

Научная статья

УДК 62-1/-9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>



Э.Р. Маннанов  , А.М. Костельов,
А.Г. Филин, В.Н. Железняк

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

 emil-mannanov@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. В составе современных маневренных энергетических установок с приводом от газовых турбин традиционно применяются турбогенераторы с воздушным охлаждением, уровни эксплуатационных воздействий в которых высоки. Система электрической изоляции обмоток статоров является конструктивным элементом, который во многом определяет надёжную эксплуатацию турбогенераторов, особенно с воздушным охлаждением, учитывая сопряжённое воздействие повышенных тепловых, механических и электрических нагрузок. Актуальной задачей является обеспечение высокой надёжности таких турбогенераторов. АО «Силовые машины» применяли технологию вакуум нагнетательной пропитки статора (Global VPI) для производства турбогенераторов мощностью до 225 МВт с воздушным охлаждением. Однако, это техническое решение нельзя назвать успешным, так как в процессе эксплуатации в ряде генераторов, изготовленных в последние годы, имелись неисправности, приводившие к внеплановым ремонтам. Перевод изготовления линейки турбогенераторов с воздушным охлаждением, также включая новый турбогенератор для проекта ГТЭ-170, на технологию предварительно пропитанных лент (Resin Rich) позволил обеспечить соизмеримый уровень воздействующих температур, модернизировать систему пазовых уплотнений и коронозащиты на основе использования упругого радиального и бокового уплотнения стержня в пазе. Решены имеющиеся проблемы разрядной активности, термомеханических перемещений и ремонтпригодности статоров, что позволяет прогнозировать повышение эксплуатационной надёжности таких турбогенераторов. В конструкции системы изоляции турбогенератора для технологии Resin Rich применены только отечественные материалы, что является важным преимуществом в сложившихся условиях.

Ключевые слова: электроизоляционный материал, статорная обмотка, теплопроводность, система изоляции, надёжность.

Для цитирования:

Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., Железняк В.Н. Повышение эксплуатационной надёжности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>

E.R. Mannanov ✉, *A.M. Kostelov*,
A.G. Filin, *V.N. Zheleznyak*

JSC “Power machines”, St. Petersburg, Russia

✉ emil-mannanov@mail.ru

IMPROVEMENT OF OPERATIONAL RELIABILITY OF AIR-COOLED TURBOGENERATORS FOR A GAS TURBINE PLANT

Abstract. Modern mobile power plants driven by gas turbines traditionally use air-cooled turbogenerators, the levels of operational impacts of which are quite high. The system of electrical insulation of stator windings is a structural element that largely determines the reliable operation of turbogenerators, especially those with air cooling, taking into account the coupled impact of increased thermal, mechanical and electrical loads. An urgent task is to ensure high reliability of such turbogenerators. JSC Power Machines used the technology of vacuum pressure impregnation of the stator (Global VPI) for the production of air-cooled turbogenerators with a capacity of up to 225 MW. However, this technical solution cannot be viewed as successful, since during operation, a number of generators manufactured in recent years had malfunctions that led to unscheduled repairs. The production of a line of air-cooled turbogenerators, including a new turbogenerator for the GTE-170 project, was transferred to the technology of pre-impregnated tapes (Resin Rich). Such a transfer made it possible to ensure a commensurate level of influencing temperatures, modernize the system of slot seals and corona protection layers based on the use of elastic radial and lateral sealing of the rod in the slot. The existing problems of discharge activity, thermomechanical displacements and maintainability of stators were solved, which makes it possible to predict an increase in the operational reliability of such turbogenerators. In the design of the turbogenerator insulation system for the Resin Rich technology, only domestic materials were used, which is an important advantage in the current conditions.

Keywords: electrical insulating material, stator winding, thermal conductivity, insulating system, reliability.

Citation:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>

Введение. Газовая турбина является ключевым элементом парогазового цикла – самой эффективной сегодня технологии в традиционной тепловой энергетике. В отношении газовых турбин большой мощности Россия до сих пор полностью зависит от зарубежных поставок, что создает угрозу энергетической безопасности страны¹. АО «Силловые машины» при поддержке Минпромторга России реализуют проект возобновления производства газовых турбин высокой мощности в России², разработана первая в РФ газовая турбина ГТЭ-170³ [1, 2].

В составе современных маневренных энергетических установок с приводом от газовых турбин традиционно применяются турбогенераторы с воздушным охлаждением. АО «Силловые маши-

¹ Министерство энергетики РФ [вебсайт]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22981> Дата обращения: 27.06.23.

² В «СИЛОВЫХ МАШИНАХ» СОСТОЯЛОСЬ МЕЖВЕДОМСТВЕННОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ВОПРОСАМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РФ [вебсайт]. URL: <https://power-m.ru/press-center/news/v-silovykh-mashinakh-sostoyalos-mezhvedomstvennoe-soveshchanie-po-voprosam-tekhnologicheskogo-suvere/> Дата обращения: 27.06.23.

³ «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ» Завершили сборку головного образца российской газовой турбины большой мощности ГТЭ-170 [вебсайт]. URL: <https://power-m.ru/press-center/news/silovye-mashiny-zavershili-sborku-golovnogo-obraztsa-rossiyskoy-gazovoy-turbiny-bolshoy-moshchnosti/> Дата обращения: 27.06.23.

ны» разрабатывает и производит мощные турбогенераторы с воздушным охлаждением типа ТЗФ, максимальной мощности 225 МВт, 350 МВт (в проекте). Данные турбогенераторы отличает простота конструкции, сниженные затраты на эксплуатацию в виду отсутствия водородной системы, системы масляных уплотнений и системы непосредственного водяного охлаждения активных частей генератора. В паре с газовой турбиной ГТЭ-170 выработку электроэнергии на электростанции осуществляет турбогенератор мощностью 155 МВт серии ТЗФ-160-2МУЗ [3]. Одной из наиболее актуальных задач является обеспечение высокой надёжности турбогенераторов.

Турбогенераторы серии ТЗФ-160-2МУЗ имеют замкнутую вытяжную систему вентиляции. Циркуляцию охлаждающего воздуха в статорной цепи обеспечивают модифицированные центробежные вентиляторы. Движение воздуха по каналам ротора создается за счет давления, создаваемого при вращении этими каналами. Обмотка статора в пазовой части охлаждается косвенно при посредстве U-образных каналов, организованных вентиляционными распорками, расположенными между пакетами сердечника статора. Это означает прохождение всего объема основных и добавочных потерь, выделяемых в обмотке, через тепловой барьер, образованный системой её электрической изоляции, и, как следствие – высокий уровень термомеханических воздействий на эту систему [4]. На основании данных рассуждений и опыта эксплуатации турбогенераторов с воздушным охлаждением можно сделать вывод о том, что надёжность таких машин во многом определяет система изоляции обмотки статора [5, 6].

В процессе эксплуатации происходит изменение свойств материалов применяемых в системе изоляции, что в процессе эксплуатации может приводить к снижению срока службы генератора или к аварийным остановам. В последние годы возросло количество неисправностей, связанных с различными видами износа системы изоляции турбогенераторов с воздушным охлаждением. Большая часть опубликованной литературы указывает на повышенные тепловые и электрические нагрузки, которые могут привести к ускоренной деградации, связанной с частичным разрядом, в качестве причины таких наблюдений [7, 8].

Факторы, влияющие на работоспособность электрической изоляции

Воздействие электрического поля проявляется в возникновении и развитии электроразрядных процессов – внутренних частичных разрядов (ВЧР) и пазовых частичных разрядов (ПЧР), а также виброискровых разрядов (ВИ) [9, 10].

На рис. 1 представлен вариант типичного конструктивного исполнения паза статора турбогенератора с отдельно изготовленными и уложенными в статор стержнями обмотки. Защитную функцию основной изоляции от электроразрядной активности выполняет система коронозащиты.

Общепризнано⁴, что ВЧР являются причиной электрического старения слюдосодержащей корпусной изоляции высоковольтных электрических машин. Тем не менее, термореактивная корпусная изоляция высоковольтных электрических машин может нормально функционировать в течение всего срока службы при наличии достаточно интенсивных ВЧР. При этом критического ухудшения ресурса не наблюдается в виду специфических свойств современной корпусной изоляции, содержащей в своем составе слюдяной барьер [12, 13]. Принципиально иначе протекают процессы, происходящие в пазовой зоне статорной обмотки, где наблюдаются два типа электрических разрядов – ПЧР и ВИ. Каждый тип этих разрядов имеет одинаковую область распространения, но отличается физическим механизмом возникновения и развития. ПЧР могут возникнуть на поверхности стержня (или катушки) внутри паза сердечника статора [14], они представляют собой пробой газовых промежутков, образующихся между стенками паза и поверхностью изоляции стержня, например, с дефектным или неправильно изготовленным противокоронным покрытием.

⁴ Андреев А.М., Дудкин С.М., Монастырский А.Е. и др. Изоляция установок высокого напряжения. Измерения частичных разрядов и оценка технического состояния: учеб. пособие – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 88 с.

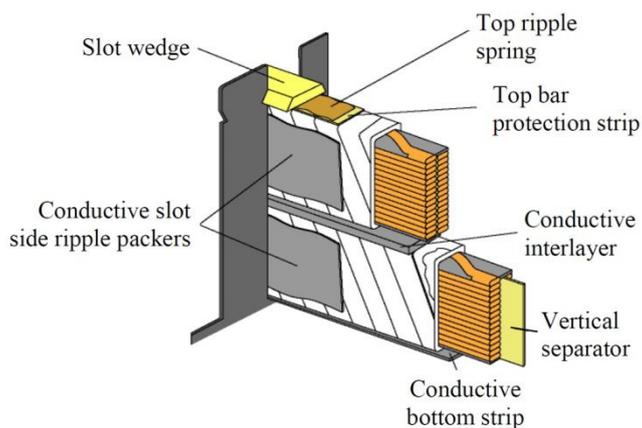


Рис. 1. Коронозащитные слои в технологии Resin Rich
Fig. 1. Corona protection layers in Resin Rich technology [11]

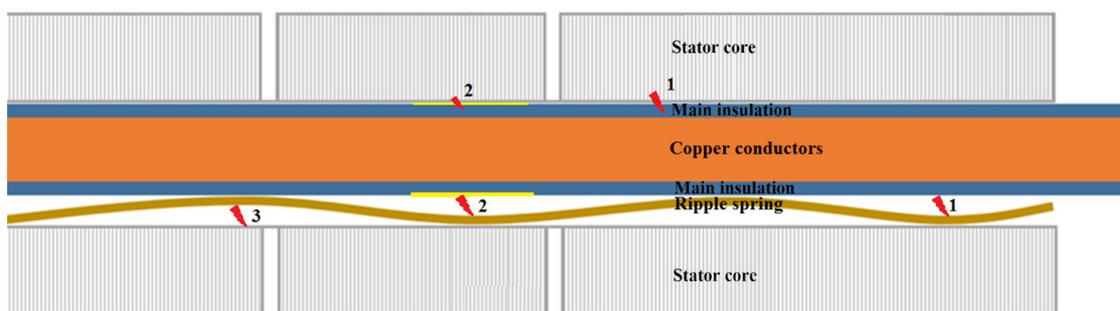


Рис. 2. Характерные ПЧР в воздушном зазоре конструкции пазового уплотнения:
1. повышенное сопротивление пазового проводящего покрытия, 2. повреждение пазового покрытия в локальной зоне, 3. повышенное сопротивление упругой прокладки
Fig. 2. Characteristic slot partial discharges in the air gap of the slot seal design: 1. increased resistance of the slot conductive coating, 2. damage to the slot coating in the local zone, 3. increased resistance of the ripple spring

Установлено [15], что в условиях повышения сопротивления проводящего покрытия достигаемое значение напряженности в воздушном зазоре может превышать пробивное напряжение воздушного промежутка, этот же эффект проявляется в условиях локальных повреждений покрытий [11].

На рис. 2 схематично представлены наиболее характерные причины возникновения ПЧР.

Существуют три основных причины возникновения ПЧР в системе изоляции статорной обмотки:

- вибрация ослабленных стержней в пазах приводит к истиранию и разрушению пазового проводящего покрытия в локальной области;
- некачественно изготовленное пазовое проводящее покрытие не обеспечивает выполнения своей функции из-за чрезмерно высокого начального сопротивления или из-за плохого качества наложения покрытия на пазовую часть стержня;
- плохое соединение проводящего покрытия с «землей» [16].

В турбогенераторах с воздушным охлаждением интенсивные ПЧР приводят к образованию озона, который в свою очередь приводит к разрушению коронозащитного покрытия. Такие ПЧР и озон будут воздействовать на корпусную изоляцию, приводя к разъеданию поверхности и образованию сквозного отверстия в корпусной изоляции.

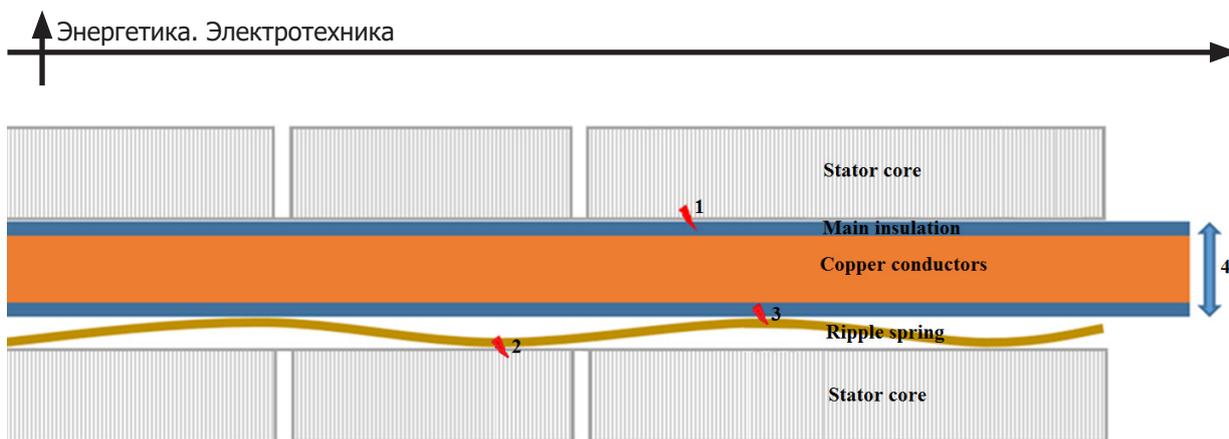


Рис. 3. Зоны потенциального возникновения ВИ в пазовой части обмотки статора в условиях вибрации стержня: 1. сердечник статора – внешнее коронозащитное покрытие стержня, 2. волнистая упругая прокладка-статор, 3. полупроводящее покрытие – волнистая прокладка, 4. вибрация

Fig. 3. Zones of potential occurrence of vibration sparking in the slot part of the stator winding under conditions of vibration of the rod in the stator slot: 1. stator core – external corona-protective coating of the rod, 2. ripple spring – stator, 3. semiconductive coating – ripple spring, 4. vibration

Вибрационное искрение, которое также наблюдается в системах изоляции статорной обмотки высоковольтных турбогенераторов, выглядит подобным процессом, но, в действительности, совершенно отлично от процесса возникновения и разрушения под действием ПЧР [17–20]. Этот механизм запускается потоком возбуждения в сердечнике, тогда как ПЧР могут происходить только на высокопотенциальных стержнях. Причиной ВИ является вибрация стержней в пазе и низкое поверхностное сопротивление пазового проводящего покрытия.

На рис. 3 представлены потенциальные зоны возможного возникновения ВИ в пазовой части обмотки статора [21].

Согласно исследованиям [17–19], между признаками разрушения изоляции, возникшими вследствие ВИ и ПЧР, наблюдаются существенные различия. В отличие от ПЧР, разрушающее воздействие ВИ обусловлено высокой температурой, достигающей в зоне действия электрической дуги значений (6000 – 10000) К, и обычно намного более интенсивно, чем ПЧР. По данным [10, 14], явление ВИ связано с искрением высокой интенсивности, обладающим энергией, достаточной для того, чтобы повлечь за собой довольно быстрый отказ корпусной изоляции стержней уже через несколько лет, причем интенсивность ВИ достаточна для того, чтобы повредить как корпусную изоляцию, так и сегменты сердечника из листовой стали [13].

Изоляция стержней, испытывающих вибрацию в пазах, будет неизбежно подвергаться износу. Поскольку пазовое проводящее покрытие наносится на наружные поверхности стержней в качестве последнего слоя, то это покрытие будет неизбежно повреждаться. При изготовлении обмотки и проведении корректирующих мер следует в первую очередь остановить вибрацию, используя надежные уплотняющие элементы, а, во-вторых, правильно сконструировать внешнее противокоронное покрытие.

У изготовителей имеются различные методы улучшения крепления стержня в пазе после их укладки, например, посредством установки полупроводящих (обычно волнистых) боковых прокладок между стержнем статорной обмотки и железом статора. Тем не менее, установка уплотнений полностью не исключает незаполненных воздушных включений, в которых могут возникнуть ПЧР. Необходимость предотвращения ПЧР, несмотря на наличие неизбежных воздушных включений, определяет основные требования к конструкции статорной обмотки.

Полупроводящий наружный слой коронозащитного покрытия является основной частью решения. Он представляет собой полупроводящее покрытие на поверхности стержня по длине паза. Это покрытие эффективно выполняет свою роль, если будет заземлено, поскольку при наличии

слоя на нулевом потенциале в боковых пустотах не будет возникать разность потенциалов. Надежное заземление наружного коронозащитного слоя является ключевым вопросом конструкции, который решается, когда наружные коронозащитные слои покрытия будут иметь достаточно случайных точек контакта со стенками паза.

Вторым важным условием является оптимальное значение поверхностного удельного сопротивления коронозащитного слоя, обеспечивающего основное требование – недопущение формирования допустимой разности потенциалов в пустотах.

Надежное заземление и соответствующее сопротивление коронозащитного слоя должны предотвращать как ПЧР, так и ВИ.

Особенности конструктивных и технологических решений

Применяемая технология изготовления статора турбогенератора и стержней обмотки диктует технические особенности для конструктивного исполнения уплотнения паза с целью обеспечения работоспособности системы коронозащиты. Особенно большие статоры генераторов должны также оцениваться с точки зрения термомеханических сил в условиях эксплуатации, т. е. сдвигающих усилий в неподвижных стержнях статора [14].

Производители оборудования для изготовления стержней статорных обмоток используют различные технологии, среди которых наибольшее распространение получили следующие технологии:

- вакуум нагнетательная пропитка компаундом статора с предварительно уложенными стержнями (Global VPI);
- изготовление отдельных стержней в прессах или методом гидростатической прессовки с последующей укладкой готовых стержней в статор на основе применения предварительно пропитанных лент (Resin Rich);
- изготовление отдельных стержней путем вакуум нагнетательной пропитки с последующей укладкой готовых стержней в статор (Single VPI).

Наиболее подробно описание основных особенностей технологии изготовления обмоток статоров турбогенераторов представлены в монографиях [21, 22]

Первые две из представленных технологий в настоящее время применяются при производстве турбогенераторов с воздушным охлаждением в АО «Силовые машины». Технологию Global VPI для производства статоров мощных турбогенераторов широко применяет фирма Siemens. Технология Single VPI – наиболее распространенная технология для производства обмоток, которую используют большинство крупных производителей.

Задачи обеспечения работоспособности коронозащитного покрытия успешно решается путем использования упругих полупроводящих прокладок в качестве бокового уплотнения и радиального уплотнения в пазе статора. Преимущества волнистых упругих прокладок подтверждены в работах [23–26]. Однако, этот способ применим только в случае использования технологий изготовления отдельных стержней.

Особую актуальность имеет проблема конструктивного исполнения и защиты от повреждений системы пазового крепления обмотки генераторов с воздушным охлаждением, изготавливаемых по технологии Global VPI, особенно – с точки зрения термомеханических сил в условиях эксплуатации.

К наиболее интересным, следует отнести технические решения, используемые в конструкции турбогенераторов фирмы Siemens. Основной идеей этого и подобных решений, применяемых в технологии изготовления изоляции способом Global VPI, является выполнение противокоронного слоя, заполняющего промежуток между поверхностью изоляции стержня и стенкой паза, в виде пористой трехслойной оболочки. Первый, примыкающий к изоляции, и третий, касающийся стенок паза, слои выполняются наложением ленты (первый слой) или ленты/полотна

(третий слой) из полупроводящего материала. Как правило, используется тканая или волоконная подложка из политетрафторэтилена (PTFE), пропитанная термореактивной смолой (обычно эпоксидной), наполненной углеродом (сажа, графит). Между этими слоями располагается промежуточный (разделительный) второй слой, предназначенный для восприятия и компенсации термомеханических напряжений, образующихся в процессе работы генератора из-за различия теплового расширения проводников стержня, изоляции и сердечника [10].

АО «Силловые машины» в конструкции турбогенераторов мощностью до 225 МВт с воздушным охлаждением, изготавливаемых по технологии Global VPI разработали оригинальную конструкцию для уплотнения стержней в пазе статора на основе вязкоупругих прокладок из кремний-органической резины с полупроводящими свойствами для конструкции бокового уплотнения и диэлектрическими свойствами для конструкции радиального уплотнения [4]. Однако, это техническое решение нельзя назвать успешным, так как в процессе эксплуатации в ряде генераторов, изготовленных в последние годы АО «Силловые машины», имелись неисправности, приводившие к внеплановым ремонтам. Основная причина таких неисправностей заключается в снижении упругих свойств и усадке уплотнений при эксплуатационных воздействиях повышенных температур в обмотке статора и, в результате, возникновения протяженных пустот между стержнем и сердечником паза, нарастанием вибрационных воздействий, с нарастанием интенсивности ПЧР и разрушением изоляции.

Рациональным решением для обеспечения эксплуатационной надежности явился перевод изготовления статоров турбогенераторов с воздушным охлаждением АО «Силловые машины» для линейки мощностей 80–225 МВт с технологии Global VPI на технологию Resin Rich. Это решение позволяет обеспечить модернизацию наиболее проблемных конструктивных элементов, а именно, систему пазовых уплотнений на основе использования упругого радиального диэлектрического и бокового проводящего уплотнения стержня в пазе и системы коронозащиты, в которой применено комбинированное коронозащитное покрытие на основе ленточных и эмалевых покрытий, отличающееся повышенной стойкостью к воздействию ПЧР [27]. Таким образом, могут быть решены проблемы разрядной активности, термомеханических перемещений и ремонтпригодности статоров.

Выполненные исследования свойств материалов системы коронозащиты и упругих уплотнений в условиях длительного воздействия повышенных рабочих температур выявили тенденцию снижения упругих свойств материалов пазового уплотнения и сопротивления коронозащитных покрытий при повышении воздействующей температуры [28]. Снижение упругих свойств уплотнений может вызвать повышенные вибрации стержней в пазе и создать условия для возникновения вибрационного искрения при условии снижения сопротивления коронозащитного покрытия [29]. Представляется чрезвычайно важным выполнить сравнительную оценку изменения теплового состояния обмотки статора для двух конструктивных решений.

Оценка влияния принятых конструктивных решений в турбогенераторах различных исполнений на тепловое состояние изоляции статора

Статоры турбогенераторов, изготовленные по технологии Global VPI, обладает лучшей теплопередачей в обмотке за счет исключения воздушных зазоров в боковом уплотнении. Однако, в процессе эксплуатации, применяемые в конструкции уплотнений материалы, могут изменять свои свойства и конструктивные размеры, что неизбежно приводит к повышению уровня температур в эксплуатации. Для возможности достижения аналогичных показателей теплового состояния обмоток статоров для конструкции, изготовленной по технологии Resin Rich АО «Силловые машины» применили материалы основной электрической изоляции с теплопроводностью, повышенной примерно на 30% относительно стандартно применяемой. Дальнейшее улучшение теплового состояния в изоляции обмотки статора возможно за счет использования электроизоля-

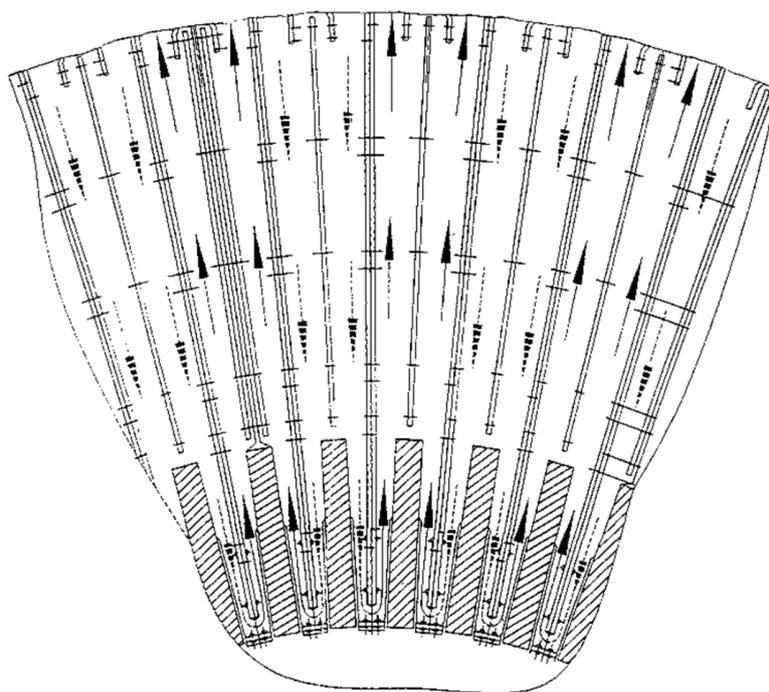


Рис. 4. Охлаждение пазовой части сердечника статора

Fig. 4. Cooling of the slot part of the stator core

ционных материалов с теплопроводностью значительно выше применяемых. В настоящее время АО «Силовые машины» выполняют комплекс НИОКР направленный на создание высокотеплопроводных электроизоляционных материалов путем их наполнения мелкодисперсными высокотеплопроводными наполнителями.

Результаты расчетов коэффициентов эквивалентной теплопроводности системы изоляции пазовой части обмотки статора турбогенератора ТЗФ-160-2МУЗ для Resin Rich и Global VPI, полученные с применением расчетной методики [30, 31] свидетельствуют о снижении теплопередачи лишь на 1 %.

В статьях [30–33] показано, что наибольший эффект на эквивалентную теплопроводность системы изоляции оказывает корпусная изоляция, геометрические параметры которой значительно превосходят остальные конструктивные элементы в системе изоляции статорной обмотки.

При детальном рассмотрении конструкции изоляции для стороны гофрированной прокладки (технология Resin Rich), следует, что преимущество высокой теплопроводности упругой прокладки на основе стеклопластика, имеющей форму гофры в сравнении с вязкоупругой уплотнительной прокладкой из кремнийорганической резины, не имеет ощутимого практического выигрыша ввиду влияния периодических воздушных пустот в упругой прокладке бокового уплотнения.

Анализ экспериментальных и расчетных данных

Охлаждение центральной зоны сердечника статора рассматриваемого турбогенератора осуществляется при помощи воздуха, циркулирующего в радиальных U-образных каналах (как показано на рис. 4). Для организации движения воздуха по U-образным каналам на периферии сердечника статора размещены зоны входа (нагнетания) и выхода (разрежения) охлаждающего газа. В радиальных U-образных каналах холодный воздух из зоны нагнетания попадает в радиальные каналы между пакетами активной стали сердечника и проходит последовательно вначале в направлении расточки, а затем – в противоположном направлении к камерам разрежения.

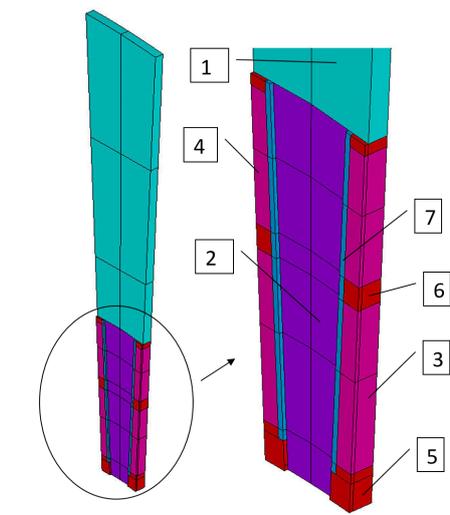


Рис. 5. Модель теплового расчета статора: 1 – ярмо сердечника статора, 2 – зубцы сердечника статора, 3 – верхний стержень обмотки статора, 4 – нижний стержень обмотки статора, 5 – клин, 6 – изоляционные прокладки, 7 – композиция изоляции между проводниками меди в пазе и зубцами

Fig. 5. Stator thermal calculation model: 1 – stator core yoke, 2 – stator core teeth, 3 – upper stator winding rod, 4 – lower stator winding rod, 5 – wedge, 6 – insulating gaskets, 7 – insulation composition between copper conductors in slot and teeth

Для организации движения воздуха по U-образным каналам на периферии сердечника статора размещены зоны входа (нагнетания) и выхода (разрежения) охлаждающего воздуха: холодный воздух из зоны нагнетания попадает в радиальные каналы между пакетами активной стали сердечника и проходит последовательно вначале в направлении расточки, а затем – в противоположном направлении к камерам разрежения. В данной конструкции исключен воздухообмен между U-образными каналами статора и воздушным зазором между статором и ротором.

Методика теплового расчёта статора турбогенератора ТЗФ-220-2 была представлена ранее [34, 35]. Аналогичная методика была использована при тепловом расчете данного турбогенератора, с учётом применения U-образных каналов в сердечнике статора, произведен тепловой расчет статора турбогенератора ТЗФ-160-2МУЗ.

Модель теплового расчета статора турбогенератора представляет собой пазовое деление статора, ограниченное, в силу тепловой симметрии, наружной поверхностью ярма и расточкой статора на длине, равной половине пакета стали статора (см. рис. 5).

В качестве исходных данных для выполнения теплового расчета используются исходящие данные электромагнитного и вентиляционного расчетов, полученные по результатам решения соответствующих задач.

На границах объемов, через которые осуществляется конвективный теплообмен (поверхность сердечника, обращенная в U-образные каналы, в расточку статора, а также – периферия сердечника статора), задаются граничные условия третьего рода:

$$-\frac{\partial \Theta_f}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (\Theta_f - \vartheta_0), \quad (1)$$

где Θ_f – температура на поверхности, n – направление нормали, ϑ_0 – величина подогрева охлаждающей среды, α и λ – значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности и теплопроводности соответственно.

На плоскостях симметрии расчетной модели задаются условия второго рода:

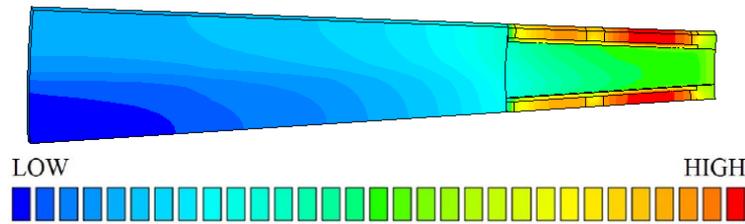


Рис. 6. Картина температурного распределения зубцов сердечника статора и обмотки статора в пазовой части
 Fig. 6. Temperature distribution of the stator core teeth and the stator winding in the slot part

$$q_f = \text{const} = 0, \quad (2)$$

где q_f – тепловой поток через поверхность.

На границах, по которым соприкасаются объемы модели, принимаются граничные условия четвертого рода (единственность теплового потока и единственность температуры в любой точке идеальной контактной поверхности двух однородных или разнородных тел):

$$\begin{aligned} \Theta_{1,f} &= \Theta_{2,f}; \\ \lambda_1 \frac{\partial \Theta_{1,f}}{\partial n} &= \lambda_2 \frac{\partial \Theta_{2,f}}{\partial n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты пространственного стационарного теплового расчета статора турбогенератора в программе ANSYS представлены на рис. 6, различные подходы к моделированию описаны в [36, 37].

Таким образом, по результатам полевого теплового расчета, превышение температуры обмотки статора над воздухом, выходящим из воздухоохлаждателей, по показанию штатного термометра сопротивления, установленного между стержнями, не превышает 1 % уровня относительно результатов замеров применительно к серийному турбогенератору с воздушным охлаждением мощностью 160 МВт. Расчетные значения максимальной температуры изоляции стержня в пазовой части статора не превышают 3 % относительно полученных средних значений температуры на поверхности изоляции.

В свою очередь, новые турбогенераторы серии ТЗФ-160-2МУЗ спроектированы со снижением величины добавочных потерь в обмотке статора, что оказало положительный эффект на тепловом состоянии системы изоляции в целом, снизив уровень расчетных значений температуры на 19 %, а перепад температуры по толщине системы изоляции на 30 % относительно верифицированной расчетной модели. Уровень температуры изоляции статора в пазовой части не превышает класса нагревостойкости F.

Следует отметить, что возможное дальнейшее снижение тепловой нагрузки в обмотке статора потенциально обеспечит дополнительное снижение термомеханических нагрузок в изоляции, благоприятно повлияет на надежность турбогенератора. Этого результата можно добиться путем повышения теплопроводности системы изоляции за счет разработки и внедрения высокотеплопроводных электроизоляционных материалов, в частности, корпусной изоляции с новыми свойствами.

Заключение

Авторами на основании технического анализа и опыта эксплуатации показано, что надёжность турбогенераторов с воздушным охлаждением для современных маневренных энергетиче-

ских установок с приводом от газовых турбин во многом определяет система электрической изоляции обмотки статора. Технический анализ факторов влияющих на работоспособность электрической изоляции показал, что вибрационное искрение и пазовые частичные разряды являются основными факторами, приводящими к повреждению электрической изоляции. Показано, что рациональным решением для обеспечения эксплуатационной надежности явился перевод изготовления статоров турбогенераторов с воздушным охлаждением АО «Силовые машины» для линейки мощностей 80–225 МВт с технологии Global VPI на технологию Resin Rich, для чего на основе внедрения отечественных материалов была модернизирована: -система пазовых уплотнений, на основе использования упругого радиального диэлектрического и бокового проводящего уплотнения стержня в пазе; -система коронозащиты, в которой применено комбинированное коронозащитное покрытие на основе двухслойного ленточного и эмалевого покрытий, отличающееся повышенной стойкостью к воздействию ПЧР. Тем самым, были решены проблемы разрядной активности, термомеханических перемещений и ремонтпригодности статоров.

Показано, что при увеличении воздействующей температуры наблюдается увеличение скорости снижения упругих свойств материалов пазового уплотнения и сопротивления коронозащитных покрытий, что может приводить к интенсификации разрядных процессов в изоляции в процессе эксплуатации. Для оценки уровня температур при переходе изготовления статоров от технологии Global VPI к Resin Rich, авторами выполнен сравнительный расчет теплового состояния статоров турбогенераторов мощностью 160 МВт, который показал сопоставимый уровень теплового состояния, что обеспечивается использованием материалов изоляции с теплопроводностью, повышенной примерно на 30% относительно стандартно применяемой для технологии Resin Rich. Дальнейшее снижение воздействующих температур может обеспечить условия для повышения надежности турбогенераторов и может быть реализовано путем внедрения высокопроводящих электроизоляционных материалов, в частности, корпусной изоляции нового поколения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Мазалов А.Б., Зеленина Л.С., Ендальцев Е.П., Фокин Н.И., Барудкин В.В., Тарасов Д.С. Опыт применения аддитивных технологий для изготовления деталей камеры сгорания ГТЭ-170. Газотурб. технол. 2021, N 3, с. 12–16.
- [2] Кириченко Р.Е., Черкасова М.Г., Сагитов А.Ф., Козакевич А.А. Основные направления модернизации турбины ГТЭ-170. Газотурб. технол. 2020, N 5, с. 36–40.
- [3] Хуторецкий Г.М. Турбогенераторы единой унифицированной серии мощностью 160–800 мВт, 3000 об/мин. Академик Я.Б. Данилевич. Избранные труды: Сборник. СПб. 2021, с. 92–97.
- [4] Ройтгарц М.Б., Антонюк О.В., Карташова Т.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ // Новое в Российской Электроэнергетике. 2013. № 5. С. 5–17.
- [5] Андреев А.М., Таджибаев А.И., Азизов А.Ш., Костельов А.М., Степанов А.А., Назаров Г.А., Иванов С.А. Обеспечение надежности турбогенераторов на основе контроля разрядных процессов в электрической изоляции статорной обмотки. Надеж. и безопас. энерг.. 2022. 15, N 3, с. 199–204.
- [6] Корчагин Н.Ю., Серебрянников С.В., Серебрянников С.С., Черкасов А.П. Контроль остаточных свойств изоляции турбогенератора. 18 Международная конференция "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты", Алушта, 21-25 сент., 2020: Труды МКЭЭЭ – 2020. Нац. исслед. ун-т "МЭИ". М., 2020, с. 18–23.
- [7] Howard W. DETERIORATION MECHANISMS IN RECENT AIR COOLED TURBINE GENERATORS, Proceedings of PWR2006: ASME Power, 2006, pp. 1–7.

[8] Шаров Ю.В., Бинько Г.Ф., Беляков В.В., Веницкий Ю.Д., Голоднова О.С., Купчиков Т.В., Федотов М.В., Астанин А.А., Тарасов В.М., Миляев Р.Г., Пичугин Д.Е., Шумов П.В. Цифровизация контроля текущего состояния и предиктивной диагностики турбогенераторов на электростанциях. Энергия един. сети. 2019-2020, № 6, с. 18–30.

[9] Stone G.C. Electrical Insulation for Rotating Machines, IEEE Press-Wiley, 2018, 2nd ed., 672 P.

[10] Montanari G.C., Seri P.A. Partial Discharge–Based Health Index for Rotating Machine Condition Evaluation, IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, vol. 34, № 2, pp. 17–23.

[11] Brüttsch R., Hillmer T. “Corona Protection in Rotating High Voltage Machines,” INDUCTICA 2006 Conference, Berlin.

[12] Андреев И.А. Разработка методики идентификации дефектов изоляции электроэнергетического оборудования по статистическим характеристикам частичных разрядов: диссертация на соискание степени кандидата технических наук: 05.09.02

[13] Андреев А.М., Таджикибеков А.И., Азизов А.Ш., Костельов А.М., Степанов А.А., Назаров Г.А., Иванов С.А. "Обеспечение надежности турбогенераторов на основе контроля разрядных процессов в электрической изоляции статорной обмотки". Надежность и безопасность энергетики, 2022 г. Т. 15. № 3. С. 199–204.

[14] ENHANCED CALCULATION AND DIMENSIONING OF OUTER CORONA PROTECTION SYSTEMS IN LARGE ROTATING MACHINES Siemens AG, Germany. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015.

[15] Belko V.O., Petrenya Y.K., Andreev A.M., Kosteliov A.M., Roitgarz M.B. "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800–802.

[16] Andreev A.M., Andreev I.A., Belko V.O., Reznik A.S., Smirnov A.N., Stepanov A.A. Modelling of Electrical Discharge Processes for Optimization of Corona Protection System of High Voltage Rotating Machines Insulation. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2 (46), 2020. С. 33–42. DOI: 10.5281/zenodo.3898227

[17] Lévesque M., Hudon C. Insulation Degradation Analysis of Stator Bars Subjected to Slot Partial Discharges //2017 Electrical Insulation Conference, Ottawa, Canada, 2017, pp. 479–485.

[18] Kumada A., Onishi D, Morita Y., Boggs S.A. Surface corona inception on stress grading system //INSUCON2017 – 13th International Electrical Insulation Conference, Birmingham, UK, 2017, 11 P.

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

[20] Xia Y. Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017, vol. 20, № 1, pp. 42–53.

[21] Stone G.C., Culbert I., Boulter E.A., Dhirani H. (2014). Electrical Insulation for Rotating Machines. 371 P. DOI: 10.1002/9781118886663

[22] «Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин», В.М. Пак, С.Г. Трубочев, Москва, Энергоиздат, 2007, 415 С.

[23] Liese M. Vibration Sparking, an Ignored Damage Mechanism of High Voltage Windings, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, pp. 1–6.

[24] Moore B., et al. Stator Winding Failure due to Spark Erosion, 5th EPRI Conf. Turbine Generator Technology, 2008, Concord, pp. 1–7.

[25] Moore B., Khazanov A. Degradation in Generator Stator Bars due to Spark Erosion and Partial Discharge Damage, 2010 IEEE Conf., pp. 1–7.

[26] Maudy W.H. Deterioration Mechanisms in Recent Air Cooled Turbine Generators, Proc. ASME Power, Atlanta, 2006, pp. 1–7.

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

[28] Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Chernyshov D.A. "Investi- gation of Mechanical Characteristics of Pressuring Materials of Generators Stator Winding in Thermal Aging Process," 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon- Rus), 2023, pp.. (в печати).

[29] Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Reznik A.S., Kostelov A.M., Mannanov E.R. Causes of Resist- ance Decrease of Corona Protection Materials in Thermal Aging Process , 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2023, pp. DOI: (in print)

[30] Маннанов Э.Р., Филин А.Г. ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ // Глобаль- ная энергия. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49. DOI: [10.18721/JEST.27203](https://doi.org/10.18721/JEST.27203)

[31] Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E.R. Mannanov, A.G. Filin, V.O. Belko // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2021 IEEE NWRussia. – 2021. – pp. 1193–1196. DOI: [10.1109/EIConRus51938.2021.9396705](https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396705)

[32] Маннанов Э.Р. Разработка численной модели для расчета коэффициента эффективной тепло- проводности системы изоляции статорной обмотки турбогенераторов / Маннанов Э.Р. // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разрабо- ток, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли. 2020, С. 108–114.

[33] Mannanov E.R., Kostelov A.M., Belko V.O., Fedotov N.A., Govor V.M. "Investigation of the Ther- mophysical Processes in Highly Thermally Conductive Composite Material with a Complex Structure," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 1026–1029, DOI: [10.1109/EIConRus54750.2022.9755505](https://doi.org/10.1109/EIConRus54750.2022.9755505)

[34] Кучинський К.А., Крамарський В.А., Худяков А.В. Экспериментальное исследование тепло- обмена в аксиальных каналах зубцов сердечника статора турбогенератора. Праці Ін-ту електродинам. НАН України. 2019, N 53, с. 35–38.

[35] Филин А.Г., Голубков В.Д., Шишкина И.А. Оптимизация расчетных алгоритмов определения теплового состояния активных частей турбогенератора. Материаловед. Энерг. 2021. 27, N 4, с. 5–18.

[36] Рыжов В.В., Дергачев П.А., Курбатова Е.П., Молоканов О.Н., Курбатов П.А. Построение трех- мерной тепловой модели статора турбогенератора с учетом газодинамики. Вестн. МЭИ. 2021, N 5, с. 75–82.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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>

ФИЛИН Алексей Григорьевич – главный специалист, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: Filin_AG@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9516-9970>

ЖЕЛЕЗНЯК Владимир Николаевич – начальник отдела расчетов, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: Zheleznyak_VN@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9499-385X>

REFERENCES

- [1] **A.B. Mazalov, L.S. Zelenina, Ye.P. Yendaltsev, N.I. Fokin, V.V. Barudkin, D.S. Tarasov**, Opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy dlya izgotovleniya detaley kamery sgoraniya GTE-170. *Gazoturb. tekhnol.* 2021, N 3, s. 12–16.
- [2] **R.Ye. Kirichenko, M.G. Cherkasova, A.F. Sagitov, A.A. Kozakevich**, Osnovnyye napravleniya modernizatsii turbiny GTE-170. *Gazoturb. tekhnol.* 2020, N 5, s. 36–40.
- [3] **G.M. Khutoretskiy**, Turbogeneratory yedinoi unifikatsionnoy serii moshchnostyu 160-800 mVt, 3000 ob/min. *Akademik Ya. B. Danilevich. Izbranyne trudy: Sbornik.* SPb. 2021, s. 92–97.
- [4] **M.B. Roytgarts, O.V. Antonyuk, T.N. Kartashova**, POVYShENIE YeDINICHNOY MOShchNOSTI TURBOGENERATOROV S ISPOLZOVANIEM NOVYKh MATERIALOV I TEKhNOLOGIY // *Novoye v Rossiyskoy Elektroenergetike.* 2013. № 5. S. 5–17.
- [5] **A.M. Andreyev, A.I. Tadzhibayev, A.Sh. Azizov, A.M. Kostelov, A.A. Stepanov, G.A. Nazarov, S.A. Ivanov**, Obespecheniye nadezhnosti turbogeneratorov na osnove kontrolya razryadnykh protsessov v elektricheskoy izolyatsii statornoy obmotki. *Nadezh. i bezopas. energ.* 2022. 15, N 3, s. 199–204.
- [6] **N.Yu. Korchagin, S.V. Serebryannikov, S.S. Serebryannikov, A.P. Cherkasov**, Kontrol ostatochnykh svoystv izolyatsii turbogenerators. 18 Mezhdunarodnaya konferentsiya "Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskiye materialy i komponenty", Alushta, 21-25 sent., 2020: *Trudy MKEEE – 2020. Nats. issled. un-t "MEI". M.. 2020, s. 18-23.*
- [7] **W. Howard**, DETERIORATION MECHANISMS IN RECENT AIR COOLED TURBINE GENERATORS, *Proceedings of PWR2006: ASME Power, 2006*, pp. 1–7.
- [8] **Yu.V. Sharov, G.F. Binko, V.V. Belyakov, Yu.D. Vinitskiy, O.S. Golodnova, T.V. Kupchikov, M.V. Fedotov, A.A. Astanin, V.M. Tarasov, R.G. Milyayev, D.Ye. Pichugin, P.V. Shumov**, Tsifrovizatsiya kontrolya tekushchego sostoyaniya i prediktivnoy diagnostiki turbogeneratorov na elektrostantsiyakh. *Energiya yedin. seti.* 2019-2020, N 6, s. 18–30.
- [9] **G.C. Stone**, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, IEEE Press-Wiley, 2018, 2nd ed., 672 P.
- [10] **G.C. Montanari, P.A. Seri**, Partial Discharge–Based Health Index for Rotating Machine Condition Evaluation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2018, vol. 34, № 2, pp. 17–23.
- [11] **R. Brüttsch, T. Hillmer**, "Corona Protection in Rotating High Voltage Machines," *INDUCTICA 2006 Conference*, Berlin.
- [12] **I.A. Andreyev**, Razrabotka metodiki identifikatsii defektov izolyatsii elektroenergeticheskogo oborudovaniya po statisticheskim kharakteristikam chastichnykh razryadov: dissertatsiya na soiskaniye stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.09.02
- [13] **A.M. Andreyev, A.I. Tadzhibekov, A.Sh. Azizov, A.M. Kostelov, A.A. Stepanov, G.A. Nazarov, S.A. Ivanov**, "Obespecheniye nadezhnosti turbogeneratorov na osnove kontrolya razryadnykh protsessov v elektricheskoy izolyatsii statornoy obmotki". *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*, 2022 g-T.15-№3 C. 199–204.
- [14] ENHANCED CALCULATION AND DIMENSIONING OF OUTER CORONA PROTECTION SYSTEMS IN LARGE ROTATING MACHINES Siemens AG, Germany. *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, Czech Republic, 2015.
- [15] **V.O. Belko, Y.K. Petrenya, A.M. Andreev, A.M. Kosteliov, M.B. Roitgarz**, "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800–802.

- [16] **A.M. Andreev, I.A. Andreev, V.O. Belko, A.S. Reznik, A.N. Smirnov, A.A. Stepanov**, Modelling of Electrical Discharge Processes for Optimization of Corona Protection System of High Voltage Rotating Machines Insulation. *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE* 2 (46), 2020. С. 33–42. DOI: 10.5281/zenodo.3898227
- [17] **M. Lévesque, C. Hudon**, Insulation Degradation Analysis of Stator Bars Subjected to Slot Partial Discharges // 2017 Electrical Insulation Conference, Ottawa, Canada, 2017, pp. 479–485.
- [18] **A. Kumada, D. Onishi, Y. Morita, S.A. Boggs**, Surface corona inception on stress grading system // *INSUCON2017 – 13th International Electrical Insulation Conference*, Birmingham, UK, 2017, 11 P.
- [19] **A. Akbari, M. Rahimi, P. Werle, H. Borsi**, Fault Localization and Analysis for a Damaged Hydrogenerator and a Proposal to Improve the Standard for Generator Commissioning Tests, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2021, vol. 36, №. 3, pp. 19–26.
- [20] **Y. Xia**, Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017, vol. 20, № 1, pp. 42–53.
- [21] **G.C. Stone, I. Culbert, E.A. Boulter, H. Dhirani**, (2014). *Electrical Insulation for Rotating Machines*. 371 P. DOI: 10.1002/9781118886663
- [22] «Novyye materialy i sistemy izolyatsii vysokovoltnykh elektricheskikh mashin», V.M. Pak, S.G. Trubachev, Moskva, Energoizdat, 2007, 415 С.
- [23] **M. Liese**, Vibration Sparking, an Ignored Damage Mechanism of High Voltage Windings, *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*, pp. 1–6.
- [24] **B. Moore, et al.**, Stator Winding Failure due to Spark Erosion, 5th EPRI Conf. Turbine Generator Technology, 2008, Concord, pp. 1–7.
- [25] **B. Moore, A. Khazanov**, Degradation in Generator Stator Bars due to Spark Erosion and Partial Discharge Damage, 2010 IEEE Conf., pp. 1–7.
- [26] **W.H. Maudy**, Deterioration Mechanisms in Recent Air Cooled Turbine Generators, *Proc. ASME Power*, Atlanta, 2006, pp. 1–7.
- [27] **E.R. Mannanov, A.A. Stepanov, A.M. Kostelov, A.M. Andreev**, Damage analysis for slot semiconducting coatings in turbogenerator stator windings under operating stresses, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 32–43, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29203>
- [28] **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 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2023, pp.. (v pechati).
- [29] **N.A. Fedotov, T.M. Shikova, V.O. Belko, A.S. Reznik, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov**, Causes of Resistance Decrease of Corona Protection Materials in Thermal Aging Process, 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2023, pp.. DOI: (in print)
- [30] **E.R. Mannanov, A.G. Filin**, Electrical insulation thermal state of turbine generators stator windings with air-cooling, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (02) (2021) 38–49, DOI: 10.18721/JEST.27203
- [31] Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E.R. Mannanov, A.G. Filin, V.O. Belko // *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW)*, 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1193–1196. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396705
- [32] **E.R. Mannanov**, Razrabotka chislennoy modeli dlya rascheta koeffitsiyenta effektivnoy teploprovodnosti sistemy izolyatsii statornoy obmotki turbogeneratorov / Mannanov E.R. // *Sbornik robot laureatov mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye toplivno-energeticheskoy i dobyvayushchey otrasli*. 2020, S.108-114.
- [33] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, V.O. Belko, N.A. Fedotov, V.M. Govor**, "Investigation of the Thermophysical Processes in Highly Thermally Conductive Composite Material with a Complex Structure," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2022, pp. 1026–1029, DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755505

[34] **K.A. Kuchinskiy, V.A. Kramarskiy, A.V. Khudyakov**, Eksperimentalnoye issledovaniye teploobmena v aksialnykh kanalakh zubtsov serdechnika statora turbogeneratora. Pratsi In-tu yelektroinam. NAN Ukraini. 2019, N 53, s. 35–38.

[35] **A.G. Filin, V.D. Golubkov, I.A. Shishkina**, Optimizatsiya raschetnykh algoritmov opredeleniya teplovo-go sostoyaniya aktivnykh chastey turbogeneratora. Materialoved. Energ. 2021. 27, N 4, s. 5–18.

[36] **V.V. Ryzhov, P.A. Dergachev, Ye.P. Kurbatova, O.N. Molokanov, P.A. Kurbatov**, Postroyeniye trekhmer-noy teplovo-y modely statora turbogeneratora s uchetom gazodinamiki. Vestn. MEI. 2021, N 5, s. 75–82.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

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>

Alexei G. FILIN – JSC “Power machines”.

E-mail: Filin_AG@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9516-9970>

Vladimir N. ZHELEZNYAK – JSC “Power machines”.

E-mail: Zheleznyak_VN@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9499-385X>

Поступила: 04.07.2023; Одобрена: 11.09.2023; Принята: 15.09.2023.

Submitted: 04.07.2023; Approved: 11.09.2023; Accepted: 15.09.2023.