

Научная статья

УДК 621.3.048

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29203>



Э.Р. Маннанов  , А.А. Степанов,  
А.М. Костельов, А.М. Андреев

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

 [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПАЗОВЫХ ПОЛУПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Аннотация.* В работе представлены результаты исследований динамики роста локальных повреждений в различных конструкциях полупроводящих пазовых покрытий обмотки статоров турбогенераторов в условиях эксплуатационных воздействий, воспроизведенных в лабораторных условиях путем комплексного воздействия электрического напряжения, температуры и озона, уровень которых имитирует условия работы в реальном турбогенераторе с воздушным охлаждением. Авторы разработали методику исследования и оценки динамики роста локальных повреждений полупроводящих эмалевых и ленточных пазовых покрытий. Выполнены сравнительные испытания покрытий в лабораторных условиях на макетах. Не выявлено существенных различий в скорости роста локальных дефектов при выбранном уровне воздействий для эмалевых или ленточных покрытий и их комбинаций, однако применение защитных диэлектрических лаков позволяет уменьшить скорость разрушения покрытий.

*Ключевые слова:* пазовые полупроводящие покрытия, статорные обмотки турбогенераторов, дефект, частичные разряды, система изоляции.

*Для цитирования:*

Маннанов Э.Р., Степанов А.А., Костельов А.М., Андреев А.М. Исследование повреждений пазовых полупроводящих покрытий статорных обмоток турбогенераторов в условиях эксплуатационных воздействий // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 2. С. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29203>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29203>

*E.R. Mannanov* ✉, *A.A. Stepanov*,  
*A.M. Kostelov*, *A.M. Andreev*

JSC “Power machines”, St. Petersburg, Russia

✉ [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

## **DAMAGE ANALYSIS FOR SLOT SEMI-CONDUCTING COATINGS IN TURBOGENERATOR STATOR WINDINGS UNDER OPERATING STRESSES**

*Abstract.* The paper presents studies on the local damage dynamics in various designs of semi-conductive slot coatings of the turbogenerator stator windings under operating conditions. The authors used combined effects of electric voltage, temperature and ozone to imitate the operating conditions of a real air-cooled turbogenerator in a laboratory. They developed a methodology for studying and evaluating the local damage dynamics in semi-conductive enamel and tape slot coatings. Then, the coatings were tested in laboratory conditions on mock-ups for comparison. No significant differences were found in the growth rate of local defects at the selected level of impacts for enamel or tape coatings and their combinations. However, the use of protective dielectric varnishes reduced the degradation rate of coatings.

*Keywords:* slot semiconducting coatings, stator windings of turbogenerators, defect, partial discharges, insulating system.

*Citation:*

E.R. Mannanov, A.A. Stepanov, A.M. Kostelov, A.M. Andreev, Damage analysis for slot semi-conducting coatings in turbogenerator stator windings under operating stresses, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 32–43, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29203>

**Введение.** Обмотки статоров мощных турбогенераторов обычно чрезвычайно надежны, их эксплуатационный ресурс оценивается десятками лет. Тем не менее, существует ряд механизмов старения систем изоляции, которые в процессе эксплуатации могут приводить к снижению срока службы генератора или к аварийным остановам. Пазовые частичные разряды (ПЧР) можно отнести к одним из наиболее характерных разрушительных явлений для систем изоляции, особенно для обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением большой мощности с высоким номинальным напряжением.

Пазовое полупроводящее покрытие наносится на поверхность корпусной изоляции обмоток статоров для предотвращения ПЧР, которые могут возникать в небольших газонаполненных зазорах между поверхностью стержня и сердечником статора. Многочисленные исследования [1–5] показали, что для исключения ПЧР следует ограничивать величину удельного поверхностного сопротивления полупроводящего покрытия не выше 15–25 кОм. В процессе эксплуатации, при длительном воздействии температуры, происходит уменьшение величины удельного сопротивления полупроводящих покрытий [6, 7], что снижает вероятность возникновения ПЧР и, тем самым, благоприятно сказывается на работоспособности конструкции. Однако, в случае повреждений полупроводящих покрытий, даже в чрезвычайно малой локальной зоне, можно ожидать высокой вероятности возникновения условий для инициации ПЧР, поскольку в этой области образуется разность потенциалов, превышающая электрическую прочность газа между поверхностью и сердечником. Интенсивность подобных ПЧР нельзя характеризовать как опасное явление, однако, в условиях эксплуатационных воздействий потенциально возможно разрас-

тание локальных дефектов, что, при достижении определенных параметров, уже может представлять опасность. В турбогенераторах с воздушным охлаждением при ПЧР происходит образование озона, который оказывает дополнительное влияние на интенсивность и скорость процесса, а также приводит к повреждению конструктивных элементов турбогенератора. В конструкции полупроводящих покрытий стержней статорной обмотки традиционно применяются ленточные или эмалевые покрытия. Локальные повреждения полупроводящих покрытий могут появиться как в процессе укладки стержней в сердечник статора, так и в процессе эксплуатации при механических воздействиях. При этом, вероятность повреждений значительно выше в зоне выхода из паза, в которой при эксплуатации уровень температурных и механических воздействий повышен. Для возможности оценки работоспособности конструкции представляется важным оценить скорость роста локальных повреждений в полупроводящих покрытиях различных конструкций.

Целью работы является исследование скорости роста локальных повреждений в полупроводящих покрытиях различных конструкций при комплексных воздействиях идентичных воздействиям, возникающим в статорной обмотке высоковольтного турбогенератора при эксплуатации.

#### Методика исследования

Исследования проводились на макетах, имитирующих реальную конструкцию стержня статорной обмотки, изготовленных по штатной заводской технологии, аналогичной технологии, применяемой при изготовлении стержней статорной обмотки турбогенераторов. Макеты представляли собой малоразмерные образцы (длиной 750 мм) стержней статорной обмотки. Толщина опрессованной корпусной изоляции макетов составляла 2 мм. Предварительно пропитанные стеклослюдопластовые ленты с оптимизированной структурой [8], обеспечивающей теплопроводность корпусной изоляции не ниже 0,37 Вт/(м·К), наматывались на макеты с положительным 50% перекрытием, после чего помещались в котел с расплавленным битумом для опрессовки, что обеспечило идентичность с промышленной технологией. Минимальный объем выборки при испытаниях составлял не менее 10 идентичных образцов.

Для испытаний были выбраны материалы, как используемые на производстве в данный момент, так и перспективные с точки зрения их потенциального внедрения в конструкцию системы изоляции. Покровные эмали (табл. 1) представляют собой полимерные композиции холодного отверждения, в которых в качестве связующего используются полимерные компаунды, а в качестве электропроводящего наполнителя – графит. Исследовалась новая разработанная эмаль, которая имеет высокий класс нагревостойкости и также может использоваться для изготовления пазовой противокоронной системы статорной обмотки турбогенераторов, корпусная изоляция которых выполнена по технологии Resin Rich и Single Bar VPI.

Таблица 1

**Структурный состав и свойства исследуемой полупроводящей эмали**

Table 1

**Structural composition and properties of the investigated semi-conductive enamel**

Связующее	Полиэфиримидная смола
Электропроводящий наполнитель	Коллоидно-графитовый препарат
Наполнитель, определяющий вязкость	Каолин
Класс нагревостойкости	F
Удельное поверхностное сопротивление в состоянии поставки, кОм*	10 – 25

\*Измеряется на плоском отвержденном образце при комнатной температуре

Исследуемая полупроводящая лента представляет собой композитный материал, в состав которого входит стеклянная лента, пропитанная полупроводящим лаком. Лента (табл. 2) может использоваться для изготовления пазовой противокоронной системы статорной обмотки турбогенераторов, корпусная изоляция которых выполнена по технологии Resin Rich, Single Bar VPI и Global VPI.

Таблица 2

**Свойства исследуемой полупроводящей ленты**

Table 2

**Properties of the investigated semi-conductive tape**

Пропитывающий лак	Эпоксидный лак + Коллоидно-графитовый препарат
Толщина ленты, мм	0,10
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	100±25
Массовая доля растворимого связующего, %	90-100
Класс нагревостойкости	F
Удельное поверхностное сопротивление в состоянии поставки, кОм	5–30

Кроме индивидуальных полупроводниковых материалов исследовались также их совместные композиции, а также композиции с защитной диэлектрической эмалью. Толщина защитной пленки составляла 0,03 мм, удельное электрическое сопротивление – 1011 Ом. Для каждого варианта изготавливались макеты с искусственными дефектами покрытия. Дефекты представляли собой равноудаленные друг от друга канавки, в которых полностью удален испытываемый полупроводящий материал на участке размерами 1×10 мм. Количество дефектов на одном участке составляло шесть штук. Три дефекта наносились с одной стороны вдоль сечения макета, другие три – с обратной стороны поперек сечения (рис. 1 а). Дефекты моделировали очаги эрозии, которые могли образовываться в результате технологических нарушений при сборке или воздействия виброискровых разрядов [7, 9, 14].

Для проведения испытаний макеты помещались в термостат (рис. 1 б), оснащенный высоковольтным вводом. Испытательное напряжение подавалось на токоведущую часть, электроды на пазовой части заземлялись. В качестве источника озона применялась полукатушка без пазового полупроводящего покрытия с нанесенным на пазовую часть медным канатиком.

Комплексное старение производилось при напряженности электрического поля 6 кВ/мм, температуре 155 °С и концентрации озона (15 ± 5) мг/м<sup>3</sup>.

Состояние испытываемых покрытий, изготовленных из лент/эмалей, визуально оценивалось в процессе старения. Первый замер и осмотр проводился после 100 ч, далее – каждые (500 – 700) ч. Изменение размера дефекта определялось в процентном отношении суммированной площади разрушений всех искусственных дефектов к общей площади участка покрытия. Испытания заканчивались, когда площадь повреждения покрытия достигала величины 80%. Дополнительно проводилось измерение характеристик частичных разрядов (ЧР) электрическим методом [10–13] с помощью цифрового измерительного комплекса «СКИТ» ЧР (производства СПбПУ Петра Великого). Комплекс позволял измерять следующие характеристики ЧР: максимальный кажущийся заряд, средний ток ЧР, осциллограммы импульсов ЧР за период напряжения промышленной частоты, амплитудные и амплитудно-фазовые спектры ЧР [14].

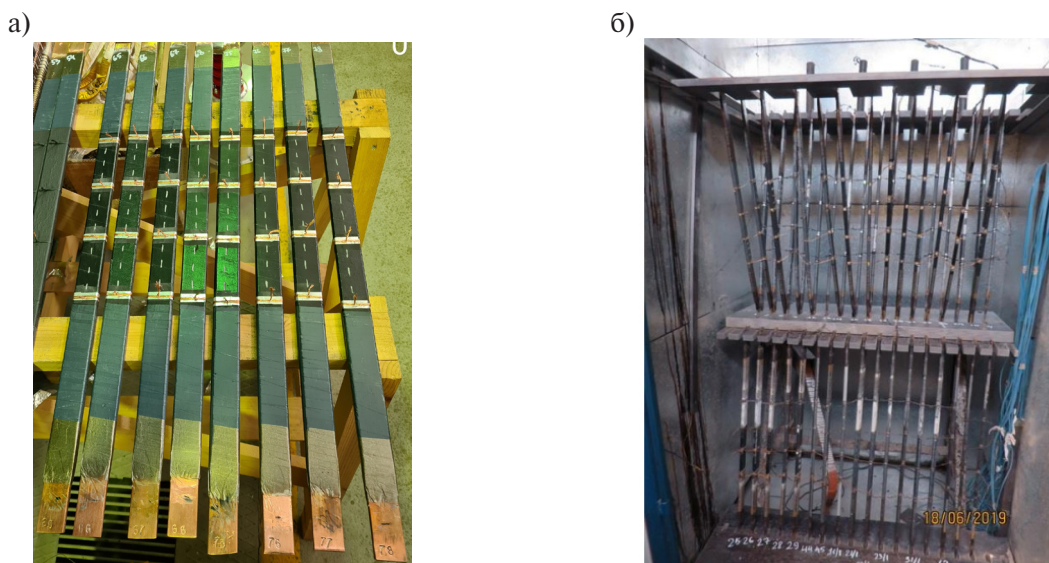


Рис. 1. Внешний вид макетов для испытания полупроводящих пазовых покрытий:  
 а) фотографии макетов с искусственными дефектами в полупроводящем покрытии,  
 б) фотографии макетов, размещенных в термостате для испытаний

Fig. 1. Appearance of mock-ups for testing semi-conductive slot coatings: a) photographs of mock-ups with artificial defects in the semi-conductive coating, b) photographs of mock-ups placed in a thermostat for testing

### Результаты и обсуждения

Увеличение времени комплексного старения приводит к росту площади зон разрушения противокоронного покрытия, концентрирующихся вблизи искусственных дефектов (рис. 2).

Основной причиной разрушения противокоронного покрытия являются ЧР, развивающихся по периметру искусственных дефектов. Характер амплитудно-фазных спектров измеренных ЧР, а именно, отсутствие явной ассиметрии спектров на положительном и отрицательном полупериодах приложенного напряжения (рис. 3) свидетельствует о том, что измеренные ЧР имеют форму скользящих разрядов [11].

Увеличение разрушения покрытия приводит к росту линейных размеров искусственных дефектов, что влечет за собой рост максимального кажущегося заряда скользящих ЧР (рис. 4) до значений 5000 пКл и более, что представляет высокую опасность для системы изоляции статорной обмотки [10–13].

На рис. 5 представлены графики, определяющие процессы разрушения противокоронных покрытий, изготовленных из полупроводящей эмали, ленты, их совместной комбинации и композиции с защитным диэлектрическим лаком.

Ленточные полупроводящие покрытия разрушаются быстрее, чем эмалевые (увеличение площади дефектов до 80% в пределах 1500 ч и 3000 ч соответственно), а стойкость к разрушению комбинации ленточного и эмалевого покрытия немного выше (3500 ч). В реальной конструкции локальные повреждения полупроводящего покрытия могут появиться в процессе укладки обмотки или эксплуатации турбогенератора и могут приводить к достаточно быстрому разрушению полупроводящего покрытия стержней, что повышает риск дальнейшего разрушения изоляции, если в конструкции имеются условия для возникновения комплексных воздействий такого высокого уровня, как в данном эксперименте. Однако, следует учитывать, что вероятность повреждения ленточных покрытий, за счет их большей механической прочности, в реальных условиях ниже, чем эмалевых. Комбинация ленточного покрытия с нанесенным эмалевым слоем повыша-



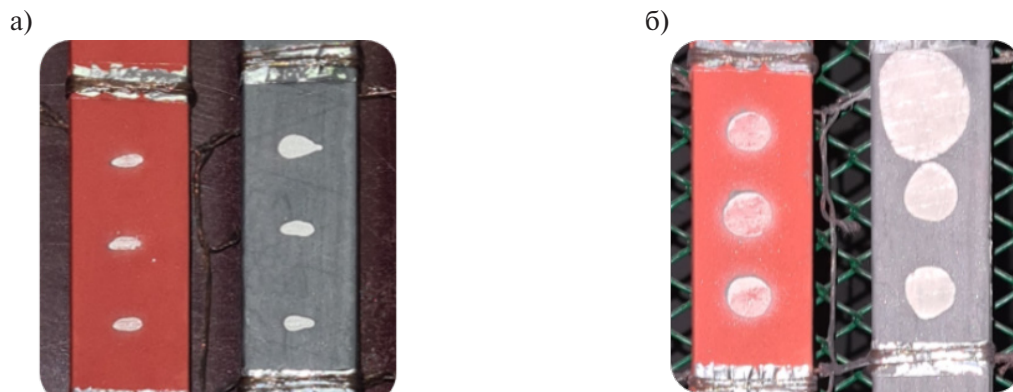


Рис. 2. Пример фотографии зон разрушения полупроводящих покрытий в зависимости от времени комплексного старения: а – 500 ч; б – 2500 ч  
 Fig. 2. An example of a photograph of the destruction zones of semiconducting coatings depending on the time of complex aging: a – 500 h; b – 2500 h

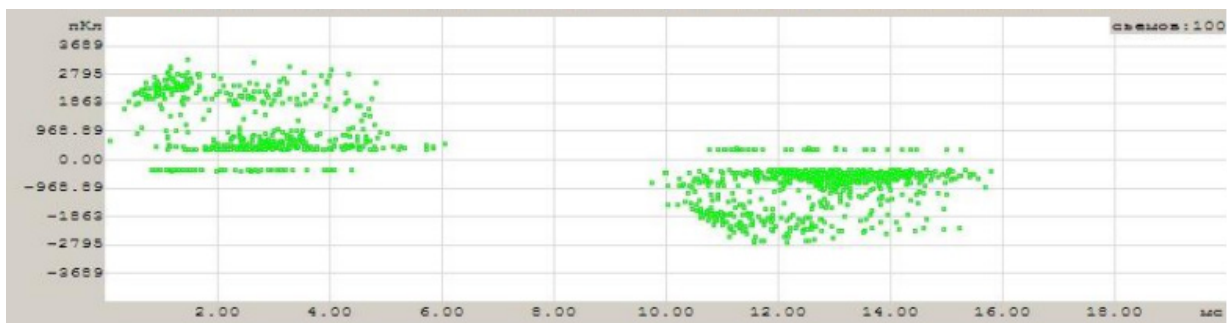


Рис. 3. Амплитудно-фазовый спектр ЧР, развивающихся в искусственном дефекте противокоронного эмалевого покрытия с линейными размерами (10×5) мм  
 Fig. 3. PRPD of artificial defect of an anti-corona enamel coating with linear dimensions (10×5) mm

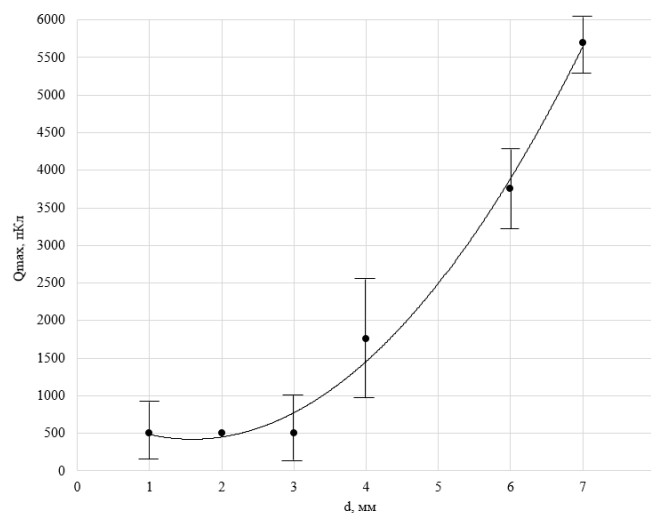


Рис. 4. Зависимость величины максимального кажущегося заряда ЧР от линейного размера искусственного дефекта  
 Fig. 4. Dependence of the value of the maximum apparent charge of PD on the linear size of an artificial defect

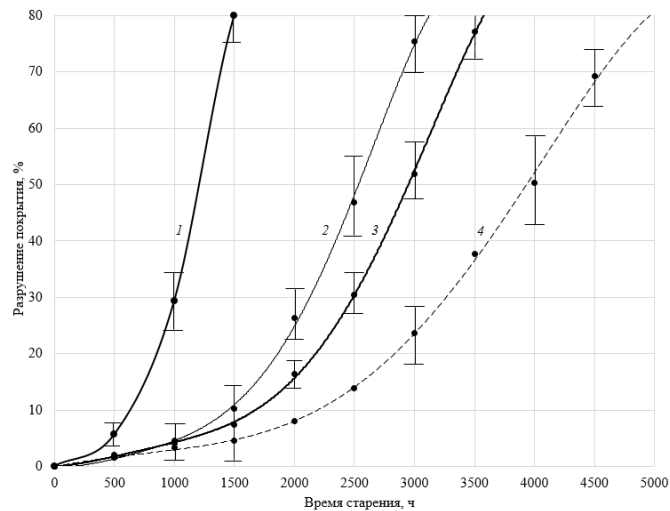


Рис. 5. Зависимости интенсивности разрушения противокоронных покрытий изготовленных из ленты, эмали, их совместной композиции и композиции с защитным диэлектрическим лаком от времени комплексного старения: 1 – лента; 2 – эмаль; 3 – композиция (лента + эмаль); 4 – композиция (лента + эмаль + защитный диэлектрический лак)

Fig. 5. Dependences of the destruction intensity of anti-corona coatings made of tape, enamel, it joint composition and composition with a protective dielectric varnish on the time of complex aging: 1 – tape; 2 – enamel; 3 – composition (tape + enamel); 4 – composition (tape + enamel + protective dielectric varnish)



Рис. 6. Фотография исходного состояния макетов с нанесенными искусственными дефектами в полупроводящем покрытии конструкций: полупроводящая лента + полупроводящая эмаль (серый цвет покрытия-слева) и полупроводящая лента + полупроводящая эмаль + защитное диэлектрическое покрытие (красный цвет покрытия – справа)

Fig. 6. The initial state photo of mock-ups with applied artificial defects in the semi-conductive coating of the structures: semi-conductive tape + semi-conductive enamel (grey color of the coating is on the left) and semi-conductive tape + semi-conductive enamel + protective dielectric coating (red color of the coating is on the right)

ет устойчивость к разрушению, и может рассматриваться в качестве альтернативы традиционным конструкциям полупроводящих покрытий в высоконагруженных турбогенераторах с воздушным охлаждением.

Применение дополнительного покрытия защитной диэлектрической эмали позволяет существенно увеличить время до разрушения дефектов (до 5000 ч). Этот вариант может быть реко-



Рис. 7. Фотографии динамики изменения размера дефектов в полупроводящем покрытии конструкций макетов при длительных комплексных воздействиях: полупроводящая лента + полупроводящая эмаль (серый цвет покрытия-слева) и полупроводящая лента + полупроводящая эмаль + защитное диэлектрическое покрытие (красный цвет покрытия – справа): а) длительность 1000 ч; б) длительность 2000 ч; в) длительность 3000 ч; 4) длительность 4000 ч

Fig. 7. Photographs of the dynamics of changes in the size of defects in the semi-conductive coating of mock-up structures under long-term complex exposures: semi-conductive tape + semi-conductive enamel (grey color of the coating is on the left) and semi-conductive tape + semi-conductive enamel + protective dielectric coating (red color of the coating is on the right): a) duration 1000 h; b) duration 2000 hours; c) duration 3000 hours; 4) duration 4000 h

мендован для использования в конструкции полупроводящего покрытия для дополнительной защиты от комплексных воздействий наиболее нагруженной и проблемной зоне выхода обмотки из паза статора турбогенератора, так как в пазовой части оно не может быть применено в следствии конструктивных особенностей, связанных с необходимостью создания электрического контакта между элементами системы коронозащиты.

Динамика процесса разрушения полупроводящего покрытия показана на рис. 6–7 на примере конструкции, в которой на корпусную изоляцию нанесена полупроводящая лента, поверх которой нанесена полупроводящая эмаль и аналогичной конструкции с дополнительно нанесенным поверх защитным диэлектрическим покрытием.



На рис. 7 можно наблюдать последовательное разрушение полупроводящего покрытия начиная от 1000 ч комплексного старения, когда рост искусственных дефектов еще незначительный, до 4000 ч комплексного старения, когда дефект расширился по исследуемой поверхности до полного разрушения противокоронного покрытия, что, естественно, приводит к интенсификации мощных ПЧР.

### Заключение

1. Выполнено исследование динамики роста локальных повреждений в пазовых полупроводящих покрытиях на макетах, имитирующих реальную конструкцию стержня статорной обмотки высоковольтного турбогенератора при комплексных воздействиях электрического напряжения, повышенной температуры и озона.

2. Показано, что рост (до 80 %) площади искусственно созданных дефектов в полупроводящих покрытиях происходят в пределах 5000 часов непрерывного комплексного воздействия электрического напряжения, повышенной температуры и озона. Динамика процесса определяется конструкцией полупроводящего покрытия и применяемыми материалами.

3. Показано, что ленточные полупроводящие покрытия разрушаются быстрее, чем эмалевые (увеличение площади дефектов до 80% в пределах 1500 ч и 3000 ч соответственно), а стойкость к разрушению комбинации ленточного и эмалевого покрытия немного выше (3500 ч). Применение дополнительного покрытия защитной диэлектрической эмали оказывает положительный эффект на стойкости пазовой противокоронной системы статорной обмотки турбогенераторов.

4. Вероятность повреждения ленточных покрытий, за счет их большей механической прочности, в реальных условиях ниже, чем эмалевых. Комбинация ленточных покрытий нанесенным эмалевым слоем в виду повышенной устойчивости к росту дефектов может рассматриваться в качестве альтернативы традиционным конструкциям полупроводящих покрытий в высоконагруженных турбогенераторах с воздушным охлаждением.

5. Вариант с дополнительным покрытием полупроводящего покрытия защитной диэлектрической эмалью может рассматриваться для дополнительной защиты от комплексных воздействий в конструкции полупроводящего покрытия в наиболее нагруженной зоне выхода обмотки из паза статора турбогенератора.

6. Исследования показали, что скорость роста дефекта возрастает по мере увеличения его площади. Для реальной конструкции это означает, что следует избегать условий для появления любых дефектов или повреждений в полупроводящем покрытии, но, в особенности, крупных повреждений, которые могут достаточно быстро приводить к повреждениям изоляции.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Lévesque M., David É., Hudon C., Bélec M.** Effect of Surface Degradation on Slot Partial Discharge Activity // IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., 2010, v. 17, pp. 1428–1440.

[2] **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.

[3] **Akbari A., Rahimi M., Werle P., Borsi H.** Fault Localization and Analysis for a Damaged Hydrogenerator and a Proposal to Improve the Standard for Generator Commissioning Tests // IEEE Electrical Insulation Magazine 2021, v. 36, no. 3, pp. 19–26.

[4] **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.

- [5] **Hirakawa T., Kumada A., Hidaka K.** Surface Potential Measurement of Model Stator Bar with Stress Grading System by Field Sensor // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2019, v. 26, no. 4, pp. 1146–1157.
- [6] **Litinsky A., Schmidt G., Pohlmann F., Hirsch H.** Ageing of corona protection material on rotating machines // 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 356–359.
- [7] 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 Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1228–1231.
- [8] **Пак В.М., Трубочев С.Г.** Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 416 с.
- [9] **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, pp. 14–20.
- [10] **Iwabuchi H., Oyama T.** Breakdown Phenomena across Micrometer Scale Surface Gap under Negative Voltage Application // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2019, v. 26, no. 5, pp. 1377–1387.
- [11] **Montanari G.C., Seri P.** A Partial Discharge–Based Health Index for Rotating Machine Condition Evaluation // IEEE Electrical Insulation Magazine 2018, v. 34, no. 2, pp. 17–23.
- [12] **Маннанов Э.Р.** О диэлектрических материалах с высокой теплопроводностью для систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин: обзор отечественной и зарубежной литературы // Глобальная энергия. 2021. Т. 27, № 4. С. 42–67. DOI: 10.18721/JEST.27404
- [13] **Belko V.O., Petrenya Y.K., Andreev A.M., Kosteliyov A.M., Roitgarz M.B.** Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). DOI: 10.1109/eiconrus.2019.8657272
- [14] **Андреев А.М., Андреев И.А., Белько В.О., Резник А.С., Смирнов А.Н., Степанов А.А.** Моделирование электроразрядных процессов для оптимизации коронозащитной системы изоляции высоковольтных машин // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 2 (46). С. 33–42.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МАННАНОВ Эмиль Рамилевич** – инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

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

**СТЕПАНОВ Александр Андреевич** – начальник технологического отдела по изоляционно-обмоточным процессам и материаловедению, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: [Stepanov\\_AA@power-m.ru](mailto:Stepanov_AA@power-m.ru)

**КОСТЕЛЬОВ Андрей Михайлович** – главный специалист по обмоткам турбогенераторов, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: [Kostelov\\_AM@power-m.ru](mailto:Kostelov_AM@power-m.ru)

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

**АНДРЕЕВ Александр Михайлович** – главный специалист, АО Силовые машины, д-р техн. наук.

E-mail: [alexandre1949@yahoo.com](mailto:alexandre1949@yahoo.com)

## REFERENCES

- [1] **M. Lévesque, É. David, C. Hudon, M. Bélec**, Effect of Surface Degradation on Slot Partial Discharge Activity // *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.*, 2010, v. 17, pp. 1428–1440.
- [2] **M. Liese, M. Brown**, Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking on High Voltage Windings // *IEEE Trans. Dielec. Elect. Insulation*. 2008, v. 15, no. 4, pp. 927–932.
- [3] **A. Akbari, M. Rahimi, P. Werle, H. Borsi**, Fault Localization and Analysis for a Damaged Hydrogenerator and a Proposal to Improve the Standard for Generator Commissioning Tests // *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2021, v. 36, no. 3, pp. 19–26.
- [4] **Y. Xia**, Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots // *IEEE Trans. Dielec. Elect. Insulation*. 2013, v. 20, no. 1, pp. 42–53.
- [5] **T. Hirakawa, A. Kumada, K. Hidaka**, Surface Potential Measurement of Model Stator Bar with Stress Grading System by Field Sensor // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 2019, v. 26, no. 4, pp. 1146–1157.
- [6] **A. Litinsky, G. Schmidt, F. Pohlmann, H. Hirsch**, Ageing of corona protection material on rotating machines // *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pp. 356–359.
- [7] 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 Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1228–1231.
- [8] **V.M. Pak, S.G. Trubachev**, *Novyye materialy i sistemy izolyatsii vysokovolnykh elektricheskikh mashin*. M.: Energoatomizdat, 2007. – 416 s.
- [9] **G.C. Stone**, Impact of Slot Discharge and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators // *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2008. v. 24, no. 5, pp. 14–20.
- [10] **H. Iwabuchi, T. Oyama**, Breakdown Phenomena across Micrometer Scale Surface Gap under Negative Voltage Application // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 2019, v. 26, no. 5, pp. 1377–1387.
- [11] **G.C. Montanari, P. Seri**, A Partial Discharge–Based Health Index for Rotating Machine Condition Evaluation // *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2018, v. 34, no. 2, pp. 17–23.
- [12] **E.R. Mannanov**, O dielektricheskikh materialakh s vysokoy teploprovodnostyu dlya sistem elektricheskoy izolyatsii vysokovolnykh elektricheskikh mashin: obzor otechestvennoy i zarubezhnoy literatury // *Globalnaya energiya*. 2021. T. 27, № 4. S. 42–67. DOI: 10.18721/JEST.27404
- [13] **V.O. Belko, Y.K. Petrenya, A.M. Andreev, A.M. Kosteliyov, M.B. Roitgarz**, Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). DOI: 10.1109/eiconrus.2019.8657272
- [14] **A.M. Andreyev, I.A. Andreyev, V.O. Belko, A.S. Reznik, A.N. Smirnov, A.A. Stepanov**, Modelirovaniye elektrorazryadnykh protsessov dlya optimizatsii koronozashchitnoy sistemy izolyatsii vysokovolnykh mashin // *Problemy regionalnoy energetiki*. 2020. № 2 (46). S. 33–42.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Emil R. MANNANOV** – JSC “Power machines”.  
E-mail: emil-mannanov@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

**Alexander A. STEPANOV** – JSC “Power machines”.  
E-mail: Stepanov\_AA@power-m.ru

**Andrey M. KOSTELOV** – JSC “*Power machines*”.

E-mail: Kostelov\_AM@power-m.ru

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

**Alexander M. ANDREEV** – JSC “*Power machines*”.

E-mail: alexandre1949@yahoo.com

**Поступила: 07.03.2023; Одобрена: 04.04.2023; Принята: 05.04.2023.**

**Submitted: 07.03.2023; Approved: 04.04.2023; Accepted: 05.04.2023.**