

Научная статья

УДК 621.3.048

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31403>



*В.О. Белько<sup>1</sup>, Э.Р. Маннанов<sup>2</sup> ✉, А.М. Костельов<sup>2</sup>,  
Н.А. Федотов<sup>1</sup>, Е.Г. Феклистов<sup>1</sup>, Т.М. Шикова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, Россия

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

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛЮДОСОДЕРЖАЩЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

*Аннотация.* Представлены результаты комплексного исследования физико-механических характеристик корпусной слюдосодержащей изоляции обмоток статора высоковольтных турбогенераторов. Сравнительный анализ проведен для изоляции, изготовленной по технологиям пропитанных лент (Resin-Rich, RR) и вакуум-нагнетательной пропитки (Vacuum Pressure Impregnation, VPI). Определены прочностные и деформационные характеристики при различных видах механического нагружения, оценена межслойная адгезионная прочность и температурное расширение с учетом анизотропии материала. Установлены существенные различия в поведении исследуемых типов изоляции при повышенных температурах. Выявлена значительная анизотропия теплофизических свойств материала. Методом ускоренного теплового старения показана сохранность механических характеристик в течение продолжительного срока службы. Полученные результаты имеют практическую значимость для расчетов термомеханической и вибрационной стойкости систем изоляции высоковольтных турбогенераторов.

*Ключевые слова:* обмотка статора, слюдосодержащая корпусная изоляция, технология пропитанных лент, вакуум-нагнетательная пропитка, механические характеристики, температурный коэффициент линейного расширения, тепловое старение.

*Для цитирования:*

Белько В.О., Маннанов Э.Р., Костельов А.М., и др. Физико-механические характеристики слюдосодержащей изоляции обмоток статора высоковольтных электрических машин // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 41–57. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31403>



V.O. Belko<sup>1</sup>, E.R. Mannanov<sup>2</sup> ✉, A.M. Kostelov<sup>2</sup>,  
N.A. Fedotov<sup>1</sup>, E.G. Feklistov<sup>1</sup>, T.M. Shikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> JSC "Power machines", St. Petersburg, St. Petersburg, Russia

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

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MICA-BASED INSULATION FOR HIGH-VOLTAGE STATOR WINDINGS

*Abstract.* The results of a comprehensive study of the physical and mechanical characteristics of the mica-containing groundwall insulation of stator windings for high-voltage turbogenerators are presented. A comparative analysis was carried out for insulation manufactured using resin-rich (RR) and vacuum pressure impregnation (VPI) technologies. Strength and deformation characteristics under various types of mechanical loading were determined, interlayer adhesive strength was assessed and thermal expansion was evaluated, taking into account the material's anisotropy. Significant differences in the behavior of the studied insulation types at elevated temperatures have been established. A significant anisotropy of the thermophysical properties of the material has been revealed. Accelerated thermal aging tests demonstrated the retention of mechanical characteristics over a long service life. The obtained results are of practical importance for calculating the thermomechanical and vibrational stability of the insulation systems of high-voltage turbogenerators.

*Keywords:* stator winding, mica-containing groundwall insulation, resin-rich technology, vacuum pressure impregnation, mechanical characteristics, temperature coefficient of linear expansion, thermal ageing.

*Citation:*

Belko V.O., Mannanov E.R., Kostelov A.M. et al., Physical and mechanical properties of mica-based insulation for high-voltage stator windings, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 41–57, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31403>

### Введение

Надежность и долговечность высоковольтных турбогенераторов (ТГ) являются критически важными факторами для устойчивой работы энергетических систем. Одним из ключевых элементов, определяющих ресурс электрических машин, является изоляция обмотки статора, выход из строя которой остается доминирующей причиной отказов генераторного оборудования [1]. Хотя традиционно основным фактором старения изоляции принято считать электрические воздействия, сопровождающиеся частичными разрядами, современные исследования убедительно демонстрируют значительную роль механических нагрузок в процессе деградации изоляционных систем [2–6].

В процессе эксплуатации на изоляцию воздействует комплекс взаимосвязанных факторов: вибрационные нагрузки, электродинамические усилия при коротких замыканиях, циклические термические напряжения. Эти воздействия могут приводить к прогрессирующим повреждениям, таким как расслоение изоляции, образование микротрещин, ослабление крепления стержней в пазовой и лобовой частях. Указанные дефекты, в свою очередь, создают предпосылки для развития разрядных явлений, что в конечном итоге существенно снижает длительную электрическую прочность изоляционной системы [2, 6–8].

Актуальной задачей современного машиностроения является создание адекватных расчетных моделей обмотки статора, позволяющих прогнозировать ее поведение в реальных условиях эксплуатации [9–12]. Решение этой задачи требует точных данных о комплексе физико-механических характеристик элементов системы изоляции как в исходном состоянии, так и в процессе старения. Однако имеющиеся литературные данные по механическим характеристикам современных отечественных материалов высоковольтной изоляции ограничены и в значительной степени относятся к предыдущим периодам развития изоляционных технологий [13].

В связи с широким распространением двух основных технологий изготовления изоляции – пропитанных лент (Resin-Rich, RR) и вакуум-нагнетательной пропитки (Vacuum Pressure Impregnation, VPI) – представляет значительный научный и практический интерес сравнительный анализ их физико-механических свойств. Целью данной работы является экспериментальное определение и комплексный анализ физико-механических характеристик современных вариантов слюдосодержащей корпусной изоляции, изготовленных по технологиям RR и VPI.

### Образцы и методы исследования

#### Подготовка образцов

Корпусная изоляция обмотки статора ТГ представляет собой композиционную систему на основе слюдосодержащих лент, наносимых послойной намоткой. Данная структура обеспечивает стойкость к комплексному воздействию электрических, тепловых и механических нагрузок в процессе эксплуатации. Исследования проводились на образцах, максимально приближенных по составу и технологии изготовления к реальной изоляции стержней обмотки статора ТГ. Были изготовлены два типа изоляции:

- технология RR: использовалась предварительно пропитанная лента состава: слюдобумага – 45%, стеклоткань – 20%, эпоксिनволачное связующее с отвердителем – 35%. Термопресование проводилось гидростатическим способом в условиях, имитирующих промышленное производство.
- технология VPI: применялась «сухая» лента (слюдобумага – 82%, стеклоткань – 12%, связующее – 4÷12%) с последующей пропиткой эпоксидным диановым компаундом с ангидридным отвердителем в условиях вакуума и повышенного давления.

Принципиальная схема изготовления изоляции этих вариантов приведена на рис. 1. Несмотря на разные технологические схемы изготовления, окончательная структура изоляции в обоих случаях должна быть одинаковой.

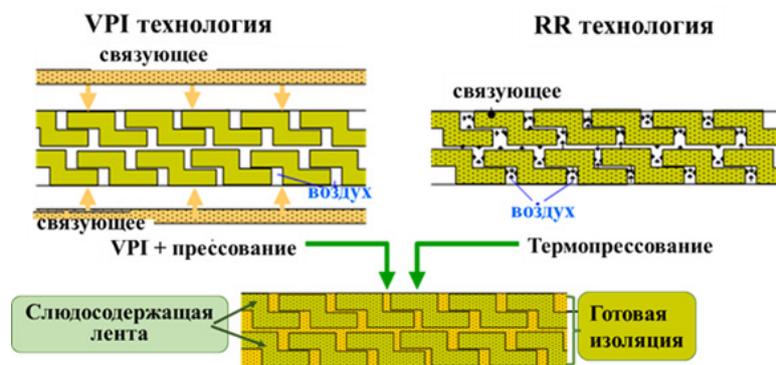


Рис. 1. Принципиальная схема изготовления изоляции по двум технологическим вариантам

Fig. 1. Schematic diagram of insulation manufacturing according to two technological options

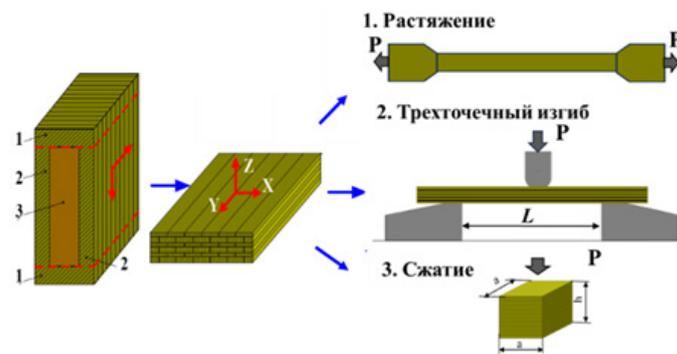


Рис. 2. Принципиальная схема изготовления и испытания образцов изоляции: 1 – часть изоляции для изготовления образцов на сжатие, 2 – часть изоляции для изготовления образцов на растяжение и изгиб, 3 – оправка из стеклотекстолита

Fig. 2. Schematic diagram of the manufacture and testing of insulation samples: 1 – insulation part for manufacturing compression test specimens, 2 – insulation part for manufacturing tensile and bending test specimens, 3 – mandrel made of glass-reinforced epoxy laminate

С учетом анизотропии материала образцы вырезались в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2):

- направление X – поперек направления наложения ленты;
- направление Y – вдоль направления наложения ленты;
- направление Z – перпендикулярно плоскости слоев.

#### Методы исследования

*Определение предела механической прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) изоляции при воздействии растягивающих, сжимающих и изгибающих нагрузок*

Образцы для испытаний изготавливались путем механической вырезки из макетов, имитирующих изоляцию стержней обмотки статора ТГ. Макеты изготавливались по стандартным технологическим процессам, которые применяются для корпусной изоляции обмотки статора ТГ. При изготовлении макетов определенное количество слоев слюдосодержащей ленты наносилось механизированным способом с перекрытием  $\frac{1}{2}$  ширины ленты на оправку (имитирует токоведущую часть обмотки), покрытую антиадгезионной фторопластовой пленкой (рис. 2). После прессования (или пропитки) и отверждения пластины изоляции снимались с оправки и из них вырезались образцы для испытаний.

Испытания проводились на универсальной разрывной машине Instron 1122 при скоростях нагружения 10 мм/мин. Использовались образцы прямоугольного сечения площадью  $13,0 \times (3,0-3,5)$  мм<sup>2</sup> для растяжения и  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> для сжатия. Предел прочности ( $\sigma$ ) определялся по максимальной нагрузке в момент разрушения, модуль упругости ( $E$ ) рассчитывался по тангенсу угла наклона деформационной кривой. Форма и размеры образцов максимально приближены к описанию [13].

Испытания на изгиб проводились по трехточечной схеме нагружения при следующих условиях: расстояние между опорами  $L = 65$  мм, ширина образца  $b = 12$  мм, толщина  $h = 3,0-3,5$  мм. Нагружение производилось перпендикулярно слоям ленты. В этом случае изгибающее напряжение  $\sigma_u$  рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_u = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}. \quad (1)$$



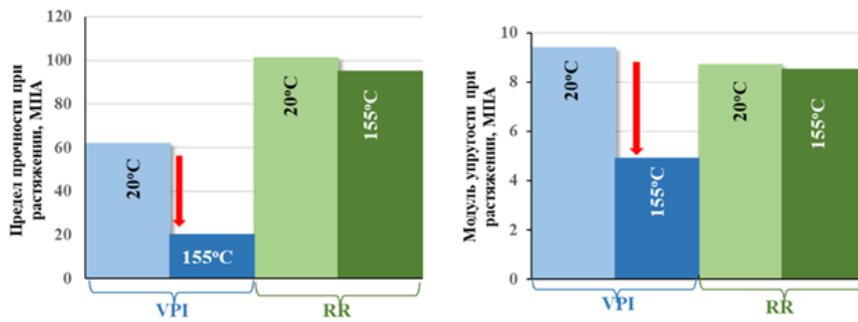


Рис. 4. Физико-механические характеристики вариантов изоляции при растяжении

Fig. 4. Physical and mechanical characteristics of tension insulation options

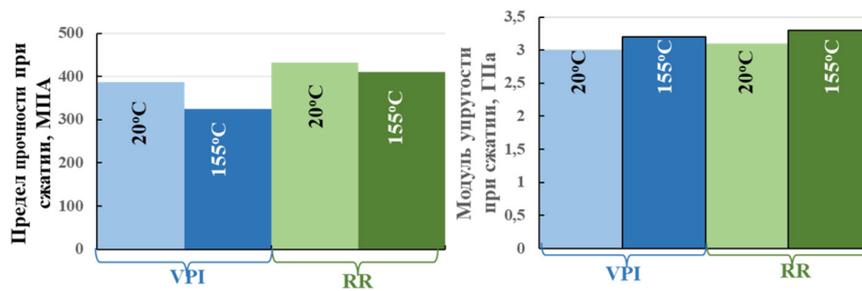


Рис. 5. Физико-механические характеристики вариантов изоляции при сжатии

Fig. 5. Physical and mechanical characteristics of compression insulation options

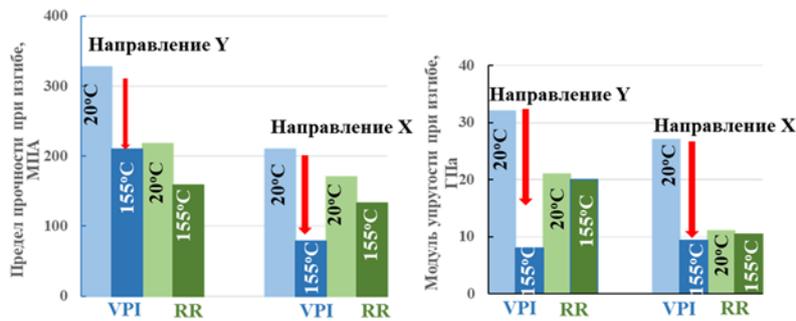


Рис. 6. Физико-механические характеристики вариантов изоляции при изгибе

Fig. 6. Physical and mechanical characteristics of bending insulation options

Полученные значения предела прочности существенно превышают расчетные эксплуатационные нагрузки [2] и согласуются с литературными данными [13]. Температурная стабильность изоляции RR делает ее предпочтительной для работы в условиях повышенных термических воздействий.

*Характеристики изоляции при сдвиговых воздействиях*

Для слоистой композиционной изоляции ключевое значение имеет прочность межслойного сцепления, определяющая монолитность конструкции и стойкость к развитию межслойных разрядов [2, 5]. Экспериментальные исследования выявили существенную анизотропию адгезионных характеристик, зависящую от направления приложения нагрузки.

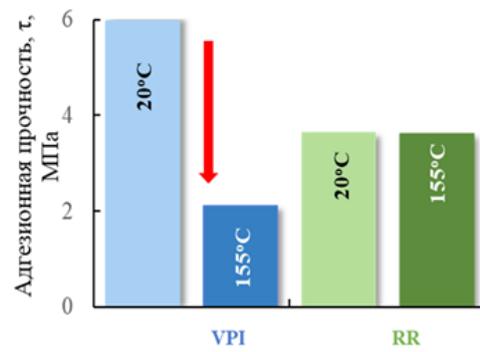


Рис. 7. Результаты определения межслоевой адгезионной прочности  
 Fig. 7. Results of the determination of interlayer adhesive strength

Для изоляции RR прочность при межслойном сдвиге составила 7,2 МПа в направлении Y и 3,6 МПа в направлении X. Указанные различия обусловлены технологическими особенностями нанесения изоляции – повышенной шероховатостью контактирующих поверхностей в зоне перекрытия лент. Наименьшее значение адгезионной прочности (не более 1 МПа) зафиксировано при испытаниях на отрыв в направлении Z.

Температурные испытания демонстрируют сохранение выявленных закономерностей: при 155°C адгезионная прочность изоляции VPI снижается в 2,5 раза, тогда как для изоляции RR остается практически неизменной (рис. 7). Полученные данные подтверждают общую тенденцию термической стабильности характеристик изоляции RR и повышенной чувствительности VPI к температурным воздействиям, что согласуется с результатами механических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб.

#### *Возможные причины снижения механических характеристик при повышении температуры*

Проведенный сравнительный анализ выявил существенную разницу в поведении исследуемых типов изоляции при термовоздействии. Все механические характеристики изоляции VPI демонстрируют значительное снижение при повышении температуры от комнатной до 155°C, в то время как изоляция RR сохраняет стабильность в этом температурном диапазоне. Для установления причин наблюдаемой деградации проведен комплексный анализ потенциальных факторов влияния.

Первоначально исследована гипотеза о влиянии степени отверждения полимерной матрицы на термическую стабильность. Проведены дополнительные эксперименты по увеличению продолжительности отверждения с 12 до 20 часов. Результаты показали отсутствие статистически значимого изменения тангенса диэлектрических потерь (0,036 против 0,034 при 155°C) и не выявили улучшения механических характеристик – модуль упругости сохраняется на уровне 4,9 ГПа, предел прочности составляет 53 МПа. Эти данные свидетельствуют о достижении максимальной степени отверждения в стандартных технологических условиях и позволяют исключить влияние технологического фактора на наблюдаемую термическую деградацию.

Установлено, что доминирующим фактором, определяющим различие в термическом поведении, является химическая природа связующих систем. Для изоляции VPI на основе диановых эпоксидных смол температура стеклования составляет 110–115°C, что подтверждается резким снижением модуля упругости при статическом изгибе в этом температурном диапазоне (рис. 8). Переход через температуру стеклования приводит к значительному увеличению сегментальной подвижности макромолекул и, как следствие, к снижению механических характеристик.

В отличие от этого, изоляция RR на основе эпоксиноволачных смол демонстрирует сохранение механических характеристик до температур свыше 160°C, что свидетельствует о более

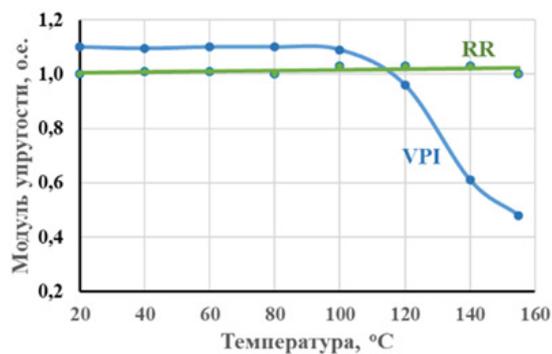


Рис. 8. Зависимость модуля упругости при изгибе  $E_i$  от температуры изоляции RR и VPI  
 Fig. 8. Dependence of the bending modulus of elasticity  $E_i$  on the insulation temperature RR and VPI

высокой температуре стеклования данной системы. Более плотная сшитая структура эпоксидноволачного связующего обеспечивает сохранение жесткости полимерной матрицы в рабочем диапазоне температур. Термогравиметрический анализ дополнительно подтверждает более высокую термическую стабильность изоляции RR: температура 5%-ной потери массы составляет 394°C против 342°C для изоляции VPI. Это различие объясняется большей термоокислительной стабильностью химической структуры эпоксидноволачного связующего.

Таким образом, снижение механических характеристик изоляции VPI при рабочих температурах является следствием фундаментальных различий в химической структуре связующих систем. Хотя это снижение не оказывает прямого влияния на электрическую прочность в статических условиях, оно может приводить к изменению вибрационных характеристик обмотки, ослаблению системы крепления и, как следствие, к интенсификации разрядных процессов в динамических режимах работы генератора. Данное обстоятельство требует строгого контроля температурного режима эксплуатации для изоляции типа VPI и учета температурной зависимости механических характеристик при проектировании систем крепления обмотки.

#### Определение ТКЛР

Сохранение стабильного механического контакта в системе «токоведущая часть — корпусная изоляция — паз статора» при циклических термических воздействиях представляет собой критически важную задачу, решение которой требует точных данных о температурном расширении композиционной изоляции. Нарушение этого контакта вследствие несоответствия ТКЛР компонентов системы может привести к развитию вибрационной эрозии, ослаблению крепления и возникновению разрядных явлений в пазовой части.

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников выявил значительный разброс значений ТКЛР для слюдосодержащей изоляции — от 8 до  $15,6 \cdot 10^{-6}$  1/K [13]. Детальное изучение методик измерений, приведенных в литературе, показало, что такой широкий диапазон значений, вероятно, обусловлен отсутствием в большинстве публикаций четких указаний о направлении измерений относительно структурной анизотропии материала, а также различиями в методах определения коэффициента расширения.

Проведенные экспериментальные исследования выявили выраженную анизотропию коэффициента линейного расширения (табл. 1). В направлениях X и Y, соответствующих плоскости изоляции, значения ТКЛР находятся в диапазоне  $8-12 \cdot 10^{-6}$  1/K, что хорошо согласуется с литературными данными для слюдосодержащих композитов. Напротив, в направлении Z (перпендикулярно плоскости слоев) зафиксированы значительно более высокие значения — от 25 до  $90 \cdot 10^{-6}$  1/K, причем разброс значений коррелирует с содержанием связующего и качеством термопрессования.

Таблица 1

Значения ТКЛР изоляции RR при температуре 120°C при разном содержании компонентов

Table 1

Values of the coefficient of linear expansion of insulation RR  
at a temperature of 120°C with different component contents

Направление нагрузки	Значение ТКЛР·10 <sup>6</sup> 1/К			Содержание компонентов (массовое), %			
	Эксперимент	Расчет для схемы			Слюда	Стеклоткань	Связующее
		1	2	3			
Y	8,4–9,7	44,5	17,5	15,2	44,6	17,2	38,1
X	12,3–12,2						
Z	42,4–89,7						
Y	9,7–10,1	39,1	15,0	14,2	50,4	19,5	30,1
X	9,1–9,2						
Z	25,8–48,4						

Полученные экспериментальные данные демонстрируют хорошее соответствие с значениями ТКЛР эпоксидного связующего ( $50\text{--}70 \cdot 10^{-6}$  1/град) [13–16] и подтверждают положения работы [7] о превышении ТКЛР изоляции в направлении Z над ТКЛР стали статора в 3,2 раза. Это несоответствие создает предпосылки для возникновения значительных термических напряжений на границе раздела материалов.

Теоретический расчет ТКЛР ( $\alpha$ ) при известных значениях объемных долей компонентов ( $V_i$ ) для трех схем соединения компонентов в композите: 1 – параллельной ( $\alpha = \sum \alpha_i \cdot V_i$ ), 2 – последовательной ( $\alpha = \sum \alpha_i / V_i$ ), 3 – статистической смеси ( $\alpha = \prod \alpha_i^{V_i}$ ) для слюдосодержащей изоляции ( $\alpha_i$  – ТКЛР компонентов: слюда –  $8 \cdot 10^{-6}$  1/К, стекло –  $10 \cdot 10^{-6}$  1/К, связующее –  $70 \cdot 10^{-6}$  1/К) – подтверждает экспериментально наблюдаемое значительное увеличение коэффициента расширения в направлении, перпендикулярном слоям изоляции.

Выявленная значительная анизотропия ТКЛР имеет критическое значение для проектирования систем пазового крепления обмотки и предотвращения развития разрядных процессов в пазовой части генератора. Однако полученные результаты требуют дополнительного экспериментального подтверждения и уточнения в части влияния технологических параметров изготовления изоляции на величину температурного расширения.

#### *Изменение физико-механических характеристик изоляции в процессе теплового старения*

Известно, что в процессе эксплуатации на изоляцию электрических машин действует комплекс факторов: электрические, механические, тепловые и другие нагрузки. Как правило, все они ведут к ухудшению характеристик изоляции – происходит так называемое старение материала. При длительном воздействии высокой рабочей температуры на изоляцию класса F (155°C) образуются поры, трещины и в целом снижается содержание связующего, что ведет к снижению монолитности всей изоляционной конструкции. Наиболее уязвимой компонентой к тепловому старению является полимерное связующее изоляции. Под действием высокой температуры и окислителей происходит так называемая термоокислительная деструкция органической компоненты. Тепловое старение изоляции обмотки статора представляет собой

сложный физико-химический процесс, обусловленный необратимыми изменениями в структуре полимерного связующего. При длительном воздействии повышенных температур происходят следующие основные процессы: постотверждение остаточных функциональных групп, окисление макромолекул, термическая деструкция сшитой структуры и образование летучих продуктов. Эти процессы приводят к изменению молекулярной массы, степени сшивки и, как следствие, механических характеристик материала. Как известно, скорость химической реакции зависит от температуры. Соответственно, повышение температуры относительно рабочего уровня позволяет интенсифицировать протекание химических реакций, т.е. ускорить тепловое старение и тем самым смоделировать воздействие эксплуатационного фактора.

Для количественной оценки долговечности изоляции и сравнительных оценок двух систем изоляции (RR и VPI) был применен метод ускоренного теплового старения в соответствии с испытаниями на нагревостойкость по ГОСТ 27710-88. Ускоренное тепловое старение при трех температурных режимах (180, 200 и 220°C) соответствует принципу ускорения старения с шагом 20°C выше температуры класса нагревостойкости F (155°C). Тепловое старение проводилось циклически, в перерывах между циклами часть образцов изоляции подвергалась разрушающему контролю. Чем выше температура старения, тем быстрее будут происходить изменения в изоляции, поэтому длительности циклов были выбраны следующим образом. Продолжительность единичных циклов старения составляла 17 (180°C), 6 (200°C) и 2 (220°C) суток соответственно. Количество циклов старения составляло не менее пяти. Это обеспечивало сопоставимую степень деградации материала на разных температурных уровнях.

В качестве контролируемых индикаторов в процессе теплового старения изоляции были выбраны механические характеристики изоляции. Мониторинг механических характеристик после каждого цикла старения выявил следующие закономерности:

- все виды механических характеристик (предел прочности при растяжении, сжатии, изгибе и модули упругости) изменяются синхронно и однонаправленно;
- сохраняется установленное ранее соотношение между значениями характеристик при комнатной температуре и 155°C;
- изоляция RR демонстрирует более высокую стабильность на всех этапах старения.

Интерпретируя данные по результатам испытаний на тепловое старение, авторы статьи опирались на допущение о том, что «логарифм времени до разрушения образцов линейно зависит от величины обратной термодинамической температуры старения (уравнение Аррениуса), по крайней мере, во всем диапазоне, включающем все испытательные и экстраполируемые точки»<sup>1</sup>. Таким образом, для построения математической модели старения было использовано выражение для срока долговечности в форме  $\ln t = G + W/(kT)$ , выведенное на основе уравнения Аррениуса, где  $W$  – энергия активации процесса старения, Дж;  $k$  – постоянная Больцмана, эВ/К;  $t$  – время до достижения критерия отказа, ч;  $T$  – абсолютная температура, К;  $G$  – предэкспоненциальный множитель.

Следует иметь в виду, что индикатором теплового старения является не только физическое разрушение материала, но и потеря эксплуатационных свойств, например снижение сопротивления изоляции или уровня пробивного напряжения и др. Выбор такого индикатора или критерия конечной точки (ККТ) представляет собой отдельную методическую задачу. Использование концепции критической деформации ( $\epsilon_{кр} = 1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-4}$  [13]), при которой происходит потеря материалом электрической прочности, оказалось невозможным, так как расчетные значения критических напряжений  $\sigma_{кр}$  существенно ниже (в 5÷30 раз) экспериментально определенных пределов прочности. Поэтому в качестве ККТ было выбрано снижение механической прочности на 50% относительно исходного уровня, то есть  $ККТ = \sigma_{50\%}$  (что равносильно  $\ln ККТ = \ln \sigma_{50\%}$ ). Для многих изоляционных материалов и систем такой ККТ является весьма распространенным

<sup>1</sup> Государственный комитет СССР по стандартам. Материала электроизоляционные. ГОСТ 27710-88. 1988. 55 с.

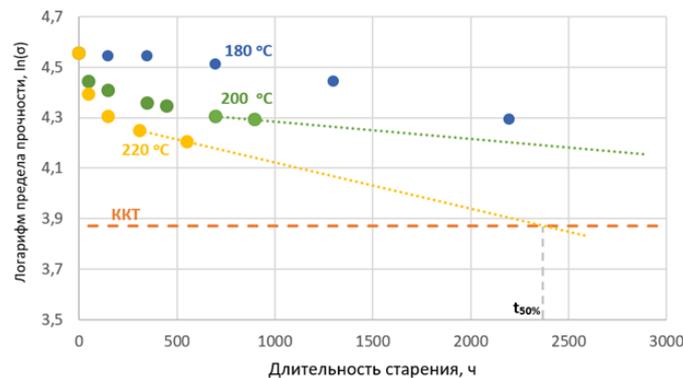


Рис. 9. Изменение предела прочности при растяжении в процессе теплового старения изоляции RR при трех температурах старения

Fig. 9. Change in tensile strength during thermal ageing of RR insulation at different temperatures

(см. ГОСТ 10518-88). Несмотря на то, что в проведенных испытаниях 50%-ное снижение характеристик не было достигнуто, для температур 200 и 220°C наблюдалась стабилизация скорости старения по механическим характеристикам, то есть кривая старения принимает линейный характер в логарифмическом масштабе. Для определения параметров закона теплового старения с заданной степенью достоверности необходимы результаты испытания на тепловое старение по крайней мере при трех повышенных температурах. Однако для получения сравнительных оценок долговечности достаточно и двух, поскольку в логарифмических координатах закон старения дает прямую  $\ln t = f(1/T)$  с двумя априори неизвестными коэффициентами. В рамках предположения, что скорости теплового старения для температур 200 и 220°C установились, зависимости  $\ln \sigma = f(t)$  были экстраполированы до пересечения с уровнем  $\ln \text{ККТ} = \ln \sigma_{50\%}$  (рис. 9). По точкам пересечения были определены времена достижения ККТ для двух температур старения  $t_{50\%}$ : для 200°C – 7085 ч (не отображена на графике рис. 9), для 220°C – 2383 ч.

Далее по значениям обратных температур старения в абсолютных единицах и соответствующих сроков долговечности  $t_{50\%}$  были определены параметры закона теплового старения, как например для RR изоляции:

$$\ln t_{50\%} = \ln G + \frac{W}{kT} = a + b \frac{1}{T}; \quad (2)$$

$$200^\circ\text{C}: \ln 7085 = a + b \frac{1}{200 + 273}; \quad (3)$$

$$220^\circ\text{C}: \ln 2383 = a + b \frac{1}{220 + 273}; \quad (4)$$

$$\Rightarrow a = -17,99, b = 12704. \quad (5)$$

Из полученных параметров закона теплового старения также можно определить энергию активации процесса старения. Она пропорциональна углу наклона линейной функции  $\ln(t_{50\%}) = f(1/T)$  и может быть найдена путем умножения углового коэффициента на постоянную Больцмана.

По результатам обработки данных испытаний по ускоренному тепловому старению получены следующие выражения для долговечности:

- для изоляции RR:  $\ln(t_{50\%}) = -17,99 + 12704 \cdot (1/T)$ ,  $W = 1,09$  эВ,
- для изоляции VPI:  $\ln(t_{50\%}) = -14,63 + 11107 \cdot (1/T)$ ,  $W = 0,95$  эВ.

Значения энергии активации теплового старения согласуются с литературными данными (0,88–1,09 эВ [13]). Используя полученные выражения, можно спрогнозировать время  $t_{50\%}$  для максимальной рабочей температуры, которая для класса нагревостойкости F составляет 155°C.

Таким образом, спрогнозированное время достижения 50%-ного снижения предела прочности  $t_{50\%}$  при растяжении изоляции, эксплуатируемой при 155°C, превышает требования ГОСТ 8865-93, который для класса нагревостойкости предписывает сохранение не менее 50% от исходного уровня механических характеристик после 20000 часов эксплуатации изоляции:

- для изоляции RR – в 13,6 раза;
- для изоляции VPI – в 9,4 раза.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточном запасе долговечности исследуемых материалов и подтверждают возможность их применения в высоковольтных ТГ с учетом температурного режима эксплуатации.

### Заключение

В работе изучены физико-механические характеристики при растяжении сжатии, изгибе, межслойном сдвиге и температурном расширении корпусной композиционной слюдосодержащей изоляции обмотки статора высоковольтных генераторов, изготовленной по двум технологическим вариантам – технологии пропитанных лент (RR) и технологии вакуум-нагнетательной пропитки (VPI) – в исходном состоянии и в процессе ускоренного теплового старения.

Экспериментально подтверждена термическая стабильность изоляции RR: при повышении температуры от 20 до 155°C предел прочности при изгибе снижается всего на 30–40% (со 100 МПа до 60–70 МПа), а модуль упругости сохраняется на уровне 85–90% от исходного значения. Это обусловлено высокой температурой стеклования эпоксиноволачного связующего (> 160°C).

Обнаружено критическое снижение характеристик изоляции VPI при рабочей температуре: при 155°C предел прочности при изгибе уменьшается в 4–5,5 раз (со 120 МПа до 22–30 МПа), а модуль упругости снижается с 15 ГПа до 3–4 ГПа. Данное явление обусловлено низкой температурой стеклования дианового связующего (110–115°C) и требует строгого контроля температурного режима эксплуатации.

Определена выраженная анизотропия ТКЛР материала корпусной изоляции: в направлении Z (перпендикулярно слоям) коэффициент расширения составляет  $25-90 \cdot 10^{-6}$  1/К, что в 3,0–3,5 раза превышает значения в плоскости изоляции ( $8-12 \cdot 10^{-6}$  1/К) и в 2,5–3,0 раза выше ТКЛР стали статора ( $11 \cdot 10^{-6}$  1/К). Данный фактор необходимо учитывать при расчетах термических напряжений в системе крепления обмотки.

Ускоренное тепловое старение показало, что при температуре 155°C время достижения 50%-ного снижения механических характеристик для изоляции VPI и RR превышает требования стандарта в 9,4 и 13,6 раз соответственно. Энергия активации процесса старения составляет 0,95–1,09 эВ для обоих материалов.

Полученные количественные данные позволяют рекомендовать изоляцию RR для применений с повышенными термическими нагрузками, в то время как применение изоляции VPI требует дополнительных мер по тепловому контролю и усовершенствованию системы крепления обмотки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Brütsch R., Tari M., Fröhlich K., Weiers T., Vogelsang R.** Insulation failure mechanisms of power generators [Feature article], *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24 (4) (2008) 17–25. DOI: 10.1109/MEI.2008.4581636
- [2] **Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Андреев А.М., Балыков О.С., Баранов В.С., Белько В.О.** Обзор методик оценки технического состояния электрической изоляции обмоток статоров высоковольтных турбогенераторов с воздушным охлаждением, находящихся в эксплуатации // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2025. Т. 18, № 4. С. 90–105. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-90-105
- [3] **Elspace L., Schlegel S., Kosse M.** Detecting thermomechanical ageing of rotating high-voltage machines: investigating the influence of the time between mechanical stress and diagnostic measurement, 2024 *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, (2024) 316–320. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579281
- [4] **Khazanov A., Gegenava A.** Evaluation of the dissection of coils for stator winding for high voltage rotating machines, 2024 *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, (2024) 192–195. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579279
- [5] **Корчагин Н.Ю., Серебрянников С.В., Серебрянников С.С., Черкасов А.П.** Контроль остаточных свойств изоляции турбогенератора // XVIII Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». 2020. С. 18–23.
- [6] **Wong T., Timoshkin I., MacGregor S., Wilson M., Given M.** Dielectric interfaces in high-voltage technology: Overview and theoretical approaches to the modeling of functional and breakdown behavior, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4 (39) (2023) 34–49. DOI: 10.1109/MEI.2023.10151812
- [7] **Liese M., Brown M.** Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings, *IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 4 (15) (2008) 927–932. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591212
- [8] **Ren W., Du D., Du Y.** Electrical contact resistance of connector response to mechanical vibration environment, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2 (10) (2020) 212–219. DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2935478
- [9] **Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., Железняк В.Н.** Повышение эксплуатационной надежности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки // *Глобальная энергия*. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–89. DOI: 10.18721/JEST.29305
- [10] **Шевчук Р.Э., Гаев А.В.** Метод приближенного решения задачи о колебаниях сердечников статоров // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2017. Т. 23, № 1. С. 98–106. DOI: 10.18721/JEST.230110
- [11] **Железняк В.Н., Коровкин Н.В.** Повышение мощности короткого замыкания ударных генераторов для обеспечения эксплуатационных режимов // *Электричество*. 2022. № 11. С. 46–55. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-11-46-55
- [12] **Чишко С.Д.** Исследование электродинамических процессов в торцевой зоне статора турбогенератора в переходных режимах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2024. 28 с.
- [13] **Пак В.М., Трубочев С.Г.** Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 2007. 416 с.
- [14] **Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Chernyshev D.A.** Mechanical characteristics of insulation system materials characteristics for high-voltage generators, 2024 *Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*, (2024) 589–593. DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468416
- [15] **Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Chernyshev D.A.** Investigation of mechanical characteristics of pressuring materials of generators stator winding in thermal aging process, 2023 *Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP)*, (2023) 27–30. DOI: 10.1109/MDP60436.2023.10424112

- [16] **Ivanov I.O., Reznik A.S., Feklistov E.G., Shikova T.M., Fedotov N.A., Petrenya Y.K.** Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2022) 1017–1021. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755593
- [17] **Bolotin V.V.** Mechanics of delaminations in laminate composite structures, *Mechanics of Composite Materials*, 37 (2001) 367–380. DOI: 10.1023/A:1014210527476
- [18] **Gegenava A., Khazanov A.** Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. “Three Steps Test” TST, 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/EIC55835.2023.10177305
- [19] **Nikolaev A., Khazanov A., Gegenava A.** Optimization of thermal cycle testing setup of bars of high-voltage turbo generator, 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2025) 1–6. DOI: 10.1109/EIC63069.2025.11123276
- [20] **Cimino A., Jenau F., Staubach C.** Finite-element-model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines, 2019 54<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC), (2019) 1–4. DOI: 10.1109/UPEC.2019.8893473
- [21] **Cimino A., Staubach C., Jenau F.** Analysis of accelerated multi-factor aging tests on the winding insulation system of generator stator bars used in large rotating machines, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2018) 110–113. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481029
- [22] **Huang X., Ji S., Xu M., Zhang F.** Aging state evaluation of oil-paper insulation based on electro-mechanical impedance technology, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 31 (5) (2024) 2853–2856. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3433321
- [23] **Hu S., Zhang M., Liu J., Zhang W., Maksimenko S.** Study on the Change Rule of Electro-Optical Frequency Dielectric Characteristics in Epoxy Resin Insulation Systems Under Multifactorial Combined Aging, 2025 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–5. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122992
- [24] **Zhou B., Cai F., Gao K., Xue J.** Comparative study on key aging characteristics of XLPE material for high-voltage cables with different service years, 2025 4<sup>th</sup> International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET), (2025) 73–76. DOI: 10.1109/ICEPET65469.2025.11047299
- [25] **Ogbonna V.E., Popoola A.P.I., Popoola O.M.** Assessment of mechanical and dielectric behaviour of sintered E-CR glass reinforced polyimide composite insulator core for mechanical load-bearing and high voltage insulation applications, 2023 IEEE AFRICON, (2023) 1–3. DOI: 10.1109/AFRICON55910.2023.10293428
- [26] **Wang C., Zhang J., Li Z., Liu J., Zhang M.** Study on the aging mechanism of epoxy impregnated glass fiber composite materials under multi-factor aging, 2025 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–4. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122936

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БЕЛЬКО Виктор Олегович** – директор Высшей Школы Высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vobelko@spbstu.ru

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

**МАННАНОВ Эмиль Рамилевич** – руководитель группы, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

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

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

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

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

**ФЕДОТОВ Никита Алексеевич** – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: nifed4@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

**ФЕКЛИСТОВ Ефрем Геннадьевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

**ШИКОВА Татьяна Михайловна** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: shikova\_tm@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-6534>

## REFERENCES

- [1] **R. Brüttsch, M. Tari, K. Fröhlich, T. Weiers, R. Vogelsang**, Insulation failure mechanisms of power generators [Feature article], IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (4) (2008) 17–25. DOI: 10.1109/MEI.2008.4581636
- [2] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.M. Andreev, O.S. Balykov, V.S. Baranov, V.O. Belko**, Review of methods for assessing the technical condition of the electrical insulation stator windings of air-cooled turbogenerators in operation, LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science, 18 (4) (2025) 90–105. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-90-105
- [3] **L. Elspass, S. Schlegel, M. Kosse**, Detecting thermomechanical ageing of rotating high-voltage machines: investigating the influence of the time between mechanical stress and diagnostic measurement, 2024 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2024) 316–320. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579281
- [4] **A. Khazanov, A. Gegenava**, Evaluation of the dissection of coils for stator winding for high voltage rotating machines, 2024 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2024) 192–195. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579279
- [5] **N.Iu. Korchagin, S.V. Serebriannikov, S.S. Serebriannikov, A.P. Cherkasov**, Kontrol' ostatochnykh svoystv izoliatsii turbogeneratora [Control of residual properties of turbogenerator insulation], XVIII Mezhdunarodnaia konferentsiia “Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskie materialy i komponenty” [XVIII International Conference “Electromechanics, Electrotechnology, Electrical Materials and Components”], (2020) 18–23.
- [6] **T. Wong, I. Timoshkin, S. MacGregor, M. Wilson, M. Given**, Dielectric interfaces in high-voltage technology: Overview and theoretical approaches to the modeling of functional and breakdown behavior, IEEE Electrical Insulation Magazine, 4 (39) (2023) 34–49. DOI: 10.1109/MEI.2023.10151812
- [7] **M. Liese, M. Brown**, Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings, IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 4 (15) (2008) 927–932. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591212
- [8] **W. Ren, D. Du, Y. Du**, Electrical contact resistance of connector response to mechanical vibration environment, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2 (10) (2020) 212–219. DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2935478

- [9] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.G. Filin, V.N. Zheleznyak**, Improvement of operational reliability of air-cooled turbogenerators for a gas turbine plant, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 74–89. DOI: 10.18721/JEST.29305
- [10] **R.E. Shevchuk, A.V. Gaev**, An approximate solution method to stator core vibration problem, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (1) (2017) 98–106. DOI: 10.18721/JEST.230110
- [11] **V.N. Zheleznyak, N.V. Korovkin**, Increasing the Short-Circuit Capacity of Impact-Excited Generators to Ensure the Required Operation Modes, *Elektrichestvo*, 11 (2022) 46–55. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-11-46-55
- [12] **S.D. Chishko**, Issledovanie elektrodinamicheskikh protsessov v tortsevoi zone statora turbogeneratora v perekhodnykh rezhimakh. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Study of electrodynamic processes in the end zone of a turbogenerator stator in transient modes. Kand. tech. sci. diss.], St. Petersburg, 2024.
- [13] **V.M. Pak, S.G. Trubachev**, *Novye materialy i sistemy izolyatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin* [New materials and insulation systems for high-voltage electrical machines], Moscow: Energoatomizdat, 2007. 416 p.
- [14] **N.A. Fedotov, T.M. Shikova, V.O. Belko, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov, D.A. Chernyshev**, Mechanical characteristics of insulation system materials characteristics for high-voltage generators, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), (2024) 589–593. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468416
- [15] **N.A. Fedotov, T.M. Shikova, V.O. Belko, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov, D.A. Chernyshov**, Investigation of mechanical characteristics of pressuring materials of generators stator winding in thermal aging process, 2023 Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), (2023) 27–30. DOI: 10.1109/MDP60436.2023.10424112
- [16] **I.O. Ivanov, A.S. Reznik, E.G. Feklistov, T.M. Shikova, N.A. Fedotov, Y.K. Petrenya**, Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2022) 1017–1021. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755593
- [17] **V.V. Bolotin**, Mechanics of delaminations in laminate composite structures, *Mechanics of Composite Materials*, 37 (2001) 367–380. DOI: 10.1023/A:1014210527476
- [18] **A. Gegenava, A. Khazanov**, Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. “Three Steps Test” TST., 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/EIC55835.2023.10177305
- [19] **A. Nikolaev, A. Khazanov, A. Gegenava**, Optimization of thermal cycle testing setup of bars of high-voltage turbo generator, 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2025) 1–6. DOI: 10.1109/EIC63069.2025.11123276
- [20] **A. Cimino, F. Jenau, C. Staubach**, Finite-element-model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines, 2019 54<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC), (2019) 1–4. DOI: 10.1109/UPEC.2019.8893473
- [21] **A. Cimino, C. Staubach, F. Jenau**, Analysis of accelerated multi-factor aging tests on the winding insulation system of generator stator bars used in large rotating machines, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2018) 110–113. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481029
- [22] **X. Huang, S. Ji, M. Xu, F. Zhang**, Aging state evaluation of oil-paper insulation based on electro-mechanical impedance technology, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 31 (5) (2024) 2853–2856. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3433321
- [23] **S. Hu, M. Zhang, J. Liu, W. Zhang, S. Maksimenko**, Study on the Change Rule of Electro-Optical Frequency Dielectric Characteristics in Epoxy Resin Insulation Systems Under Multifactorial Combined Aging, 2025 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–5. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122992

[24] **B. Zhou, F. Cai, K. Gao, J. Xue**, Comparative study on key aging characteristics of XLPE material for high-voltage cables with different service years, 2025 4<sup>th</sup> International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET), (2025) 73–76. DOI: 10.1109/ICEPET65469.2025.11047299

[25] **V.E. Ogbonna, A.P.I. Popoola, O.M. Popoola**, Assessment of mechanical and dielectric behaviour of sintered E-CR glass reinforced polyimide composite insulator core for mechanical load-bearing and high voltage insulation applications, 2023 IEEE AFRICON, (2023) 1–3. DOI: 10.1109/AFRICON55910.2023.10293428

[26] **C. Wang, J. Zhang, Z. Li, J. Liu, M. Zhang**, Study on the aging mechanism of epoxy impregnated glass fiber composite materials under multi-factor aging, 2025 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–4. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122936

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Victor O. BELKO** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: vobelko@spbstu.ru

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

**Emil R. MANNANOV** – *JSC “Power machines”.*

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

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

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

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

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

**Nikita A. FEDOTOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nifed4@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

**Efrem G. FEKLISTOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

**Tatyana M. SHIKOVA** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: shikova\_tm@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-6534>

**Поступила: 16.09.2025; Одобрена: 27.10.2025; Принята: 25.11.2025.**

**Submitted: 16.09.2025; Approved: 27.10.2025; Accepted: 25.11.2025.**