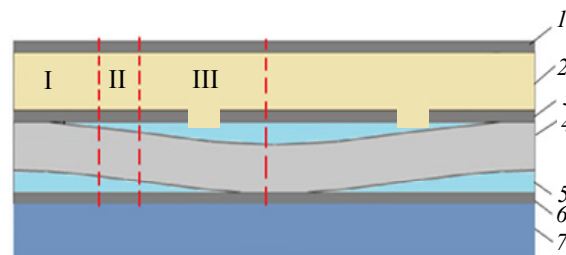


Рис. 4. Пример расчетной модели: 1 – внутренняя коронозащита; 2 – корпусная изоляция; 3 – внешняя коронозащита; 4 – волнистая уплотнительная прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза; 7 – железо статора

Fig. 4. Example of the design model: 1 – internal corona protection; 2 – main insulation; 3 – external corona protection; 4 – ripple spring; 5 – air gap; 6 – semiconductive enamel applied to slot walls; 7 – slot wall of the stator

субмиллиметровых промежутков при атмосферном давлении и температуре воздуха 20 °C [17] и с целью расширения температурного диапазона применимости модифицированного закона Пашена,

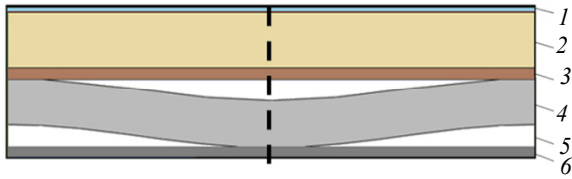


Рис. 5. Интересующая область: 1 – внутренняя защита от коронного разряда; 2 – основная изоляция; 3 – внешняя защита от коронного разряда; 4 – волнистая прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза
 Fig. 5. Area of interest: 1 – internal corona discharge protection; 2 – main insulation; 3 – external corona discharge protection; 4 – ripple spring; 5 – air gap; 6 – semiconductive enamel applied to the slot walls

можно воспользоваться поправкой на температуру, предложенной авторами [18], и результатами [19], [20] для расчета начальной напряженности ЧР в воздушном дефекте E_H . Поскольку воздушную пору будем считать замкнутой, относительная плотность воздуха будет равной единице. Тогда окончательно получим следующее выражение:

$$E_H = \frac{190\,760}{\ln(760d) - 0.68} (0.024T - 6.2)^{-1}, \quad (1)$$

где d – размер воздушного зазора, м; T – температура, К.

2. Результаты и обсуждение. В разделе приведены результаты моделирования системы изо-

ляции обмотки статора турбогенератора мощностью 220 МВт с воздушным охлаждением. В качестве примера для расчета было выбрано одно из характерных сечений. Результаты отображают напряженность электрического поля вдоль штриховой линии сверху вниз, как показано на рис. 5. На рис. 6 рассмотрено влияние температурного поля и зависимости электрофизических свойств изоляции, рис. 7 и 8 иллюстрируют влияние изменения удельного сопротивления полупроводящих (ПП) материалов и волнистой прокладки.

Оценка влияния удельного сопротивления полупроводящих покрытий на амплитуду электрической прочности по воздушным включениям показала слабую чувствительность к изменению удельного сопротивления полупроводниковых изоляционных покрытий и ярко выраженную зависимость от удельного сопротивления волнистой прокладки.

В целом, область, в которой отсутствуют пазовые частичные разряды, находится ниже плоскости, которая показана на рис. 9. Однако на практике для выработки общих требований к свойствам материалов системы коронозащиты, обеспечивающих работоспособность в изделии, требуется определить максимально допустимый порог удельного электрического сопротивления,

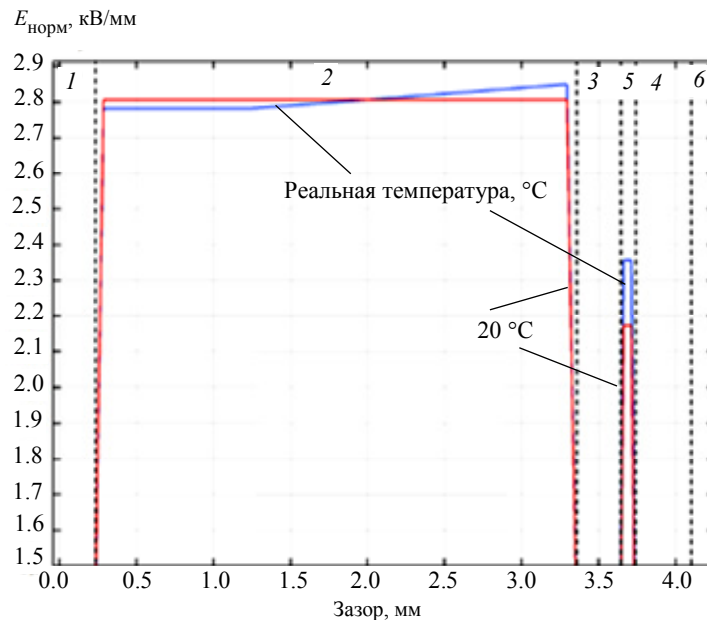


Рис. 6. Влияние температурного поля и температурных зависимостей электрических свойств изоляции на распределение электрического поля в пазе: 1 – внутренняя коронозащита; 2 – корпусная изоляция; 3 – внешняя коронозащита; 4 – волнистая прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза
 Fig. 6. The influence of the temperature field and temperature dependences of the electrical properties of insulation on the distribution of the electric field in the slot: 1 – internal corona-protection; 2 – main insulation; 3 – external corona discharge protection; 4 – ripple spring; 5 – air gap; 6 – semiconductive enamel applied to the slot walls

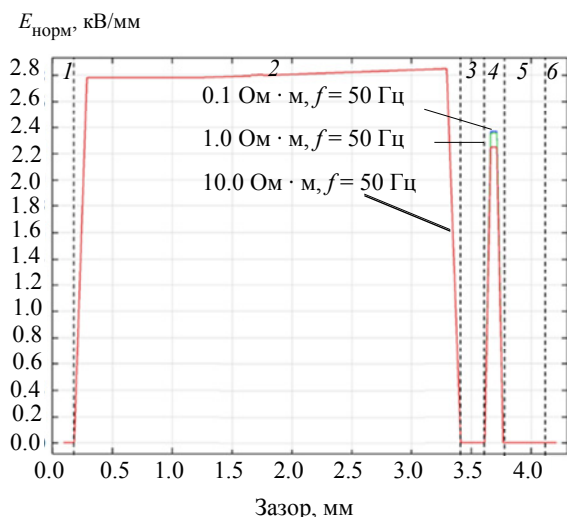


Рис. 7. Изменение удельного сопротивления коронозащитного покрытия (0.1; 1; 10 Ом · м): 1 – внутренняя коронозащита; 2 – корпусная изоляция; 3 – внешняя коронозащита; 4 – волнистая прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза

Fig. 7. Change in the resistivity of the corona protection coating 0.1; 1; 10 ohms·m): 1 – internal protection against corona discharge; 2 – main insulation; 3 – external protection against corona discharge; 4 – ripple spring; 5 – air gap; 6 – semiconductive enamel applied to the slot walls

что и было выполнено по результатам исследований. На рис. 9 показаны допустимые границы сопротивлений для материала внешнего коронозащитного покрытия и полупроводящего бокового уплотнения. На самом деле, моделирование ПЧР в воздушных зазорах изоляции помогает определить верхний предел сопротивления полупроводниковых покрытий. В то же время нижний предел определен на основе исследований условий.

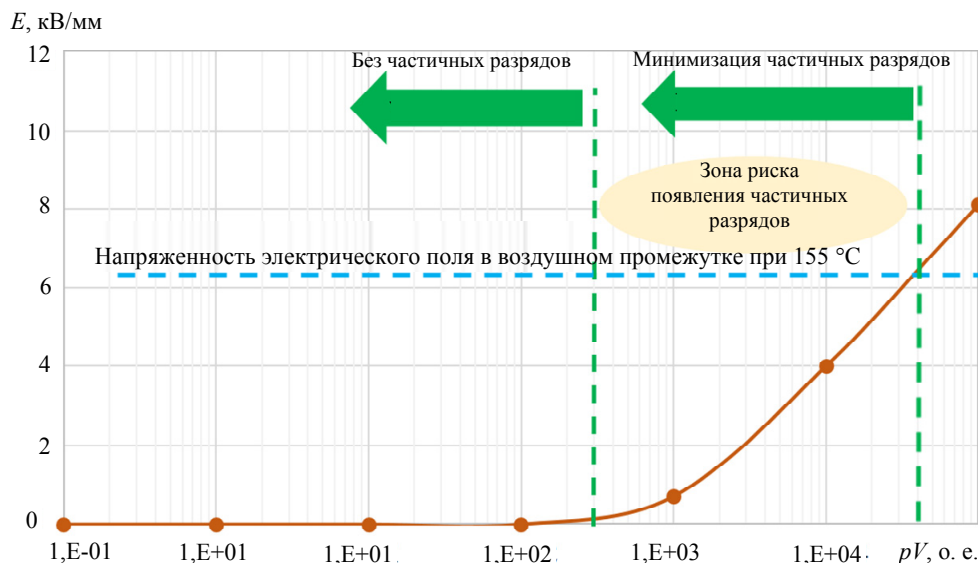


Рис. 9. Зависимость электрической напряженности E от объемного сопротивления, с указанием рекомендуемой границы стойкости полупроводящего покрытия

Fig. 9. Dependence of the electrical voltage E on the volumetric resistance pV with indication of the recommended resistance limit of the semi-conducting coating

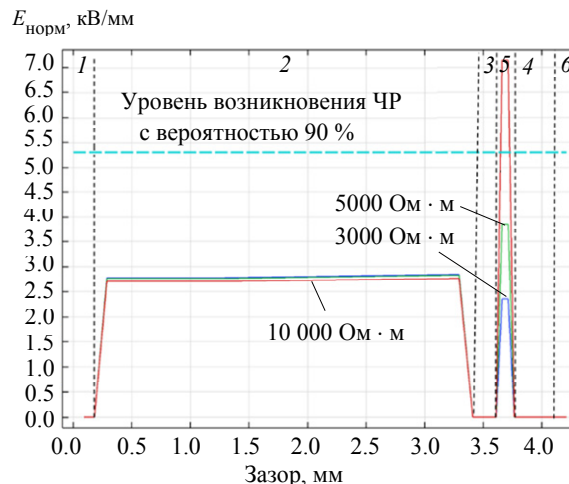


Рис. 8. Изменение удельного сопротивления волнистой прокладки ($3 \cdot 10^3$, $5 \cdot 10^3$, $10 \cdot 10^3$ Ом · м): 1 – внутренняя коронозащита; 2 – корпусная изоляция; 3 – внешняя коронозащита; 4 – волнистая прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза

Fig. 8. Changing the resistivity of a ripple spring ($3 \cdot 10^3$, $5 \cdot 10^3$, $10 \cdot 10^3$ Ohms · m): 1 – internal corona discharge protection, 2 – main insulation, 3 – external corona discharge protection, 4 – ripple spring, 5 – air gap, 6 – semiconductive enamel applied to the slot walls

Из [4], [21], [22] известно о возможном постепенном выгорании материалов системы изоляции, в частности, увеличивается сопротивление волнистой прокладки из-за воздействия ПЧР (см. рис. 8). Для корректного прогнозирования эффективности и надежности системы коронозащиты важно исследование механических и электрических свойств гофрированной прокладки и других покрытий в условиях интенсивных ПЧР и повы-

шенной температуры. Этот объем работ частично освещен в исследованиях [3], [21]–[23].

Дальнейшие результаты численного моделирования демонстрируют влияние разного рода технологических отклонений и дефектов, потенциально опасных для возникновения ПЧР, которые могут проявляться в процессе эксплуатации. Графическое пояснение типа дефекта представлено над каждым из графиков аналогично рис. 10.

На рис. 10 рассмотрен случай локального отсутствия внешнего коронозащитного покрытия (промежуток А), а на рис. 11 локально отсутствует эмаль, которой покрывались торцы листов статорного железа. На рис. 12 показан результат моделирования, отражающий напряженность электрического поля при разрыве волнистой прокладки. Авторы отмечают, что рассмотренный случай не противоречит правилам укладки данного материала.

Стоит помнить, что электрическая прочность воздушного зазора зависит не только от размера дефекта и температуры, но и от формы дефекта и его расположения относительно других материалов системы изоляции [24]–[26].

В разработанной программе были рассчитаны распределения электрического поля для случая потери упругих свойств волнистой прокладки при

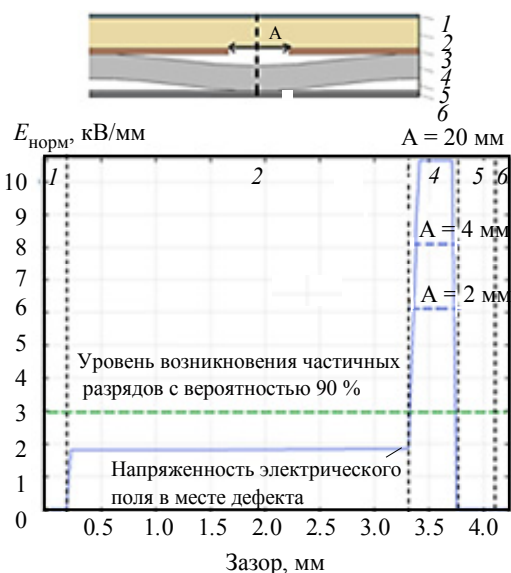


Рис. 10. Локальное отсутствие внешнего покрытия системы коронозащиты покрытия: 1 – внутренняя коронозащита; 2 – корпусная изоляция; 3 – внешняя коронозащита; 4 – волнистая прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза

Fig. 10. Local absence of external coating of the corona protection system: 1 – internal protection against corona discharge; 2 – basic insulation; 3 – external protection against corona discharge; 4 – ripple spring; 5 – air gap; 6 – semiconductive enamel applied to the slot walls

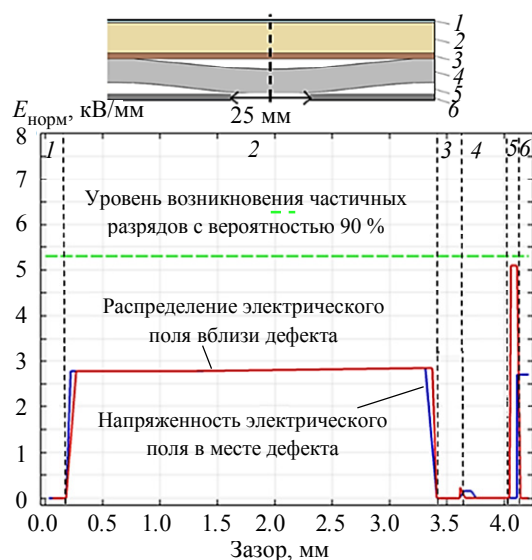


Рис. 11. Локальное отсутствие полупроводящей эмали стенки паза: 1 – внутренняя защита от коронного разряда; 2 – основная изоляция; 3 – внешняя защита от коронного разряда; 4 – волнистая прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза

Fig. 11. Local absence of semi-conducting enamel of the groove wall: 1 – internal corona discharge protection; 2 – main insulation; 3 – external corona discharge protection; 4 – wavy gasket; 5 – air gap; 6 – semi-conductive enamel applied to the groove walls

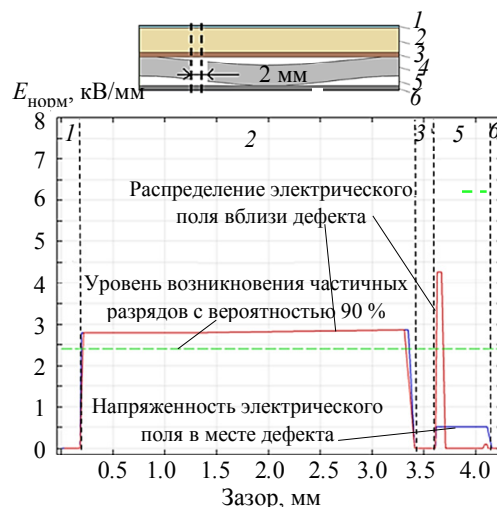


Рис. 12. Локальный обрыв волнистой прокладки: 1 – внутренняя коронозащита; 2 – корпусная изоляция; 3 – внешняя коронозащита; 4 – волнистая прокладка; 5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль, нанесенная на стенки паза

Fig. 12. Local breakage of the ripple spring: 1 – internal protection against corona discharge; 2 – main insulation; 3 – external protection against corona discharge; 4 – ripple spring; 5 – air gap; 6 – semiconductive enamel applied to the slot walls

рабочей температуре. Результат моделирования показал, что распределение электрического поля практически не меняется, однако нарушается герметичное крепление стержня в пазах статора (рис. 13), что может вызывать вибрации и, как следствие, увели-

чение вероятности возникновения виброискровых разрядов, что, наряду с ПЧР, представляет еще одну большую проблему потенциального разрушения системы изоляции [2], [3], [26], [27].

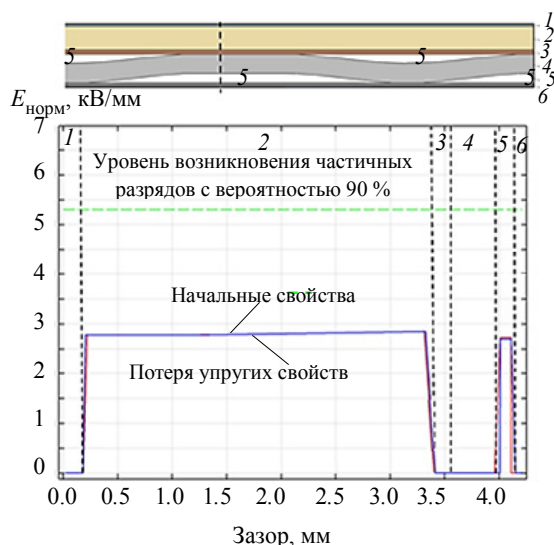


Рис. 13. Потеря упругих свойств волнистой прокладки:
1 – внутренняя коронозащита; 2 – корпусная изоляция;
3 – внешняя коронозащита; 4 – волнистая прокладка;
5 – воздушный зазор; 6 – полупроводящая эмаль,
нанесенная на стенки паза

Fig. 13. Loss of elastic properties of the ripple spring:
1 – internal protection against corona discharge;
2 – main insulation; 3 – external protection against corona
discharge; 4 – ripple spring; 5 – air gap; 6 – semiconductive
enamel applied to the slot walls

Выполненные исследования наиболее характерных технологических отклонений и дефектов, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации, показали, что существует высокая вероятность возникновения ПЧР при определенных типах и размерах дефектов. Допустимые параметры дефектов могут быть уточнены в модели для любой конструкции при детальном расчете. Однако следует учитывать, что в процессе эксплуатации

происходит увеличение размера дефектов с усугублением условий интенсификации ПЧР. Для минимизации негативных эффектов следует обеспечить детальную проработку в модели конструктивных и технологических решений.

Выводы и заключение.

1. Выполнено численное исследование распределения напряженности электрического поля с использованием численной модели паза статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 220 МВт, изготовленного по технологии Resin Rich.

2. В условиях варьирования удельного электрического сопротивления конструктивных элементов системы коронозащиты определена верхняя граница допустимого диапазона удельного объемного электрического сопротивления внешнего коронозащитного покрытия, составляющий $6 \cdot 10^4$ о. е., что позволяет обеспечить отсутствие условий инициации пазовых частичных разрядов в процессе длительной эксплуатации турбогенератора.

3. Исследованы условия инициации пазовых частичных разрядов для наиболее характерных технологических отклонений и дефектов, которые могут возникнуть в процессе сборки и длительной эксплуатации турбогенератора. Установлено, что наиболее опасны локальное повреждение внешнего коронозащитного покрытия и локальный обрыв волнистой прокладки бокового уплотнения.

4. Полученные результаты носят прикладной характер для использования в инженерных подразделениях с целью исследования работоспособности элементов конструкции системы коронозащиты при проработке конструктивных решений в процессе детального проектирования турбогенераторов с воздушным охлаждением.

Список литературы

1. Brush K., Hilmer T. Corona protection in rotating high voltage machines // Inductica. 2006. Berlin. P. 1–6. URL: https://www.stuba.sk/sk/vyskume/aktuality-z-vedy-a-vyskumu/cwieme-2006-berlin-a-inductica-2006.html?page_id=2323 (дата обращения: 12.11.24).
2. Stone G. C., Maughan C. Vibration sparking and slot discharge in stator windings // Conf. Record of the 2008 IEEE Int. Symp. on Electr. Insul., Vancouver. 2008. P. 148–152. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570298.
3. Liese M., Brown M. Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings // IEEE Transactions on Dielectr. and Electr. Insul. 2008. Vol. 15, no. 4. P. 927–932. doi: 10.1109/TDEI.2008.4591212.

4. Маннанов Э. Р. Разработка численной модели для расчета коэффициента эффективной теплопроводности системы изоляции статорной обмотки турбогенераторов // Сб. работ лауреатов междунар. конкурса науч., науч.-техн. и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли. М.: М-во энергетики РФ, ООО «Технологии развития», 2020. С. 108–114.
5. Маннанов Э. Р., Филин А. Г. Тепловое состояние электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49. doi: 10.18721/JEST.27203.

6. Самородов Ю. Н. Атлас дефектов и неисправностей турбогенераторов // Электрические станции. 2004. № 12. С. 50–55.
7. Impact of slot discharge and vibration sparking on stator winding life in large generators / G. C. Stone, C. V. Maughan, D. Nelson, R. P. Schultz // IEEE Electr. Insul. Mag. 2008. Vol. 24, no. 5. P. 14–21. doi: 10.1109/mei.2008.4635657.
8. Maughan C. V., Stone G. C. Electrical failure mechanisms on large generator stator windings // 75th Ann. Int. Double Client Conf. 2008. Boston, USA. P. 1–11.
9. Jackson R., Wilson A. Slot-discharge activity in air-cooled motor and generators // IEEE Proc. 1982. Vol. 129, no. 3 P. 159–167. doi: 10.1049/ip-b.1982.0022.
10. Emery F. T. The application of conductive and stress grading tapes to vacuum pressure impregnated high voltage stator coils // IEEE Electr. Insul. Mag. Vol. 12, no. 4. 1996. P. 15–22. doi: 10.1109/57.526943.
11. Electrical insulation for rotating machines / G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani // IEEE. 2004. 30 p.
12. Mraz P., Kondl V., Hruska K. Influence of low-conductive coating on insulation system of rotary electric machines // J. of Electr. Engin. 2012. Vol. 63, no. 3. P. 180–185. doi: 10.2478/v10187-012-0026-6.
13. Моделирование электроразрядных процессов для оптимизации коронозащитной системы изоляции высоковольтных машин / А. М. Андреев, И. А. Андреев, В. О. Белько, А. С. Резник, А. Н. Смирнов, А. А. Степанов // Problemele Energeticii Regionale. 2020. Т. 2, № 46. С. 33–42. doi: 10.5281/zenodo.3898227.
14. Numerical simulation of discharge activity in HV rotating machine insulation / V. O. Belko, Y. K. Petrenya, A. M. Andreev, A. M. Kosteliov, M. B. Roitgarz // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus). 2019. SPb and Moscow, Russia: IEEE. P. 800–802.
15. Study of characteristics of vibration sparking in hv rotating machine insulation / V. Belko, A. Plotnikov, Y. Petrenya, T. Shikova // 16th Conf. on Electr. Machines, Drives and Power Syst. (ELMA). Varna, Bulgaria: IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ELMA.2019.8771490.
16. Бондаренко П. Н., Емельянов О. А., Шемет М. В. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Однородное поле // Журн. техн. физ. 2014. Т. 84, № 6. С. 51–59.
17. Shemet M. V., Emelyanov O. A., Bondarenko P. N. Investigation of a single dielectric barrier discharge in submillimeter air gaps. Uniform field // Techn. Phys. 2014. Vol. 59, no. 6. P. 838–846.
18. Sili E., Cambronne J., Koliatene F. Temperature dependence of electrical breakdown mechanism on the left of the paschen minimum // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2011. Vol. 39, no. 11. P. 3173–3179. doi: 10.1109/TPS.2011.2165969.
19. Sili E., Cambronne J. P. A New empirical expression of the breakdown voltage for combined variations of temperature and pressure // World Academy of Sci., Engin. and Technol. Int. J. of Aerospace and Mechan. Engin. 2012. Vol. 6, no. 3. P. 611–616. doi.org/10.5281/zenodo.1079916.
20. Maughan C. V. Root-cause diagnostics of generator service failures // IEEE Int. Conf. on Electr. Machines and Drives. 2005. San Antonio: TX. P. 1927–1935. doi: 10.1109/IEMDC.2005.195983.
21. Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines / I. O. Ivanov, A. S. Reznik, E. G. Feklistov, T. M. Shikova, N. A. Fedotov, Y. K. Petrenya // Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus). SPb.: IEEE, 2022. P. 1017–1021. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755593.
22. Karakchiev P. V., Shikova T. M., Ivanov I. O. Technological stresses in the system of high-voltage Mica insulation // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus). St. Petersburg and Moscow: IEEE, 2020. P. 1031–1035. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039025.
23. Moudy W. H. Deterioration mechanisms in recent air cooled turbine generators // Proc. ASME Power. Atlanta. IEEE, 2006. P. 1–7. <https://www.sci-hub.ru/10.1115/power2006-88030> (дата обращения: 5.12.24).
24. The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A. S. Reznik, I. O. Ivanov, T. M. Shikova, A. M. Andreev, E. R. Mannanov // Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW). St. Petersburg, Moscow, Russia: IEEE, 2021. P. 1228–1231. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396613.
25. Moore B., Khazanov A., Moudy H. Stator winding failure due to spark erosion // 5th EPRI Conf. Turbine Generator Technol., 2008, Concord. P. 1–7. URL: <https://studylib.net/doc/18160276/stator-winding-failure-due-to-spark-erosion> (дата обращения: 11.12.24).
26. Moore B., Khazanov A. Insulation degradation in generator stator bars due to spark erosion and partial discharge damage // IEEE Conf. 2010. P. 1–7. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5549794> (дата обращения: 11.12.24)
27. Principles and characteristics of vibration sparking in high voltage stator slots / Y. Xia, Zh. Jia, Zh. Guan, L. Wang, Zh. Zhang // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2013. Vol. 20, no. 1. P. 42–53. doi: 10.1109/tdei.2013.6451340.

Информация об авторах

Маннанов Эмиль Рамилович – канд. техн. наук, руководитель группы, отдел расчетов, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

Костельов Андрей Михайлович – главный специалист по обмоткам турбогенераторов, отдел расчетов, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3242-310X>

Белько Виктор Олегович – канд. техн. наук, директор высшей школы высоковольтной энергетики, институт энергетики, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Главный учебный корпус, Санкт-Петербург, 195251, Россия.

E-mail: vobelko@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

Андреев Александр Михайлович – д-р техн. наук, главный специалист по электроизоляционным материалам, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Andreev_AM@power-m.ru

<https://orcid.org/0009-0005-3021-6173>

Железняк Владимир Николаевич – начальник отдела расчетов, специальное конструкторское бюро по проектированию турбогенераторов, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Zheleznyak_VN@power-m.ru

<https://orcid.org/0009-0003-9919-7252>

Вклад авторов:

Маннанов Э. Р. – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Костельов А. М. – составление черновика рукописи или его критический пересмотр с внесением ценного замечания интеллектуального содержания.

Белько В. О. – разработка концепции.

Андреев А. М. – формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач.

Железняк В. Н. – участие в научном дизайне.

References

1. Brush K., Hilmer T. Corona protection in rotating high voltage machines // *Inductica*. 2006. Berlin. P. 1–6. URL: https://www.stuba.sk/sk/vyskume/aktuality-z-vedy-a-vyskumu/cwieme-2006-berlin-a-inductica-2006.html?page_id=2323 (data obraschenija: 12.11.24).

2. Stone G. C., Maughan C. Vibration sparking and slot discharge in stator windings // *Conf. Record of the 2008 IEEE Int. Symp. on Electr. Insul., Vancouver*. 2008. P. 148–152. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570298.

3. Liese M., Brown M. Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings // *IEEE Transactions on Dielectr. and Electr. Insul.* 2008. Vol. 15, no. 4. P. 927–932. doi: 10.1109/TDEI.2008.4591212.

4. Mannanov Je. R. Razrabotka chislennoj modeli dlja rascheta koeficienta jeffektivnoj teploprovodnosti sistemy izoljacii statornoj obmotki turbogeneratorov // *Sb. rabot laureatov mezhdunar. konkursa nauch., nauch.-tehn. i innovacionnyh razrabotok, napravlennyh na razvitiye toplivno-jenergeticheskoy i dobyvajushhej otrasli. M.: M-vo jenergetiki RF, OOO «Tehnologii razvitiya», 2020. S. 108–114. (In Russ.)*.

5. Mannanov Je. R., Filin A. G. Teplovoe sostojanie jelektricheskoy izoljacii statornyh obmotok turbogeneratorov s vozdušnym ohlazhdeniem // *Materialovedenie*.

Jenergetika. 2021. T. 27, № 2. S. 38–49. doi: 10.18721/JEST.27203.

6. Samorodov Ju. N. Atlas defektov i neispravnostej turbogeneratorov // *Jelektricheskie stancii*. 2004. № 12. S. 50–55. (In Russ.)

7. Impact of slot discharge and vibration sparking on stator winding life in large generators / G. C. Stone, C. V. Maughan, D. Nelson, R. P. Schultz // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2008. Vol. 24, no. 5. P. 14–21. doi: 10.1109/mei.2008.4635657.

8. Maughan C. V., Stone G. C. Electrical failure mechanisms on large generator stator windings // *75th Ann. Int. Double Client Conf.* 2008. Boston, USA. P. 1–11.

9. Jackson R., Wilson A. Slot-discharge activity in air-cooled motor and generators // *IEEE Proc.* 1982. Vol. 129, no. 3. P. 159–167. doi: 10.1049/ip-b.1982.0022.

10. Emery F. T. The application of conductive and stress grading tapes to vacuum pressure impregnated high voltage stator coils // *IEEE Electr. Insul. Mag.* Vol. 12, no. 4. 1996. P. 15–22. doi: 10.1109/57.526943.

11. Electrical insulation for rotating machines / G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani // *IEEE*. 2004. 30 p.

12. Mraz P., Kondl V., Hruska K. Influence of low-conductive coating on insulation system of rotary electric machines // *J. of Electr. Engin.* 2012. Vol. 63, no. 3. P. 180–185. doi: 10.2478/v10187-012-0026-6.

13. Modelirovanie jelektrorazrjadnyh processov dlja optimizacii koronozashhitnoj sistemy izoljacii vysokovol'tnyh mashin / A. M. Andreev, I. A. Andreev, V. O. Bel'ko, A. S. Reznik, A. N. Smirnov, A. A. Stepanov // Problemele Energeticii Regionale. 2020. T. 2, № 46. C. 33–42. doi: 10.5281/zenodo.3898227. (In Russ.).
14. Numerical simulation of discharge activity in HV rotating machine insulation / V. O. Belko, Y. K. Petrenya, A. M. Andreev, A. M. Kosteliov, M. B. Roitgarz // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus). 2019. SPb and Moscow, Russia: IEEE. P. 800–802.
15. Study of characteristics of vibration sparking in hv rotating machine insulation / V. Belko, A. Plotnikov, Y. Petrenya, T. Shikova // 16th Conf. on Electr. Machines, Drives and Power Syst. (ELMA). Varna, Bulgaria: IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ELMA.2019.8771490.
16. Bondarenko P. N., Emel'janov O. A., Shemet M. V. Issledovanie odinochnogo bar'ernogo razrjada v submillimetrovyyh vozduzhnyh promezhutkah. Odnorodnoe pole // Zhurn. tehn. fiz. 2014. T. 84, № 6. S. 51–59. (In Russ.).
17. Shemet M. V., Emelyanov O. A., Bondarenko P. N. Investigation of a single dielectric barrier discharge in submillimeter air gaps. Uniform field // Tech. Phys. 2014. Vol. 59, no. 6. P. 838–846.
18. Sili E., Cambronne J., Koliatene F. Temperature dependence of electrical breakdown mechanism on the left of the paschen minimum // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2011. Vol. 39, no. 11. P. 3173–3179. doi: 10.1109/TPS.2011.2165969.
19. Sili E., Cambronne J. P. A New empirical expression of the breakdown voltage for combined variations of temperature and pressure // World Academy of Sci., Engin. and Technol. Int. J. of Aerospace and Mechan. Engin. 2012. Vol. 6, no. 3. P. 611–616. doi.org/10.5281/zenodo.1079916.
20. Maughan C. V. Root-cause diagnostics of generator service failures // IEEE Int. Conf. on Electr. Machines and Drives. 2005. San Antonio: TX. P. 1927–1935. doi: 10.1109/IEMDC.2005.195983.
21. Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines / I. O. Ivanov, A. S. Reznik, E. G. Feklistov, T. M. Shikova, N. A. Fedotov, Y. K. Petrenya // Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus). SPb.: IEEE, 2022. P. 1017–1021. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755593.
22. Karakchiev P. V., Shikova T. M., Ivanov I. O. Technological stresses in the system of high-voltage Mica insulation // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElConRus). St. Petersburg and Moscow: IEEE, 2020. P. 1031–1035. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039025.
23. Moudy W. H. Deterioration mechanisms in recent air cooled turbine generators // Proc. ASME Power. Atlanta. IEEE, 2006. P. 1–7. <https://www.sci-hub.ru/10.1115/power2006-88030> (data obraschenija: 5.12.24).
24. The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A. S. Reznik, I. O. Ivanov, T. M. Shikova, A. M. Andreev, E. R. Mannanov // Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW). St. Petersburg, Moscow, Russia: IEEE, 2021. P. 1228–1231. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396613.
25. Moore B., Khazanov A., Moudy H. Stator winding failure due to spark erosion // 5th EPRI Conf. Turbine Generator Technol., 2008, Concord. P. 1–7. URL: <https://studylib.net/doc/18160276/stator-winding-failure-due-to-spark-erosion> (data obraschenija: 11.12.24).
26. Moore B., Khazanov A. Insulation degradation in generator stator bars due to spark erosion and partial discharge damage // IEEE Conf. 2010. P. 1–7. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5549794> (data obraschenija: 11.12.24).
27. Principles and characteristics of vibration sparking in high voltage stator slots / Y. Xia, Zh. Jia, Zh. Guan, L. Wang, Zh. Zhang // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2013. Vol. 20, no. 1. P. 42–53. doi: 10.1109/tdei.2013.6451340.

Information about the authors

Emil R. Mannanov – Ph. D. (Eng.), team leader, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

Andrey M. Kostelov – Chief specialist in turbogenerator windings, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3242-310X>

Victor O. Belko – Ph. D. (Eng.), Director of Higher School of High Voltage Engineering, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, Main Building, St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: vobelko@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

Alexander M. Andreev – Dr Sci. (Eng.), Chief specialist in electrical insulation materials, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Andreev_AM@power-m.ru

<https://orcid.org/0009-0005-3021-6173>

Vladimir N. Zheleznyak – Head of the Calculations Department, Special Design Bureau for the design of turbo generators JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Zheleznyak_VN@power-m.ru

<https://orcid.org/0009-0003-9919-7252>

Author contribution statement:

Mannanov E. R. – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Kostelov A. M. – drafting of a manuscript or its critical revision with the introduction of valuable remarks of intellectual content.

Belko V. O. – concept development.

Andreev A. M. – formation of an idea; formulation or development of key goals and objectives.

Zheleznyak V. N. – participation in scientific design.

Статья поступила в редакцию 15.12.2024; принята к публикации после рецензирования 26.03.2025; опубликована онлайн 26.05.2025.

Submitted 15.12.2024; accepted 26.03.2025; published online 26.05.2025.
