

## Анализ уровня технических разработок полимерных материалов с высокой теплопроводностью для оценки возможности использования в системах изоляции обмоток турбогенераторов

Э. Р. Маннанов<sup>1✉</sup>, А. М. Костельов<sup>1</sup>, А. И. Таджибаев<sup>2</sup>, А. М. Андреев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Петербургский энергетический институт повышения квалификации (ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»), Санкт-Петербург, Россия

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

**Аннотация.** Приведен обзор отечественных и зарубежных научно-технических решений, сопряженных с вопросами создания высокотеплопроводных полимерных материалов и пропиточных лаков, а также высокотеплопроводных полимерных материалов, обладающих полупроводящими электрическими свойствами. С целью оценки уровня техники рассмотрены ключевые аспекты создания электроизоляционных лент корпусной изоляции и материалов пазового уплотнения с повышенной теплопроводностью для обмоток статоров турбогенераторов. В ходе выполнения инженерно-технического анализа оценен уровень технического развития, освещены тенденции, относящиеся к электроизоляционным материалам с высокой теплопроводностью.

**Ключевые слова:** электроизоляционный материал, статорная обмотка, слюдосодержащая лента, высокотеплопроводная диэлектрическая лента, композитный материал

**Для цитирования:** Анализ уровня технических разработок полимерных материалов с высокой теплопроводностью для оценки возможности использования в системах изоляции обмоток турбогенераторов / Э. Р. Маннанов, А. М. Костельов, А. И. Таджибаев, А. М. Андреев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 21–35. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-21-35.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

## Analysis of Technical Level Developments of Polymeric Materials with High Thermal Conductivity to Assess the Possibility of Using Turbogenerator Windings in Insulation Systems

E. R. Mannanov<sup>1✉</sup>, A. M. Kostelov<sup>1</sup>, A. I. Tajibaev<sup>2</sup>, A. M. Andreev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «Power Machines», Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Petersburg Power Engineering Institute of the Professional Development (FGAOU DPO «PEIPK»), Saint Petersburg, Russia

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

**Abstract.** Provides an overview of domestic and foreign scientific and technical solutions related to the creation of highly thermally conductive polymeric materials and impregnating varnishes, as well as highly thermally conductive polymeric materials with semiconductive electrical properties. In order to assess the state-of-art, the key aspects of creating electrical insulating tapes for main insulation and materials for slot seals with increased thermal conductivity for stator windings of turbogenerators are considered. Within engineering analysis, the level of technical development is assessed, and trends related to electrical insulating materials with high thermal conductivity are highlighted.

**Keywords:** electrical insulating material, stator winding, mica tape, high thermal conductivity dielectric tape, composite material

**For citation:** Analysis of Technical Level Developments of Polymeric Materials with High Thermal Conductivity to Assess the Possibility of Using Turbogenerator Windings in Insulation Systems / E. R. Mannanov, A. M. Kostelov, A. I. Tajibaev, A. M. Andreev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 21–35. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-21-35.

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

**Введение.** Развитие высокоэффективных, требующих меньших капиталовложений и сокращенных сроков ввода в эксплуатацию электростанций с газотурбинными установками, с установками комбинированного цикла потребовало высокоманевренных, простых в обслуживании турбогенераторов, к которым можно отнести турбогенераторы с воздушным охлаждением. Для комплектации парогазовых установок, имеющих наибольшие перспективы поставок в ближайшие годы, требуются турбогенераторы повышенной единичной мощности до 400 МВт и выше. Ключ к успеху в данном случае лежит в части совершенствования системы охлаждения и повышении степени использования конструкционных материалов. Эффективность системы охлаждения определяет возможности роста единичной мощности электрических машин, в то же время электрическая изоляция обеспечивает необходимую электрическую прочность, но действует как тепловой барьер, ограничивающий эффективность системы охлаждения [1].

Современная конструкция изоляции обмотки статора турбогенераторов средней и высокой мощности представляет собой многослойную конструкцию, получаемую путем наложения электроизоляционных лент на токопроводящий элемент плетеного стержня обмотки. Для подавления вибрации и снижения вероятности возникновения разрядной активности выполняется уплотнение обмотки в пазе статора [2]–[14]. Для этой цели могут применяться различные конструктивные решения, распространенное решение заключается в применении упругих прокладок из электропроводящего материала в боковом направлении и диэлектрического материала в радиальном направлении.

Простой расчет показывает, что тепловое сопротивление элементов конструкции определяется в основном корпусной изоляцией, на которую приходится до 75 % вклада в общее тепловое сопротивление в зависимости от толщины изоляции и конструктивными элементами бокового уплотне-

ния, на которые может приходиться до 12 % вклада в общее тепловое сопротивление. Вклад остальных конструктивных элементов и конструктивных особенностей незначителен [15], [16].

Корпусная изоляция представляет собой полимер с анизотропной гетерогенной структурой, изготавливается наложением электроизоляционных лент, состоящих из слюдяной бумаги, обеспечивающей диэлектрические свойства, подложки из стеклоткани, обеспечивающей физико-механические характеристики, и связующего электроизоляционного лака, обеспечивающего монолитность конструкции после запечки корпусной изоляции [17]–[22].

Упругие прокладки пазового уплотнения также представляют собой полимер с анизотропной гетерогенной структурой, которые изготавливают прессованием и отверждением нескольких слоев стеклоткани, пропитанных проводящим лаком. Коэффициент теплопроводности такого материала выше показателей для корпусной изоляции, но все же недостаточен для эффективного применения.

Наименьшим коэффициентом теплопроводности в конструкции лент и прокладок обладает связующее, поэтому наиболее простым и эффективным способом увеличения этого показателя служит повышение теплопроводности пропиточных лаков [23].

Создание высокотеплопроводных изоляционных материалов и материалов пазового уплотнения – важная задача, решение которой позволит создавать турбогенераторы, с недостижимым ранее уровнем характеристик.

В связи с этим актуальным становится проведение оценки технического уровня развития: высокотеплопроводных полимерных материалов и пропиточных лаков, обладающих диэлектрическими свойствами; высокотеплопроводных полимерных материалов и пропиточных лаков, обладающих полупроводящими электрическими свойствами; высокотеплопроводных слюдосодержащих электроизоляционных лент.

**1. Диэлектрические полимерные материалы, содержащие тонкодисперсные наполнители. Общие вопросы повышения теплопроводности полимерных материалов.** При анализе литературы в первую очередь были рассмотрены наиболее распространенные методы создания высокотеплопроводных полимерных материалов.

Основным способом повышения теплопроводности полимеров служит введение в их состав наполнителей, обладающих собственной высокой теплопроводностью. Наиболее значительный вклад в теплопроводность полимерного композиционного материала вносят наполнители микронного размера. В зависимости от стоящих перед инженерами-разработчиками и исследователями задач в полимеры вводились микронные порошки с размером частиц от 0.5 до 50.0 мкм.

В качестве материалов теплопроводных наполнителей могут выступать как соединения, обладающие диэлектрическими свойствами, так и электропроводящие материалы. К первой группе относятся нитриды и оксиды различных элементов (BN, AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, ZnO, BeO, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а также алмаз (природный либо синтетический) [24]–[26]. Ко второй группе можно отнести металлы (Cu, Al, Ni, Ag и другие) и некоторые полупроводники (например, SiC, легированный алюминием ZnO).

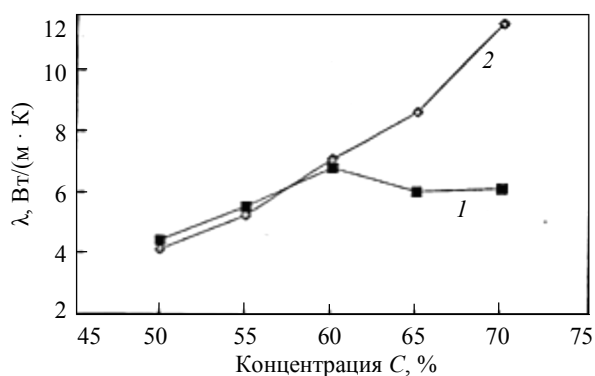


Рис. 1. Зависимость теплопроводности композиций, наполненных порошками нитрида бора со средним размером частиц 15 мкм (1) и 45 мкм (2), от концентрации наполнителей

Fig. 1. Dependence of the thermal conductivity of compositions filled with boron nitride powders with an average particle size of 15 μm (1) and 45 μm (2) on the concentration of fillers

При использовании наполнителей микронного размера большое значение имеет размер частиц. Авторы [27] исследовали влияние порошков BN различной дисперсности (размер частиц – 15 и 45 мкм) на свойства полимерной композиции. Зави-

симость коэффициента теплопроводности композиций, наполненных данными порошками, от концентрации нитрида бора представлена на рис. 1.

Из рисунка видно, что при больших концентрациях порошки меньшей дисперсности сильнее повышают теплопроводность композиции.

Помимо значения коэффициента теплопроводности важной характеристикой композиций служит вязкость. Значительное количество наполнителя может сделать композицию нетехнологичной. Влияние количества наполнителей различной дисперсности на текучесть композиции проиллюстрировано на рис. 2.

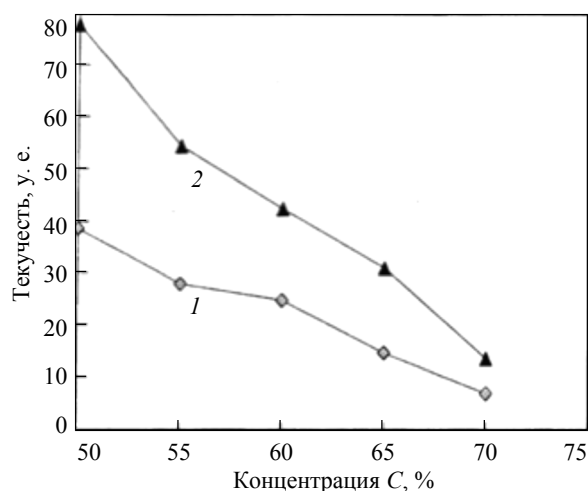


Рис. 2. Зависимость текучести композиций, наполненных порошками нитрида бора со средним размером частиц 15 мкм (1) и 45 мкм (2), от их содержания

Fig. 2. Dependence of the fluidity of compositions filled with boron nitride powders with an average particle size of 15 μm (1) and 45 μm (2) on their content

Известно, что текучесть – это величина, обратная вязкости. В данном случае она определялась методом Spiral Flow Test (испытание на текучесть в спирали), основанным на измерении длины затекания определенного объема материала при контролируемых давлении и температуре в литьевую форму, имеющую вид спирали. Под условными единицами на рисунке понимается данное расстояние, выраженное в футах. Как видно из рис. 2, применение тонкодисперсных наполнителей более выгодно с точки зрения влияния на вязкость композиции.

Помимо размера частиц наполнителя характеристики композиции зависят и от их формы. Авторы [28] предлагают использовать наполнители с вытянутыми частицами, имеющими отношение длины к размерам в других направлениях от 3 до 100. Теплопроводность в полимерах обусловлена

фононным механизмом. Схема передвижения фононов в композиции, содержащей вышеописанный наполнитель, представлена на рис. 3.

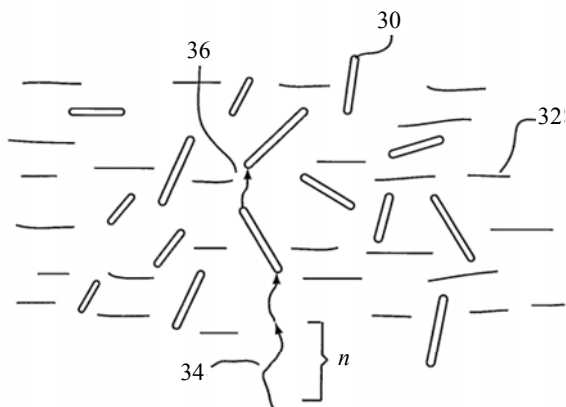


Рис. 3. Схема передвижения фононов в наполненной смоле  
Fig. 3. Scheme of the movement of phonons in filled resin

Длина свободного пробега фононов ( $n$ ) обычно составляет от 2 до 100 нм для полимеров, для эпоксидных смол – от 5 до 50 нм. Желательно, чтобы среднее расстояние между частицами (30) было меньше этих значений. Проходя через полимер (32), фононы в основном будут передвигаться через высокотеплопроводные частицы наполнителя, причем их длина должна быть больше, чем длина свободного пробега фононов, рассеяние которых в этом случае будет минимальным.

Однако авторами различных научных и научно-технических работ отмечается, что добавление частиц с большим размером в одном измерении вызывает значительное увеличение вязкости композиции. Поэтому такие добавки, как правило, используются совместно с наполнителями традиционной формы.

С целью выбора типа пропиточного состава следует опираться на технические требования к системам изоляции, технологии переработки пропиточных составов, типа комплектующих систем изоляции, условий эксплуатации электрических машин, а также на данные о технологических свойствах зарубежных и отечественных компаундов.

**Применение наноразмерных модификаторов.** Помимо добавок микронного размера композиции могут содержать наноразмерные наполнители. Авторы [25] отмечают слабое влияние небольших добавок наноразмерных наполнителей на вязкость модифицированной системы.

Материалы для тонкодисперсных модификаторов зачастую не отличаются от перечисленных

ранее материалов для наполнителей микронной размерности. Помимо перечисленных ранее электропроводящих наноразмерных модификаторов, могут использоваться диэлектрические добавки: кремнезем, оксиды металлов (Al, Ti, Zn), AlN-, BN-, POSS-добавки (минеральные наполнители на основе кремния), прочие силикаты, сульфаты, литопон (смесь BaSO<sub>4</sub> и ZnS).

Авторы [29] разработали высокотеплопроводную полимерную композицию на основе наноалмазов, причем помимо них система содержит два вида наполнителей микронной размерности: первый – с размером частиц от 15 до 50 мкм, второй – от 1 до 10 мкм. Стоит заметить, что, как правило, наноразмерные наполнители используются в композициях вместе с тонкодисперсными добавками, вносящими, как уже было отмечено, основной вклад в увеличение теплопроводности. Также наноразмерные наполнители способны при определенных обстоятельствах оказывать влияние на структуру полимера. Эта особенность отмечается в [30].

**Обработка поверхности наполнителей.** Авторы [28] отмечают, что рассеяние фононов в полимерных композициях происходит в основном при прохождении ими поверхности раздела фаз, возникшей при добавлении наполнителя в полимер. Кроме того, появление границы между поверхностью наполнителя и связующим приводит к другим нежелательным последствиям, например к уменьшению прочности материала. Решение данной проблемы связано с модификацией поверхности частиц наполнителя. Возможно использование веществ, увеличивающих ее смачиваемость. В качестве таковых в патенте [31] предлагается использовать органо-титанаты.

С другой стороны, эффективным способом улучшения интеграции наполнителя в полимерной матрице становится создание химических ковалентных связей между его поверхностью и молекулами связующего. Для этого поверхность наполнителя должна быть предварительно химически обработана с целью создания на ней функциональных групп, которые и будут вступать в химическое взаимодействие с полимером. Выбор функциональных групп зависит как от природы полимера, так и от состава самих частиц. Они могут быть алкильными, алкинильными, силильными, эпоксидными, арильными, гидридными, гидроксильными и другими. Подобное решение предлагается в различных патентах ([26], [28], [32] и др.).

Авторы [33] предлагают определенную последовательность обработки поверхности нитрида бора: удаление загрязнений на поверхности нитрида бора двухпроцентным раствором уксусной кислоты в деионизованной воде с последующей вакуумной фильтрацией суспензии. Проведение реакции поверхности BN с 1,4-фенилендиизоцианатом. В результате автору удалось добиться значительного понижения вязкости композиции по сравнению с системой, содержащей аналогичное количество нитрида бора с необработанной поверхностью. Для системы на основе бензоксазина, содержащей 30 % наполнителя, удалось снизить вязкость на 59 % (измерения проводились при 1000 °С). По мнению автора, этот результат позволяет увеличивать степень наполнения системы в случае, если существует ограничение на ее вязкость, благодаря чему можно добиться большей теплопроводности композиции.

В исследовании [34] рассмотрены особенности разработки композиций на основе эпоксидных смол для теплопроводящих электроизоляционных прокладок. Сделана оценка влияния состояния поверхности части минерального наполнителя на диэлектрические свойства композиций. Приведены параметры теплопроводящих электроизоляционных прокладок в исходном состоянии и после испытаний. Достигнутое максимальное значение коэффициента теплопроводности 9.2 Вт/(м · К) наблюдалось в тех вариантах композиций, степень наполнения и гранулометрический состав которых обеспечивал наиболее плотную упаковку частиц наполнителя. При этом связующее оказывалось распределенным в тонких слоях вокруг частиц наполнителя. Качество структуры полимера в этих слоях после отверждения в значительной степени определяет характеристики теплопроводящих электроизоляционных прокладок.

**Композиции на основе структурированных полимеров.** Главной причиной низкой теплопроводности полимеров служит разупорядоченность их структуры. Использование структурированных полимерных систем, по мнению авторов [35], должно позволить создавать высокотеплопроводные композиции. Обладающие повышенной структурной организацией полимеры, предложенные в данном патенте, авторы делят на следующие категории: жидкокристаллические полимеры; смеси с взаимопроницающими сетками; полимеры, содержащие ароматические циклы или гетероциклы; звездообразные полимеры; органо-неорганические гибридные материалы и дендримеры.

**2. Создание высокотеплопроводных полупроводящих материалов пазового уплотнения. Неармированные полупроводящие полимерные материалы, содержащие микроразмерные наполнители.** При создании высокотеплопроводных полупроводящих полимерных материалов для электротехнической промышленности в полимер, как правило, вводятся микроразмерные наполнители. Существует множество материалов, обладающих одновременно высокими тепло- и электропроводящими свойствами. К числу таких, как было отмечено ранее, относятся металлы. Многие металлы подвержены окислению. Оксидная пленка, образующаяся на поверхности частиц, незначительно влияет на теплопроводность композиции и губительно сказывается на ее электропроводящих свойствах. Данная проблема может быть решена применением порошков благородных металлов: серебро, золото, платина, палладий, родий, рутений. Тем не менее, использование таких наполнителей, очевидно, экономически нецелесообразно.

С другой стороны, полупроводящая полимерная композиция может быть создана при наполнении полимера порошками определенных полупроводящих материалов. Авторы [36] считают возможным использование порошкообразных карбида кремния и оксида цинка. Коэффициенты теплопроводности этих материалов составляют, соответственно, 54 и 63...155 Вт/(м · К). Исходная электропроводность оксида цинка недостаточно велика, и для ее повышения предлагается легировать данный материал алюминием. В таблице приведены значения объемного электрического сопротивления оксида цинка при различном содержании легирующей примеси.

Удельное объемное сопротивление  
оксида цинка при различном содержании  
легирующей примеси (алюминия)  
Specific volume resistance of zinc oxide  
at various dopant (aluminum) contents

Содержание алюминия в оксиде цинка, ppm*	Объемное электрическое сопротивление легированного оксида цинка, Ом · см
0	1321
50	10
200	около 0
500	6
2000	59
5000	131

\* Весовых частей на миллион весовых частей оксида цинка.

Авторы [36] отмечают, что электропроводность карбида кремния в исходном виде также недостаточно велика для создания материала с полупроводящими свойствами. Следует отметить, что даже в легированном виде его электропроводность сильно уменьшается с увеличением напряженности электрического поля. Кроме того, легирование оксида цинка – операция достаточно сложная, доступная только при наличии соответствующего дорогостоящего оборудования.

Из представленных данных видно, что подбор наполнителя, обеспечивающего повышение и тепло-, и электропроводности, представляется достаточно сложной задачей. В связи с этим зачастую для достижения требуемого уровня электрофизических свойств применяются более стабильные наполнители, которые не обеспечивают высокого уровня теплопроводности композиции. К числу таковых в первую очередь относятся углеродные порошки: технический углерод (сажа) и графит [36]. Часто в качестве электропроводящих наполнителей используются волокнистые наполнители, наиболее распространенное из них – рубленое углеродное волокно [37]. В зависимости от задач диаметр волокон может составлять от 5 до 100 мкм, длина – от 1 до 10 мм. Углеродные волокна служат достаточно эффективными наполнителями и могут применяться без прочих электропроводящих добавок. Поверхностное электрическое сопротивление композиций, наполненных исключительно углеродным волокном, может составлять  $10^2 \dots 10^3$  Ом.

В то же время, одной из проблем, стоявших перед авторами исследованных патентов, была нестабильность электрических свойств композиции, содержащих наполнители с собственной высокой электропроводностью. При агломерации большого числа частиц такого наполнителя в материале могут возникнуть области, обладающие проводимостью, превышающей заданную на 1–2 порядка [38]. Решение данной проблемы многие авторы видят в нанесении на поверхность частиц наполнителей пленок с пониженной проводимостью. Даже в случае контакта частиц в материале не возникает мостиков с излишней электропроводностью. Барьером для протекания тока в таком случае служит граница между поверхностью обработанной частицы и ее объемной частью.

Авторы [38] также предлагают наносить на поверхность частиц «защитную» пленку из оксидов олова и сурьмы. Соотношением количества этих оксидов на поверхности задается ее элек-

трическая проводимость. В качестве материала наполнителя в таком случае удобно использовать сплав олова и сурьмы, на который соответствующая пленка легко наносится путем окисления. Авторами были разработаны различные композиции в диапазоне электрического сопротивления  $1.2 \dots 90$  кОм · см со стабильными свойствами (разброс значений сопротивления в различных частях композиций не более 10–15 %).

Руководствуясь теми же соображениями, а именно необходимостью достижения стабильных свойств композиции, авторы применяют в качестве наполнителей порошки таких материалов, как  $\text{BaNiO}_3$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Такие материалы обладают сравнительно невысокой теплопроводностью, а их неравномерное распределение в полимерной матрице не приводит к образованию участков со слишком низким электрическим сопротивлением [35], [39].

**Влияние наполнителей на технологичность полимерных композиций.** Ранее было рассмотрено влияние теплопроводящих наполнителей на вязкость композиций. Интересный подход к созданию низковязкого тепло- и электропроводного материала был опробован авторами патента [40], которые использовали в качестве одного из наполнителей порошки легкоплавких металлических сплавов (соединения олова, висмута, цинка). При повышенной температуре введенный в полимер наполнитель переходит в текучее состояние, что снижает вязкость композиции и позволяет ей быть достаточно технологичной даже при большом количестве наполнителя. Применение соединений свинца не рекомендуется ввиду его токсичности.

Для уменьшения вязкости композиции зачастую применяется органический растворитель. Авторами патента [41] обнаружено, что от выбора растворителя может зависеть электрическое сопротивление отвержденной композиции. Например, применение этиленгликоля позволило получить материал, обладающий электрическим сопротивлением на два порядка меньше, чем при использовании некоторых полярных растворителей, также опробованных авторами. Возможно, этот эффект связан с агрегацией частиц наполнителя, происходящей более эффективно при использовании этиленгликоля в качестве растворителя.

Подытожив, следует отметить, что выбор применяемого растворителя – также важная задача при разработке полупроводникового композиционного материала.

**Использование наноразмерных наполнителей.** Зачастую полупроводниковые полимерные материалы, применяемые в электротехнической отрасли, содержат наноразмерные наполнители. Материалы для них могут совпадать с материалами для электропроводящих микронаполнителей. Например, авторы патента [42] вводили в полимер наночастицы благородных металлов. Наполнение полимера даже небольшим количеством тонкодисперсного наполнителя оказывает значительное влияние на электропроводность, ввиду чего нет необходимости во введении большого количества металлических частиц.

Также существуют патенты, авторы которых использовали для повышения электропроводности углеродные наночастицы – фуллерены и нанотрубки. В полимерный материал могут вводиться как немодифицированные молекулы фуллеренов ( $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{84}$ ), так и молекулы, часть атомов углерода которых связана с функциональными группами, например, (3-метоксикарбонил)-пропил-1-фенил ( $C_{60}$ -PCMВ) (рис. 4).

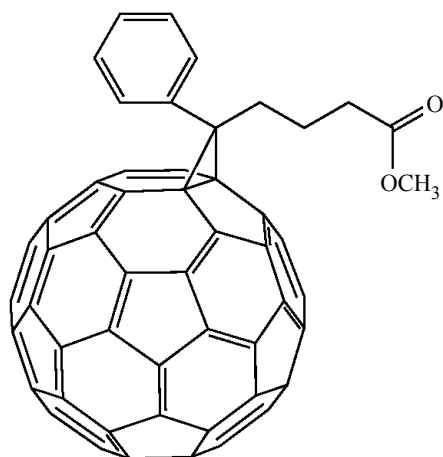


Рис. 4.  $C_{60}$ -PCMВ – фуллерен  $C_{60}$ , атомы углерода которого связаны с функциональными группами (3-метоксикарбонил)-пропил-1-фенила  
Fig. 4.  $C_{60}$ -PCMВ – fullerene  $C_{60}$ , the carbon atoms of which are linked to the functional groups of (3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl

Наличие таких функциональных групп способствует лучшей совместимости наполнителя и полимерной матрицы и меньшей агрегации введенных частиц [43]. В отличие от наноразмерных наполнителей, применяемых для увеличения теплопроводности полимерного материала, наночастицы металлов, а также фуллерены и нанотрубки увеличивают электропроводность системы не за счет модификации полимера и влияния на его структуру (хотя эти эффекты также, вероятно,

в наличии), а благодаря собственным электропроводящим свойствам.

**Полупроводящие армированные полимерные материалы. Материалы армирующих тканей.** Прочные полупроводящие материалы для использования в пазах мощных электрических машин изготавливают, пропитывая ткани из прочных волокон. Полученные ленты не только обладают высокими механическими характеристиками, присущими армированным материалам, но также достаточно удобны для применения в технологии изготовления статоров турбогенераторов.

Ткани, предназначенные для пропитки, могут изготавливаться из стеклянных, арамидных, полиэфирных волокон [38]. Наиболее часто для данных целей применяются стеклоткани [44]. К методам повышения электропроводности армированного материала относится покрытие волокон электропроводящими пленками. Например, авторы патента [45] пропускали стеклянные волокна через растворитель, содержащий металлоорганические соединения или неорганические соединения переходных металлов, после чего прокаливали его при температуре 600 °С. Пропитанная ткань на основе волокон с металлической пленкой на поверхности обладала повышенной электропроводностью. Уровень электрического сопротивления подобной ленты может быть установлен соотношением проводящих и непроводящих волокон и толщиной металлической пленки на поверхности последних.

Также известен метод создания полупроводящей ленты на основе ткани из медьсеребросодержащих стеклянных волокон. Ввиду дороговизны подобных волокон авторы патента [46] предлагают использовать ткани, в которых они комбинированы с обычным стекловолокном. Количество стандартных стеклянных волокон в такой ткани составляет 30–50 % от общего числа волокон. Поверхностное электрическое сопротивление ленты на основе такого материала может составлять  $10^4$  Ом.

Несмотря на наличие описанных тканых электропроводящих материалов, авторы большинства патентов используют в качестве армирующего слоя стекловолкнистые ткани, не содержащие специальных покрытий или электропроводящих добавок. Достижение требуемого уровня электро- и теплофизических свойств, как правило, осуществляется посредством подбора подходящего пропитывающего полимерного материала.

В [47] изучено влияние содержания пластифицирующих добавок в пропитывающем лаке и стеклоткани с формирующими плоскими стеклянными стрендами на диэлектрические потери, длительную электрическую прочность, ресурсные характеристики изоляции из новых типов слюдосодержащих изоляционных лент. Максимальный уровень диэлектрических потерь в диапазоне температур 20...155 °С наблюдается для изоляции из лент с повышенным содержанием пластифицирующих добавок. В высокотемпературной области такая изоляция характеризуется максимальным значением энергии активации диэлектрических потерь.

В исследовании [48] изучено влияние свойств карбида кремния на электрические характеристики полупроводящих лент, изготавливаемых пропиткой подложки эпоксидным составом горячего отверждения, содержащим SiC.

В [49] обсуждается повышение использования высоковольтной изоляции, основанное на улучшении характеристик слюдяной бумаги, значительно увеличивающее электрическую прочность конструкции изоляции.

В [50] также отмечается возможность положительного влияния на электрическую прочность эпоксидного компаунда, в состав которого введены микро- и наночастицы.

**Особенности создания пропиточных составов для армированных полупроводящих материалов.** Полупроводящие полимерные составы для пропитки армирующих тканей, применяемых в электротехнической промышленности, как правило, содержат углеродные электропроводящие добавки – технический углерод или графит. Зачастую применяются порошки полупроводящих материалов: Si, SiC и др. [51], [52]. К особенностям наполнителей, применяемых в подобных материалах, относится их высокая дисперсность – размер частиц в большинстве приведенных патентов не превышает 30 мкм и составляет, как правило, 7...15 мкм. Наличие в полимере частиц большего размера может осложнить процесс пропитки ленты.

В качестве связующего в подобных материалах могут использоваться эпоксидные, полиэфирные, полиимидные, силиконовые смолы [38]. Важным требованием к полимеру служат его эластичность в отвержденном состоянии, так как материал, находящийся в пазе турбогенератора, должен обладать стойкостью к колебаниям, возникающим между пазом и вложенным в него бруском.

В отличие от материалов, применяемых в виде паст, пропитывающие составы могут содержать большое количество растворителей, как правило ароматических, либо кетонов.

**3. Создание высокотеплопроводных стеклослюдопластовых электроизоляционных лент.** Анализ технических решений, относящихся к высокотеплопроводным электроизоляционным слюдосодержащим лентам, показал, что основным методом увеличения их теплопроводности служат введение в полимер наполнителей различной природы. Наполненный полимер пропитывает электроизоляционную высоковольтную ленту с целью снижения ее термического сопротивления. Описанные в различных патентах идеи, касающиеся модификации связующего для ленты, в основном совпадают с принципами увеличения теплопроводности обычных полимеров, описанных в подразд. 1.

Наполнители могут вводиться не только в пропитывающий полимер. Например, способность заполнять различные дефекты структуры стеклоткани и слюды с применением наноразмерных наполнителей отмечается многими авторами как важная особенность применения наночастиц. Проблемы возникновения дефектов в структуре стеклянных волокон рассматриваются в патенте [55]. Их появление может быть связано с повреждениями, наносимыми нитям ткани частицами наполнителя при обмотке и прессовании ленты. Вследствие этих повреждений стеклоткань хуже выполняет укрепляющие функции. Для решения этой проблемы автор предлагает предварительно покрывать нити ткани жидкотекучей смолой таким образом, чтобы она создавала защитный слой, не заполняя ячейки ткани.

Однако введение наполнителей в пропитывающий полимер – не единственный способ повышения теплопроводности изоляции. Другой метод достижения высоких диэлектрических и теплопроводящих свойств ленты – уменьшение содержания в ней смолы. Авторы патента [56] добиваются этого за счет использования стеклоткани, в которой соотношение продольных и поперечных волокон равно или больше 2.5 : 1. Такая ткань имеет меньшие, чем в обычной ткани, ячейки, которые заполняются смолой, но в то же время достаточно прочна для изготовления и дальнейшей обработки ленты. Содержание стекла по отношению к смоле после пропитки такой стеклоткани на 25 % выше, чем для обычной стеклоткани.



Другое направление снижения термического сопротивления изоляционной ленты заключается в уменьшении ее толщины при сохранении необходимых диэлектрических показателей. В патенте [57] предлагается использовать нити из нескрученных стекловолокон. Таким образом можно получить более тонкую ткань с гладкой поверхностью, по прочности не уступающую более толстой ткани с нитями из скрученных волокон.

Основные тенденции развития слюдосодержащих лент, направленные на повышение эквивалентной теплопроводности с сохранением баланса электроизоляционных и механических свойств композитных лент детально рассмотрены и приведены в [58].

#### **Обсуждение результатов. Выводы и заключение.**

1.1. В качестве метода создания полимерных материалов с высокой теплопроводностью наиболее эффективно введение в полимер высокотеплопроводных микронаполнителей. Свойства композиционного материала зависят не только от количества наполнителя, но и от размера и формы частиц.

1.2. В первую очередь, рассеяние тепла в наполненных системах происходит на границе раздела фаз. Эту проблему можно эффективно решать предварительной модификацией поверхности частиц наполнителя для создания ковалентных связей между ней и связующим.

1.3. Помимо наполнителей микронного размера для увеличения теплопроводности полимера в него могут вводиться наномодификаторы. Их влияние на теплофизические свойства композиции объясняется, в первую очередь, изменением структуры полимера, происходящим под действием частиц с колоссальной поверхностной энергией.

2.1. Для создания полупроводящих материалов системы пазового уплотнения в полимер могут вводиться наполнители, обладающие тепло- и электропроводящими свойствами. Применение большинства таких материалов сопряжено с определенными проблемами. К числу таковых можно отнести подверженность окислению многих доступных металлов и высокую стоимость металлов, которые принято относить к благородным. В связи с этим в материалах пазового уплот-

нения могут применяться разные наполнители для увеличения тепло- и электропроводности.

2.2. Наибольшее распространение для придания полимеру полупроводящих свойств получили углеродные добавки – технический углерод (сажа) и графит. Также часто используются волокнистые наполнители, например углеродные волокна, и наноразмерные модификаторы – фуллерены, углеродные нанотрубки и т. п.

2.3. Большинству армированных материалов, которые могут применяться в системах пазового уплотнения, электропроводящие свойства приданы благодаря пропиточным составам, которые в основном содержат перечисленные ранее электропроводящие добавки. Особенность таких составов состоит в использовании эластичных полимеров, в наличии большого количества растворителей и высокая дисперсность наполнителей.

2.4. Армирующие ткани также могут обладать электропроводящими свойствами, которые достигаются либо благодаря нанесению на волокна электропроводящих покрытий, либо посредством включения в состав волокон элементов металлов (например, достаточно высокой электропроводностью обладают медьсеребросодержащие стеклянные волокна).

3.1. Основной метод увеличения теплопроводности слюдосодержащих лент заключается в модификации пропиточных компаундов и технологии его изготовления, введения и сушки.

3.2. Характерной особенностью пропитывающих составов для стеклослюдопластовых лент служит высокая дисперсность применяемых в них наполнителей, обусловленная размером пор в структуре слюдяной бумаги.

3.3. Помимо оптимизации состава пропитывающих композиций для стеклослюдопластовых лент существуют следующие методы увеличения их теплопроводности:

- уменьшение количества пропитки в ленте за счет использования нитей из нескрученных волокон и управления соотношением продольных и поперечных нитей в стеклоткани и уменьшением размеров ячеек, заполняемых связующим;
- введение наполнителей в слюдяную бумагу;
- использование бумаги из стеклянных хлопьев вместо традиционной слюдяной бумаги.

#### **Список литературы**

1. Разработка основ решения связанных задач теплофизики и электротехники для создания новых систем электрической изоляции вращающихся электрических машин / А. М. Костельов, А. Г. Филин,

Р. Э. Шевчук, С. А. Ионин, Э. Р. Маннанов // Тез. докл. XV Всеросс. конф. по новым технологиям. Миасс. 2018. Т. 3, секция 3. С. 26–31.

2. Stone G. C. Impact of slot discharge and vibration sparking on stator winding life in large generators // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2008. Vol. 24, no. 5. P. 14–20.
3. 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 Elect. and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW)*. Saint Petersburg, Russia: IEEE, 2021. P. 1228–1231.
4. Xia Y. Principles and characteristics of vibration sparking in high voltage stator slots // *IEEE Trans. Dielect. and Elect. Insulation*. 2013. Vol. 20, no. 1. P. 42–53.
5. Fault localization and analysis for a damaged hydrogenerator and a proposal to improve the standard for generator commissioning tests / A. Akbari, M. Rahimi, P. Werle, H. Borsi // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2021. Vol. 36, no. 3. P. 19–26.
6. Hirakawa T., Kumada A., Hidaka K. Surface potential measurement of model stator bar with stress grading system by field sensor // *IEEE Transactions on Dielect. and Elect. Insulation*. 2019. Vol. 26, no. 4. P. 1146–1157.
7. Iwabuchi H., Oyama T. Breakdown phenomena across micrometer scale surface gap under negative voltage application // *IEEE Transactions on Dielect. and Elect. Insulation*. 2019. Vol. 26, no. 5. P. 1377–1387.
8. 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 // *Проблемы региональной энергетики*. 2020. № 2 (46). С. 33–42.
9. Study of characteristics of vibration sparking in hv rotating machine insulation / V. Belko, A. Plotnikov, Y. Petrenya, T. Shikova // *16<sup>th</sup> Conf. on Elect. Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. Varna, Bulgaria, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ELMA.2019.8771490.
10. 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 Elect. and Electronic Engin. (ElConRus)*. Saint Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2019. P. 800–802. doi: 10.1109/ElConRus.2019.8657272.
11. Modelling of electrical discharge processes for optimization of corona protection system of high voltage rotating machines insulation / A. M. Andreev, I. A. Andreev, V. O. Belko, A. S. Reznik, A. N. Smirnov, A. A. Stepanov // *Problemele Energeticii Regionale*. 2020. 2 (46). P. 33–42.
12. Montanari G. C., Seri P. A Partial discharge-based health index for rotating machine condition evaluation // *IEEE Elect. Insulation Magazine*. 2018. Vol. 34, no. 2. P. 17–23.
13. Causes of resistance decrease of corona protection materials in thermal aging process / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. S. Reznik A. M. Kostelov, E. R. Mannanov // *Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus)*. 2023. P. 850–853.
14. Electromagnetic forces on coils and bars inside the slot of hydro-generator / B. Sanosian, P. Wendling, T. Pham, W. Akaishi // *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2019. P. 1754–1760. doi: 10.1109/ECCE.2019.8913254.
15. Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E. R. Mannanov, A. G. Filin, V. O. Belko // *Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW)*. St. Petersburg, Moscow, Russia: IEEE, 2021. P. 1193–1196. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396705.
16. Маннанов Э. Р., Филин А. Г. Тепловое состояние электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // *Глобальная энергия*. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49. doi: 10.18721/JEST.27203.
17. 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, Yu. K. Petrenya // *Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus)*. Saint Petersburg, Russia: IEEE, 2022. P. 1017–1021. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755593.
18. 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 Elect. and Electronic Engin. (ElConRus)*. St. Petersburg, Moscow, Russia: IEEE, 2020. P. 1031–1035. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039025.
19. Cimino A., Jenau F., Staubach C. Finite-element model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines // *54<sup>th</sup> Intern. Universities Power Engin. Conf. (UPEC)*. Bucharest, Romania: IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/UPEC.2019.8893473.
20. Bezborodov A., Shikova T. Technological factors of insulation systems for large rotating machines: Influence on thermal and electrical properties // *Intern. Conf. on Diagnostics in Elect. Engin. (Diagnostics)*. Pilsen, Czech Rep.: IEEE, 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/Diagnostics49114.2020.9214657.
21. Shikova T. Adhesive strength in a high voltage mica insulation system // *E3S Web of Conf. Saint Petersburg, Russia: EDP Sci.*, 2019. Vol. 140. P. 11006. doi: 10.1051/e3sconf/201914011006.
22. Investigation of mechanical characteristics of pressuring materials of generators stator winding in thermal aging process / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. M. Kostelov, E. R. Mannanov, D. A. Chernyshov // *Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus)*. 2023. P. 846–849.
23. Effective heat conductivity of polymeric composite materials: The influence of component properties / V. S. Stepanov, Yu. K. Petrenya, A. M. Andreev, A. M. Kostelov, E. R. Mannanov // *J. Phys. and Math. St. Petersburg Polytechnical State University*. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 80–89. doi: 10.18721/JPM.11408.
24. Pat. US2010022423A1. Nanodiamond thermal grease / Lu Hung-Tu, S. Uvarov. Заявл. 16.10.2008; опубл. 28.01.2010.

25. Pat. US2005045855. Thermal conductive material utilizing electrically conductive nanoparticles / S. Sh. Tonapi, H. Zhong, D. L. Simone, R. A. Fillion. Momentive Performance Materials, INC. Заявл. 09.03.2003; опубл. 03.03.2005.
26. Pat. US2005161210. Organic matrices containing nanomaterials to enhance bulk thermal conductivity / H. Zhong, S. Rubinsztajn. Заявл. 03.04.2003; опубл. 28.07.2005.
27. Pat. US5681883A. Enhanced boron nitride composition and polymer based high thermal conductivity molding compound / R. F. Hill, S. P. DaVanzo. Заявл. 05.03.1996; опубл. 28.10.1997.
28. Pat. US2005277349A1. High thermal conductivity materials incorporated into resins / J. Smith, G. Stevens, J. Wood. Siemens Westinghouse Power Corp. Заявл. 14.06.2005; опубл. 15.12.2005.
29. Современные компаунды для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов / С. А. Яценко, Е. М. Евтушенко, В. В. Иванов, К. С. Сидоренко // Тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электрическая изоляция – 2006». СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. 2006. С. 209–218.
30. Pat. EP1766637A1. Structured resin systems with high thermal conductivity fillers / J. D. Smith, G. Stephens, J. W. Wood. Siemens Generation Power Corp. Заявл. 15.06.2005; опубл. 28.03.2007.
31. Pat. US2004026670. Compliant and crosslinkable thermal interface materials / MY N. Nguyen; J. Grundy. Honeywell International Inc. Заявл. 27.05.2003; опубл. 12.02.2004.
32. Pat. US6160042A. Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity polymer based boron nitride composition and method / H. Ishida. Edison Polymer Innov. Corp. Заявл. 01.10.1998; опубл. 12.12.2000.
33. Pat. CA2292369 A1. Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity polymer based boron nitride composition and method / H. Ishida. Edison Polymer Innovation Corporation. Опубл. 12.12.2000. 2005-06-14.
34. Березинец Н. И., Родова Л. В., Украинский Ю. М. Теплопроводящие прокладки для гальванической развязки силовых полупроводниковых приборов и систем охлаждения // Электротехника. 2001. № 6. С. 59–60.
35. Pat. WO2005124790A3. High thermal conductivity materials aligned within resins / J. Smith, G. Stephens, J. W. Wood. Заявл. 15.06.2005; опубл. 15.12.2005.
36. Pat. US5925467A. Electrically and thermally conductive plastic and use of this plastic / R. Strimpler, F. Konig. ABB Research Ltd. Заявл. 28.05.1996; опубл. 20.07.1999.
37. Pat. US6645886B1. Glow protection band / V. Muhrer, W. Rogler, K. Schaefer. Заявл. 28.08.1998; опубл. 11.11.2003.
38. Pat. US5643502. High strength conductive polymers containing carbon fibrils / P. R. Nahass, S. O. Friend, R. W. Hausslein. Hyperion Catalysis International. Заявл. 01.07.1997; опубл. 01.07.1997. 13 с.
39. Pat. US2005209385. Electrically conductive composite / K. Higashi, T. Fujimoto, Y. Ikezawa. FITCH, EVEN, TABIN & FLANNERY. Заявл. 18.03.2005; опубл. 22.09.2005. 8 с.
40. Pat. US2007173151A1. Semiconducting winding strip and use thereof / H. Kapitza, V. Muhrer, N. Muller. Siemens AG. Заявл. 27.06.2006; опубл. 26.07.2007. 8 с.
41. Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites / M. Choudhury, S. Mohanty, K. Nayak, R. Aphale // J. of Minerals and Materials. Characterization and Engin. 2012. Vol. 11, no. 7. P. 744–756.
42. Pat. US20070158617A1. Metal/plastic hybrid and shaped body produced therefrom / R. Greiner, H. Kapitza, M. Ochsenkuhn. Siemens AG. Заявл. 09.12.2004; опубл. 12.07.2007. 3 с.
43. Pat. US20060081816A1. Material for the production of a conductive organic functional layer and use thereof / C. Brabec, K. Heuser, H. Rost. Заявл. 12.06.2003; опубл. 20.04.2006. 3 с.
44. Pat. № US20120091401A1. Metal nanoparticle dispersion / Y. Hotta. Toshiba TEC Kabushiki Kaisha. Заявл. 07.03.2011; опубл. 19.04.2012. 3 с.
45. Pat. US20090114884A1. Aqueous dispersions of electrically conducting polymers containing high boiling solvent and additives / C.-H. Hsu. Заявл. 15.05.2008; опубл. 07.05.2009. 14 с.
46. Pat. US2008213560A1. Electrically conductive glass yarn and constructions including same / P. Moireau, C. Ceugniet. Заявл. 11.02.2005; опубл. 04.09.2008.
47. Pat. US2007149073. Electric machine with a corona shield / B. Klaussner, Chr. Meyer, V. Muhrer, A. Maurer, Ch. Russel, K. Schafer. Заявл. 07.03.2007; опубл. 28.06.2007.
48. Pat. SU1654879A1. Semiconducting tape / L. Kulakov, V. Khazanov, V. Zueva, A. Chernov, R. Raikov, V. Ivantsova. Заявл. 06.01.1989; опубл. 06.07.1991.
49. Азизов А. Ш., Андреев А. М., Костельов А. М. Исследование новых типов слюдосодержащих лент для изоляции высоковольтных электрических машин / Тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электрическая изоляция – 2006». СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2006. С. 203.
50. Кокцинская Е. М., Ваксер Б. Д. Влияние наполнителя на свойства противокоронных ленточных покрытий для электрических машин высокого напряжения / Тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электрическая изоляция – 2006». СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2006. С. 226–228.
51. Куимов И. Е., Папков А. В., Пак В. М. Перспективы создания и внедрения новых электроизоляционных материалов / Тр. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электрическая изоляция – 2002». СПб.: Нестор, 2002. С. 33–39.
52. Characterization of tree growth in filled epoxy 428 resin: the effect of filler and moisture contents / R. Kurnianto, Y. Murakami, N. Hozumi, M. Nagao // IEEE Transactions on Dielect. and Elect. Insulation. IEEE, 2007. Vol. 14, no. 2. P. 427–435.

53. Pat. RU2150760C1. Полупроводящая лента / В. А. Маслов, А. А. Рахманов, Э. И. Хофбауэр, Н. В. Крупенин, А. И. Лебедев, Н. С. Окнин. Заявл. 10.11.1998; опубл. 10.06.2000.

54. Pat. US5319276A. Corona-shielding arrangement for the stator winding of an electric machine / R. Schuler. Asea Brown Boveri Ltd. Заявл. 27.04.1993; опубл. 07.06.1994.

55. Pat. RU2120145C1. Изоляционная лента и способ ее изготовления / Р. Шулер А. Браун. Бовери АГ. Заявл. 27.12.1993; опубл. 10.10.1998.

56. Pat. RU2189099C2. Изоляция обмотки статора / Т. Бауман, Й. Эстерхельд, Р. Шулер. ABB Research Ltd. Заявл. 15.05.1998; опубл. 10.09.2002.

57. Pat. RU2608543C2. Материал изоляционной ленты, способ его изготовления и применение / Ф. Эдер, П. Греппель, М. Прайбиш, К. Рор. Siemens AG. Заявл. 04.04.2013; опубл. 19.01.2017.

58. Маннанов Э. Р. О диэлектрических материалах с высокой теплопроводностью для систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин: обзор отечественной и зарубежной литературы // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 42–67. doi: 10.18721/JEST.27404.

### Информация об авторах

**Маннанов Эмиль Рамилевич** – Инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

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

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

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

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

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

**Таджибаев Алексей Ибрагимович** – д-р техн. наук, доцент. Петербургский энергетический институт повышения квалификации (ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»), Авиационная ул., д. 23, Санкт-Петербург, 196135, Россия. Почетный президент ПЭИПК.

E-mail: [a\\_tadzhibaev@inbox.ru](mailto:a_tadzhibaev@inbox.ru)

**Андреев Александр Михайлович** – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, 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](mailto:andreev_am@power-m.ru)

### References

1. Razrabotka osnov reshenija svjazannyh zadach teplofi-ziki i jelektrotehniki dlja sozdaniya novyh sistem jelektri-cheskoj izoljacji vrashhajushhihsja jelektricheskikh mashin / A. M. Kostel'ov, A. G. Filin, R. Je. Shevchuk, S. A. Ionin, Je. R. Mannanov // Tez. dokl. XV Vseros. konf. po novym tehnologijam. Miass. 2018. Т. 3, секция 3. S. 26–31. (In Russ.).

2. Stone G. C. Impact of slot discharge and vibration sparking on stator winding life in large generators // IEEE Electr. Insul. Mag. 2008. Vol. 24, no. 5. P. 14–20.

3. 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 Elect. and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW). Saint Petersburg, Russia: IEEE, 2021. P. 1228–1231.

4. Xia Y. Principles and characteristics of vibration sparking in high voltage stator slots // IEEE Trans. Dielect. and Elect. Insulation. 2013. Vol. 20, no. 1. P. 42–53.

5. Fault localization and analysis for a damaged hydro-generator and a proposal to improve the standard

for generator commissioning tests / A. Akbari, M. Rahimi, P. Werle, H. Borsi // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2021. Vol. 36, no. 3. P. 19–26.

6. Hirakawa T., Kumada A., Hidaka K. Surface potential measurement of model stator bar with stress grading system by field sensor // IEEE Transactions on Dielect. and Elect. Insulation. 2019. Vol. 26, no. 4. P. 1146–1157.

7. Iwabuchi H., Oyama T. Breakdown phenomena across micrometer scale surface gap under negative voltage application // IEEE Transactions on Dielect. and Elect. Insulation. 2019. Vol. 26, no. 5. P. 1377–1387.

8. Modelirovanie jelektrorazrjadnyh processov dlja optimizacii koronozashhitnoj sistemy izoljacji vysokovol'tnyh mashin / A. M. Andreev, I. A. Andreev, V. O. Bel'ko, A. S. Reznik, A. N. Smirnov, A. A. Stepanov // Problemy regional'noj jenergetiki. 2020. № 2 (46). S. 33–42. (In Russ.).

9. Study of Characteristics of vibration sparking in HV rotating machine insulation / V. Belko, A. Plotnikov, Y. Petrenya, T. Shikova // 16<sup>th</sup> Conf. on Elect. Machines, Drives and Power Systems (ELMA). Varna, Bulgaria, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ELMA.2019.8771490.

10. 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 Elect. and Electronic Engin. (ElConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2019. P. 800–802. doi: 10.1109/ElConRus.2019.8657272.
11. Modelling of electrical discharge processes for optimization of corona protection system of high voltage rotating machines insulation / A. M. Andreev, I. A. Andreev, V. O. Belko, A. S. Reznik, A. N. Smirnov, A. A. Stepanov // Problemele Energeticii Regionale. 2020. 2 (46). P. 33–42.
12. Montanari G. C., Seri P. A Partial discharge-based health index for rotating machine condition evaluation // IEEE Elect. Insulation Magazine. 2018. Vol. 34, no. 2. P. 17–23.
13. Causes of resistance decrease of corona protection materials in thermal aging process / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. S. Reznik, A. M. Kosteliov, E. R. Mannanov // Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus). 2023. P. 850–853.
14. Electromagnetic forces on coils and bars inside the slot of hydro-generator / B. Sanosian, P. Wendling, T. Pham, W. Akaishi // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2019. P. 1754–1760. doi: 10.1109/ECCE.2019.8913254.
15. Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E. R. Mannanov, A. G. Filin, V. O. Belko // Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW). St. Petersburg, Moscow, Russia: IEEE, 2021. P. 1193–1196. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396705.
16. Mannanov Je. R., Filin A. G. Teplovoe sostojanie jelektricheskoj izoljaccii statornyh obmotok turbogeneratorov s vozdušnym ohlazhdeniem // Global'naja jenergjija. 2021. T. 27, № 2. S. 38–49. doi: 10.18721/JEST.27203. (In Russ.).
17. 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, Yu. K. Petrenya // Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus). Saint Petersburg, Russia: IEEE, 2022. P. 1017–1021. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755593.
18. 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 Elect. and Electronic Engin. (ElConRus). St. Petersburg, Moscow, Russia: IEEE, 2020. P. 1031–1035. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039025.
19. Cimino A., Jenau F., Staubach C. Finite-element-model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines // 54<sup>th</sup> Intern. Universities Power Engin. Conf. (UPEC). Bucharest, Romania: IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/UPEC.2019.8893473.93473.
20. Bezborodov A., Shikova T. Technological factors of insulation systems for large rotating machines: Influence on thermal and electrical properties // Intern. Conf. on Diagnostics in Elect. Engin. (Diagnostics). Pilsen, Czech Rep.: IEEE, 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/Diagnostics.49114.2020.9214657.
21. Shikova T. Adhesive strength in a high voltage mica insulation system // E3S Web of Conf. Saint Petersburg, Russia: EDP Sci., 2019. Vol. 140. P. 11006. doi: 10.1051/e3sconf/201914011006.
22. Investigation of mechanical characteristics of pressuring materials of generators stator winding in thermal aging process / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. M. Kosteliov, E. R. Mannanov, D. A. Chernyshov // Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus). 2023. P. 846–849.
23. Effective heat conductivity of polymeric composite materials: The influence of component properties / V. S. Stepanov, Yu. K. Petrenya, A. M. Andreev, A. M. Kosteliov, E. R. Mannanov // J. Phys. and Math. St. Petersburg Polytechnical State University. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 80–89. doi: 10.18721/JPM.11408.
24. Pat. US 2010022423A1. Nanodiamond thermal grease / Lu Hung-Tu, S. Uvarov. Zajavl. 16.10.2008; opubl. 28.01.2010.
25. Pat. US2005045855. Thermal conductive material utilizing electrically conductive nanoparticles / S. Sh. Tonapi, H. Zhong, D. L. Simone, R. A. Fillion. Momentive Performance Materials, INC. Zajavl. 09.03.2003; opubl. 03.03.2005.
26. Pat. US2005161210. Organic matrices containing nanomaterials to enhance bulk thermal conductivity / H. Zhong, S. Rubinsztajn. Zajavl. 03.04.2003; opubl. 28.07.2005.
27. Pat. US5681883A. Enhanced boron nitride composition and polymer based high thermal conductivity molding compound / R. F. Hill, S. P. DaVanzo. Zajavl. 05.03.1996; opubl. 28.10.1997.
28. Pat. US2005277349A1. High thermal conductivity materials incorporated into resins / J. Smith, G. Stevens, J. Wood. Siemens Westinghouse Power Corp. Zajavl. 14.06.2005; opubl. 15.12.2005.
29. Sovremennye kompaundy dlja propitki obmotok jelektricheskij mashin i apparatov / S. A. Jashhenko, E. M. Evtushenko, V. V. Ivanov, K. S. Sidorenko // Tr. 4-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Jelektricheskaja izoljacija – 2006». SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta. 2006. S. 209–218.
30. Pat. EP1766637A1. Structured resin systems with high thermal conductivity fillers / J. D. Smith, G. Stephens, J. W. Wood. Siemens Generation Power Corp. Zajavl. 15.06.2005; opubl. 28.03.2007.
31. Pat. US2004026670. Compliant and crosslinkable thermal interface materials / MY N. Nguyen; J. Grundy. Honeywell International Inc. Zajavl. 27.05.2003; opubl. 12.02.2004.
32. Pat. US6160042A. Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity polymer based boron nitride composition and method / H. Ishida. Edison Polymer Innov. Corp. Zajavl. 01.10.1998; opubl. 12.12.2000.
33. Pat. CA2292369 A1. Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity

ty polymer based boron nitride composition and method / H. Ishida. Edison Polymer Innovation Corporation. Opubl. 12.12.2000. 2005-06-14.

34. Berezinec N. I., Rodova L. V., Ukrainskij Ju. M. Teploprovodjashhie prokladki dlja gal'vanicheskoj razvjazki silovyh poluprovodnikovyh priborov i sistem ohlazhdenija // Jelektrotehnika. 2001. № 6. S. 59–60.

35. Pat. WO2005124790A3. High thermal conductivity materials aligned within resins / J. Smith, G. Stephens, J. W. Wood. Zajavl. 15.06.2005; opubl. 15.12.2005.

36. Pat. № US5925467A. Electrically and thermally conductive plastic and use of this plastic / R. Strimpler, F. Konig. ABB Research Ltd. Zajavl. 28.05.1996; opubl. 20.07.1999.

37. Pat. № US6645886B1. Glow protection band / V. Muhrer, W. Rogler, K. Schaefer. Zajavl. 28.08.1998; opubl. 11.11.2003.

38. Pat. № US5643502. High strength conductive polymers containing carbon fibrils / P. R. Nahass, S. O. Friend, R. W. Hausslein. Hyperion Catalysis International. Zajavl. 01.07.1997; opubl. 01.07.1997. 13 s.

39. Pat. US2005209385. Electrically conductive composite / K. Higashi, T. Fujimoto, Y. Ikezawa. FITCH, EVEN, TABIN & FLANNERY. Zajavl. 18.03.2005; opubl. 22.09.2005. 8 s.

40. Pat. US2007173151A1. Semiconducting winding strip and use thereof / H. Kapitza, V. Muhrer, N. Muller. Siemens AG. Zajavl. 27.06.2006; opubl. 26.07.2007. 8 s.

41. Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites / M. Choudhury, S. Mohanty, K. Nayak, R. Aphale // J. of Minerals and Materials. Characterization and Engin. 2012. Vol. 11, no. 7. P. 744–756.

42. Pat. US20070158617A1. Metal/plastic hybrid and shaped body produced therefrom / R. Greiner, H. Kapitza, M. Ochsenkuhn. Siemens AG. Zajavl. 09.12.2004; opubl. 12.07.2007. 3 s.

43. Pat. US20060081816A1. Material for the production of a conductive organic functional layer and use thereof / C. Brabec, K. Heuser, H. Rost. Zajavl. 12.06.2003; opubl. 20.04.2006. 3 s.

44. Pat. № US20120091401A1. Metal nanoparticle dispersion / Y. Hotta. Toshiba TEC Kabushiki Kaisha. Zajavl. 07.03.2011; opubl. 19.04.2012. 3 s.

45. Pat. US20090114884A1. Aqueous dispersions of electrically conducting polymers containing hghboling solvent and additives / C.-H. Hsu. Zajavl. 15.05.2008; opubl. 07.05.2009. 14 s.

46. Pat. US2008213560A1. Electrically conductive glass yarn and constructions including same / P. Moireau, C. Ceugniet. Zajavl. 11.02.2005; opubl. 04.09.2008.

47. Pat. US2007149073. Electric machine with a corona shield / B. Klausner, Chr. Meyer, V. Muhrer,

A. Maurer, Ch. Russel, K. Schafer. Zajavl. 07.03.2007; opubl. 28.06.2007.

48. Pat. SU1654879A1. Semiconducting tape / L. Kulakov, V. Khazanov, V. Zueva, A. Chernov, R. Raikov, V. Ivantsova. Zajavl. 06.01.1989; opubl. 06.07.1991.

49. Azizov A. Sh., Andreev A. M., Kostel'ov A. M. Issledovanie novyh tipov sljudosoderzhashhih lent dlja izoljacji vysokovol'tnyh jelektricheskikh mashin / Tr. 4-j Mezhd. nauch.-tehn. konf. «Jelektricheskaja izoljacija – 2006». SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta, 2006. S. 203. (In Russ.).

50. Kokcinskaja E. M., Vakser B. D. Vlijanie napolnitelja na svojstva protivokoronnyh lentochnyh pokrytij dlja jelektricheskikh mashin vysokogo napjazhenija / Tr. 4-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Jelektricheskaja izoljacija – 2006». SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta, 2006. S. 226–228. (In Russ.).

51. Kuimov I. E., Papkov A. V., Pak V. M. Perspektivy sozdaniija i vnedrenija novyh jelektrioizoljacionnyh materialov / Tr. 3-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Jelektricheskaja izoljacija – 2002». SPb.: Nestor, 2002. S. 33–39. (In Russ.).

52. Characterization of tree growth in filled epoxy 428 resin: The effect of filler and moisture contents / R. Kurnianto, Y. Murakami, N. Hozumi, M. Nagao // IEEE Transactions on Dielect. and Elect. Insulation. IEEE, 2007. Vol. 14, no. 2. P. 427–435.

53. Pat. RU2150760S1. Poluprovodjashhaja lenta / V. A. Maslov, A. A. Rahmanov, Je. I. Hofbauer, N. V. Krupenin, A. I. Lebedev, N. S. Oknin. Zajavl. 10.11.1998; opubl. 10.06.2000. (In Russ.). (In Russ.).

54. Pat. US5319276A. Corona-shielding arrangement for the stator winding of an electric machine / R. Schuler. Asea Brown Boveri Ltd. Zajavl. 27.04.1993; opubl. 07.06.1994. (In Russ.).

55. Pat. RU2120145S1. Izoljacionnaja lenta i sposob ee izgotovlenija / R. Shuler. A. Braun. Boveri AG. Zajavl. 27.12.1993; opubl. 10.10.1998. (In Russ.).

56. Pat. RU2189099S2. Izoljacija obmotki statora / T. Bauman, J. Jesterhel'd, R. Shuler. ABB Research Ltd. Zajavl. 15.05.1998; opubl. 10.09.2002. (In Russ.).

57. Pat. RU2608543S2. Material izoljacionnoj lenty, sposob ego izgotovlenija i primenenie / F. Jeder, P. Grepel', M. Prajbish, K. Ror. Siemens AG. Zajavl. 04.04.2013; opubl. 19.01.2017. (In Russ.).

58. Mannanov Je. R. O dijelektricheskikh materialah s vysokoj teploprovodnost'ju dlja sistem jelektricheskoi izoljacji vysokovol'tnyh jelektricheskikh mashin: obzor otechestvennoj i zarubezhnoj literatury // Materialovedenie. Jenergetika. 2021. T. 27, № 4. S. 42–67. doi: 10.18721/JEST.27404. (In Russ.).

#### Information about the authors

**Emil R. Mannanov** – Design engineer of the 1st category, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russia.

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

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

**Andrey M. Kostelov** – Chief specialist in turbine generator 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>

**Aleksey I. Tadzhibaev** – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Petersburg Power Engineering Institute of the Professional Development (FGAOU DPO «PEIPK»), Aviatsionnaya St., 23, St. Petersburg, 196135, Russia. Honorary President of the PEIPK.

E-mail: a\_tadzhibaev@inbox.ru

**Alexander M. Andreev** – Dr Sci. (Eng.), Senior Researcher, Chief Specialist in Electrical insulation Materials, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: andreev\_am@power-m.ru

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; принята к публикации после рецензирования 10.02.2024; опубликована онлайн 25.03.2024.

Submitted 06.12.2023; accepted 10.02.2024; published online 25.03.2024.

---