

DOI: 10.18721/JEST.27203
УДК 62-1/-9

Э.Р. Маннанов, А.Г. Филин

АО «Силовые машины»,
Санкт-Петербург, Россия

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

В рамках исследования разработаны математические модели для оценки теплового состояния системы изоляции в стержнях статорной обмотки и проведения сравнительного анализа теплофизических воздействий на состояние элементов конструкции системы изоляции в пазовой части обмотки статора, зоне выхода обмотки из паза и лобовых частях обмотки. Авторы анализируют полученные экспериментальные данные и результаты математического моделирования теплофизических процессов для конструкции изоляции, выполненной по технологиям Global VPI и Resin Rich применительно к турбогенератору с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт. В свете того, что штатный термоконтроль не предоставляет информации по среднему и максимальному перепадам температуры по толщине изоляции, максимальной температуре меди стержней обмотки статора, средней температуры на поверхности изоляции, расчетное выявление нагруженных критических зон в элементах конструкции изоляции является актуальной задачей проектирования турбогенераторов. Принятие обоснованных конструктивных решений при проектировании позволяет минимизировать локальные перегревы и повысить надежность системы изоляции.

Ключевые слова: турбогенератор, корпусная изоляция, обмотка статора, метод конечных элементов, тепловое состояние.

Ссылка при цитировании:

Маннанов Э.Р., Филин А.Г. Тепловое состояние электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49. DOI: 10.18721/JEST.27203

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E.R. Mannanov, A.G. Filin

JSC “Power machines”, Saint-Petersburg, Russia

ELECTRICAL INSULATION THERMAL STATE OF TURBINE GENERATORS STATOR WINDINGS WITH AIR-COOLING

Within the research, mathematical models were developed to evaluate the thermal state of the insulation system in the rods of the stator winding and for a comparative analysis of thermophysical effects on the state of structural elements of the insulation system at the slot part, frontal part of the stator winding and at the zone of winding exit from the slot. The authors analyze the obtained experimental data and the mathematical modeling results of thermophysical processes for the insulation structure implemented using Global VPI and Resin Rich technologies as applied to the air-cooled turbine generator with output of 225 MW. In light of the fact, the standard thermal control system does not provide information about the average and maximum temperature drops across the insulation thickness, the maximum copper temperature of the stator winding rods,

the average temperature on the insulation surface, the calculated identification of loaded critical zones in the elements of the insulation structure is a vital task in the design of turbine generators. Adopting sound design decisions minimizes local overheating and increases the insulation system reliability.

Keywords: turbine generator, main insulation, stator winding, finite element method, thermal state.

Citation:

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

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Электрическая изоляция стержней статора турбогенераторов с косвенным воздушным охлаждением отвечает двум противоречивым требованиям. С одной стороны, электрофизические свойства и толщина корпусной изоляции должны обеспечивать достаточную электрическую прочность, с другой – теплофизические свойства изоляции – высокий коэффициент теплопроводности с целью получения максимального уровня температур в обмотке в номинальном режиме машины ниже класса нагревостойкости применяемых изоляционных материалов. Конструкция системы изоляции обмотки статора представляет из себя «слоёный пирог», состоящий из внутреннего и внешнего полупроводящего покрытия, корпусной изоляции в виде пропитанных лент, нанесенных в несколько слоёв, и системы пазового уплотнения. Во многом, конструктивные особенности системы изоляции определяют технологии её производства, среди которых можно выделить известные Global VPI и Resin Rich, применяемые многими компаниями-изготовителями мощных турбогенераторов. Системы штатного термоконтроля теплового состояния обмотки статора турбогенератора зачастую не предоставляют информацию по среднему и максимальному перепадам температуры по толщине изоляции, максимальной температуре меди стержней обмотки статора, средней температуры на поверхности изоляции, поэтому расчетное определение картины температурного поля в системе изоляции является актуальной задачей проектирования турбогенераторов. Достоверное знание о локальных температурных максимумах и градиентах температур по толщине изоляции способствует принятию обоснованных конструктивных решений при проектировании, что, в свою очередь, позволяет минимизировать локальные перегревы и повысить надежность системы изоляции.

В работах [1–21] всесторонне рассматриваются вопросы, связанные исследованием сопряженных задач теплофизики и электротехники с целью создания новых систем электрической изоляции, повышения надежности системы изоляции и вращающихся электрических машин, в целом.

В рамках исследования авторы анализируют полученные экспериментальные данные и результаты математического моделирования теплофизических процессов для конструкции системы изоляции статорных обмоток турбогенератора мощностью 225МВт, выполненной по технологиям Global VPI и Resin Rich для выявления нагруженных критических зон в элементах конструкции изоляции.

Численное моделирование

Для оценки теплового состояния электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением и принятии обоснованных конструктивных решений, в настоящем исследовании рассматривается система изоляции в пазовой части статорной обмотки и системы бокового уплотнения по ширине паза для зоны выхода обмотки из паза для технологии Global VPI (см. табл. 1, рис. 1).

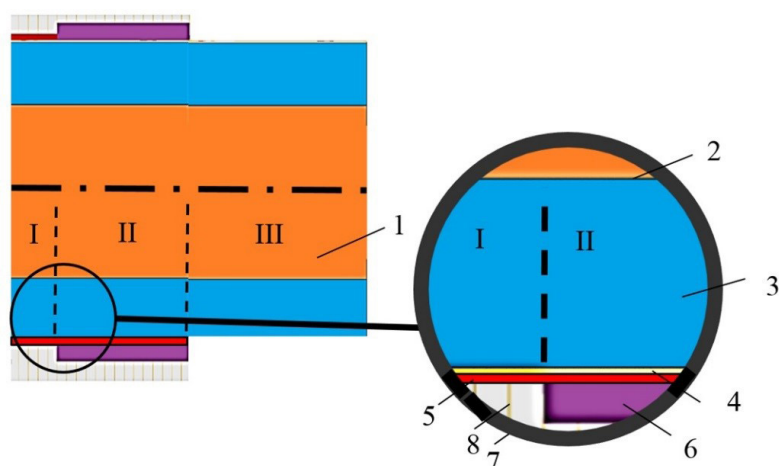


Рис. 1. Эскиз зоны выхода обмотки из паза для технологии Global VPI: I – Пазовая часть обмотки статора, II – Зона выхода обмотки из паза, III – Лобовая часть обмотки; позиции 1-8 соответствуют табл. 1
 Fig. 1. Sketch of the winding exit zone from the slot for the Global VPI technology: I – Slot part of the stator winding, II – Zone of winding exit from the slot, III – Frontal part of the winding; positions 1-8 correspond to Table 1

Таблица 1

Выкладка паза для технологии Global VPI

Table 1

Layout of the slot for Global VPI

Global VPI (Конструкция разработана)		
№	Конструктивные элементы стержня статорной обмотки и системы бокового уплотнения по ширине паза	Толщина, %
1	Ширина плетеного медного стержня	75,300
2	Внутренняя коронозащита	0,788
3	Корпусная изоляция	9,940
4	Полупроводящая лента	0,757
5	Упругая прокладка	0,788
6	Пазовая коробка	6,310
7	Сердечник (Толщина листа сердечника)	1,100
8	Клей между листами сердечника	0,095
9	Ширина стержня	98,300
10	Ширина паза	100

Принимая во внимание высокую актуальность работ по модернизации системы изоляции с целью повышения надежности турбогенераторов с воздушным охлаждением, в данной работе разработана выкладка система изоляции для конструкции турбогенератора мощностью 225 МВт, реализованной по технологии Resin Rich с применением системы коронозащиты на ленточных материалах (см. табл. 2, рис. 2).

Учитывая решаемые задачи, требуется выполнить тепловой расчет для пазовой части, выхода обмотки из паза и лобовой части статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт применительно к технологиям Global VPI и Resin Rich для различных вариантов конструкции в номинальном режиме работы, а также произвести сравнительную оценку данных технологий изготовления обмотки.

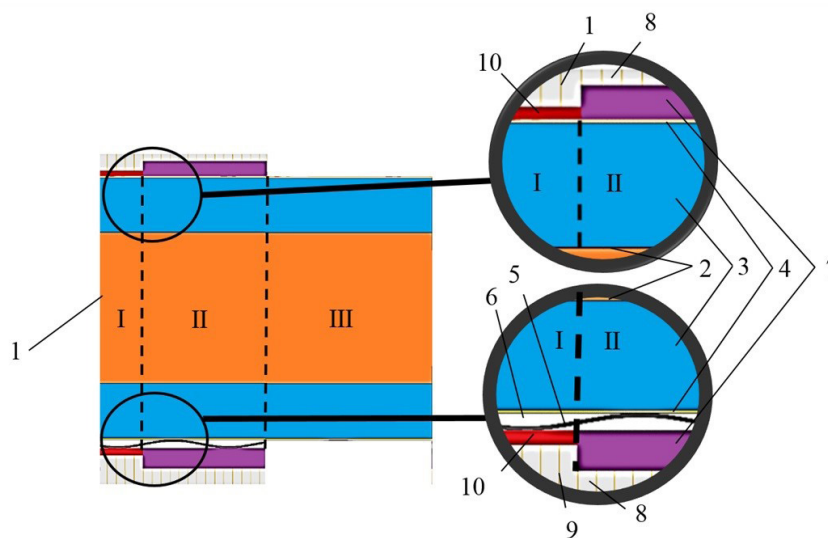


Рис. 2. Эскиз зоны выхода обмотки из паза для технологии Resin Rich: I – Пазовая часть обмотки статора, II – Зона выхода обмотки из паза, III – Лобовая часть обмотки; Позиции 1-10 соответствуют табл. 2
 Fig. 2. Sketch of the winding exit zone from the slot for the Resin Rich technology: I – Slot part of the stator winding, II – Zone of winding exit from the slot, III – Frontal part of the winding; positions 1-10 correspond to Table 2

Таблица 2

Выкладка паза для технологии Resin Rich

Table 2

Layout of the slot for Resin Rich

Resin Rich (Пазовое уплотнение с одной стороны)		
№	Конструктивные элементы стержня статорной обмотки и системы бокового уплотнения по ширине паза	Толщина, %
1	Ширина плетеного медного стержня	75,300
2	Внутренняя коронозащита	0,788
3	Высокотеплопроводная корпусная изоляция	10,380
4	Внешняя коронозащита	0,315
5	Гофрированная прокладка	1,260
6	Воздушный зазор	0,310
7	Пазовая коробка	6,310
8	Сердечник	1,100
9	(Толщина листа сердечника)	0,095
10	Клей (между листами сердечника)	0,130
11	Ширина стержня	98,300
12	Ширина паза	100

Особенности конструкции торцевой зоны статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт:

- зубцовая зона удерживается от распушевки нажимными пальцами, формирующие дополнительно радиальные вентиляционные каналы. Кроме того, для предотвращения распушевки

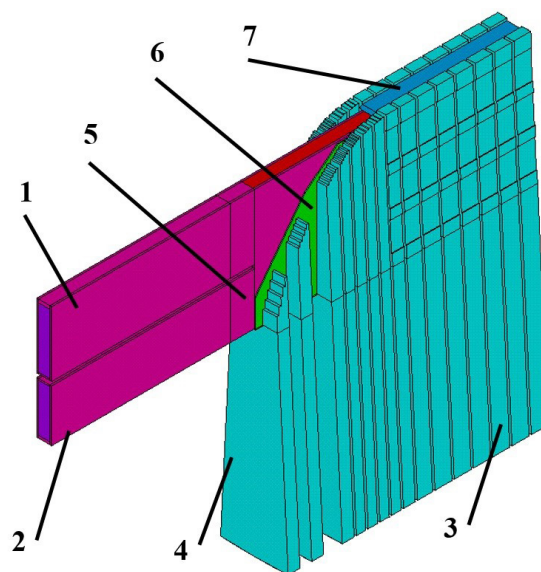


Рис. 3. Модель статора турбогенератора в лобовой части, выходе обмотки из паза и в пазовой части в пакете ANSYS: 1 – верхний стержень обмотки статора; 2 – нижний стержень обмотки статора; 3 – основные пакеты сердечника статора; 4 – торцевые пакеты сердечника статора; 5 – поверхность, закрытая замазкой, расположенной между соседними стержнями в месте выхода обмотки статора из паза; 6 – изоляционная коробка; 7 – клин пазовый

Fig. 3. Stator model of the turbine generator in the frontal part, the winding exit zone from the slot and in the slot part in ANSYS: 1 – upper bar of the stator winding; 2 – the lower bar of the stator winding; 3 – main packages of the stator core; 4 – end packages of the stator core; 5 – a surface covered with a putty located between adjacent bars at the zone of winding exit from the slot; 6 – insulating box; 7 – slot wedge

активной стали в торцевых зонах, а также для улучшения формы поля в зазоре в торцевых зонах крайние пакеты выполняют ступенчатыми;

- при выходе из паза стержни скрепляются замазкой;
- в паз на длине скошенных пакетов вкладывается пазовая коробка из изоляционного материала с целью предотвращения механических повреждений корпусной изоляции стержней при укладке.

В качестве расчётной программы для теплового расчета выбран пакет ANSYS. Исходными данными для его проведения служат результаты электромагнитного (тепловыделения) и вентиляционного (распределение расходов и скоростей воздуха в каналах) расчетов. Последний произведен посредством вентиляционной схемы замещения. Принимаются следующие допущения расчетной геометрической модели:

- в силу тепловой симметрии расчетная область ограничена плоскостями симметрии зубца в тангенциальном направлении, а также 8-ю основными пакетами сердечника статора в аксиальном направлении;
- стержни статора при выходе из паза искусственно спрямлены, так как это не оказывает влияния на результаты теплового расчета, но при этом упрощает построение геометрической модели.

Значения теплопроводности материалов системы изоляции были определены посредством разработанной авторами методики и программного обеспечения, учитывающих изоляцию стержней статора, пазовое уплотнение и ступенчатость стенки паза [1].

Модель статора турбогенератора в месте выхода обмотки из паза в пакете ANSYS представлена на рис. 3. Модель пазовой части активной зоны, включающая сердечник и обмотку статора, была верифицирована посредством эксперимента, проведенного на испытательном стенде в косвен-

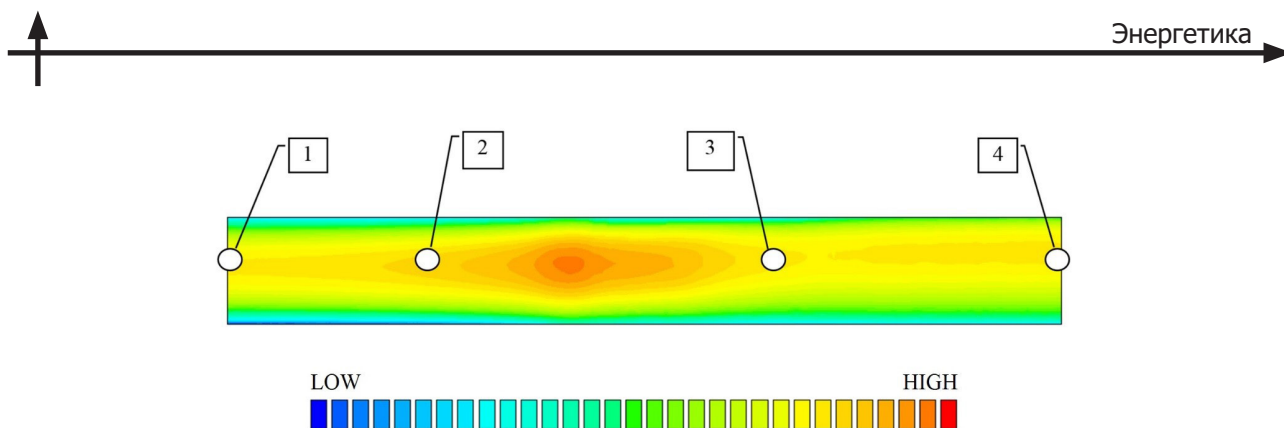


Рис. 4. Картина температурного поля меди проводников верхнего стержня турбогенератора, с указанием положения закладки оптоволоконных датчиков температуры: 1 – замеры в лобовой части, 2 – замеры на стыке пазовой и лобовой части, 3 – замеры в месте выхода обмотки из паза, 4 – замеры в пазовой части

Fig. 4. Temperature distribution in the copper conductors of the upper bar of the turbine generator with an indication of the position of fiber-optic temperature sensors insertion: 1 – measurements in the frontal part, 2 – measurements at the junction of the slot and frontal parts, 3 – measurements at the zone of winding exit from the slot, 4 – slot part

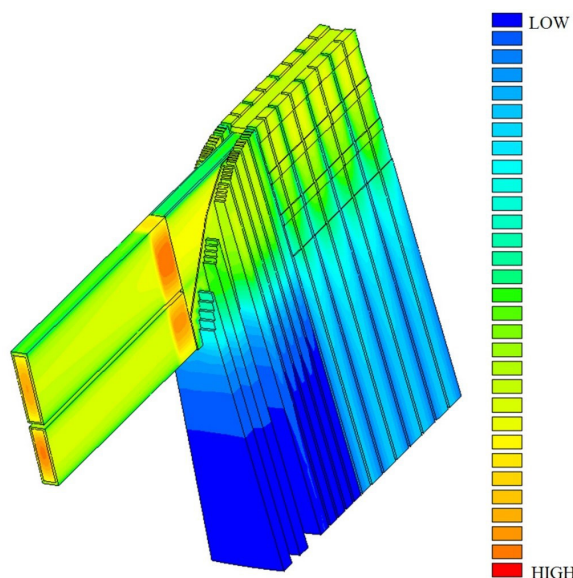


Рис. 5. Картина температурного поля в зоне выхода обмотки из паза

Fig. 5. Temperature distribution in the zone of the winding exit from the slot

ном режиме работы машины (режим короткого замыкания), по результатам которого было установлено расхождение опытных и расчетных данных 1 % [1].

Основное условие сопоставления двух технологий изготовления системы изоляции – сохранение электромагнитных нагрузок в обмотке и сердечнике статора посредством сохранения геометрических размеров медных проводников обмотки статора и геометрии паза. При этом, для технологии Resin Rich разработана выкладка паза с применением системы коронозащиты на ленточных материалах (см. табл. 2).

На рис. 4 проиллюстрирована картина температурного поля гомогенизированной среды, моделирующей медные проводники верхнего стержня, применительно к технологии Global VPI.

На рис. 5 представлена картина температурного поля обмотки и сердечника статора в зоне выхода обмотки из паза.

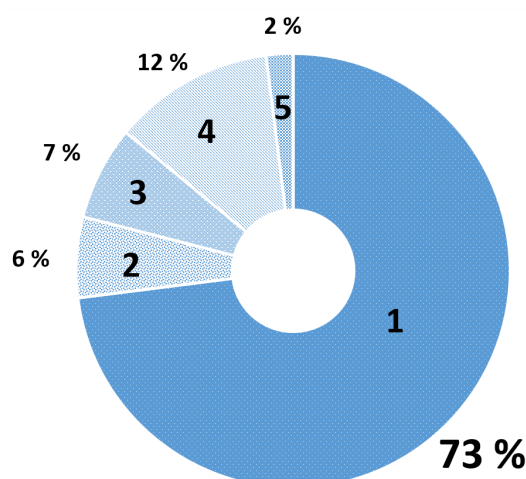


Рис. 6. Вклад элементов конструкции в термическое сопротивление системы изоляции, %:
 1 – корпусная изоляция; 2 – ступенчатый паз статора; 3 – воздушный зазор;
 4 – гофрированная прокладка; 5 – коронозащитное покрытие

Fig. 6. Contribution of structural elements to the thermal resistance of the insulation system, %:
 1 – main insulation; 2 – stepped slot wall; 3 – air gap; 4 – ripple spring; 5 – corona protecting layer

Полученная картина температурного поля для исследуемой области позволяет вычислить средний и максимальный перепад температуры по толщине изоляции на расчетных участках: пазовая, лобовая части и место выхода обмотки из паза; максимальную температуру меди верхнего и нижнего стержня обмотки статора, среднюю температуру на поверхности изоляции.

Уровень средних перепадов температур по толщине изоляции для технологий Resin Rich и Global VPI на расчетных участках обмотки статора на 20 % ниже возможной границы зоны риска появления расслоений в изоляции [1–5].

На рис. 6 приведена расчетная оценка вклада элементов конструкции в термическое сопротивление системы изоляции обмотки статора турбогенератора с воздушным охлаждением для технологии Resin Rich.

Снижение уровня нагрева обмотки статора и уменьшение перепадов температур по толщине корпусной изоляции наиболее эффективно за счет повышения теплопроводности корпусной изоляции [5–17].

Анализ экспериментальных и расчетных данных

Экспериментальное исследование теплового состояния обмотки статора турбогенератора мощностью 225 МВт с воздушным охлаждением производилось посредством штатного температурного контроля, а также дополнительного оснащения машины оптоволоконными термодатчиками. На рис. 7 изображена принципиальная схема расположения оптоволоконных датчиков в верхнем стержне обмотки статора по длине, а также штатного термосопротивления.

Место расположения оптоволоконного датчика, штатного термосопротивления, а также термомпары, регистрирующей температуру зубца сердечника статора, в поперечном сечении верхнего стержня статора схематично изображено на рис. 8.

В табл. 3 сведен анализ расчетных данных и результатов эксперимента по определению теплового состояния верхних стержней (где ожидаются наибольшие температуры) обмотки статора турбогенератора мощностью 225 МВт с воздушным охлаждением посредством оптоволоконных датчиков, находящихся под корпусной изоляцией стержней применительно к технологии изготовления Global VPI.

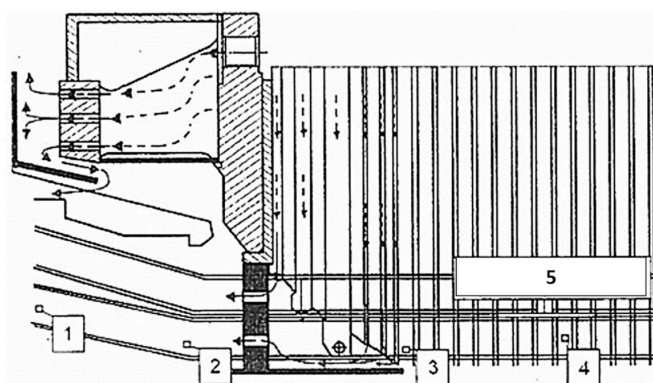


Рис. 7. Схема расположения оптоволоконных датчиков в верхнем стержне обмотки статора по длине: 1 – лобовая часть, 2 – граница пазовой и лобовой частей, 3 – вблизи скоса крайних пакетов, 4 – верхний стержень по меди 1/3 по высоте. Поз. 5 – штатное

Fig. 7. Layout of fiber-optic sensors in the upper rod of the stator winding along the length: 1 – the frontal part, 2 – the border of the slot and frontal parts, 3 – near the bevel of the extreme packages, 4 – the upper rod 1/3 in height. Pos. 5 – standard thermal resistance thermometer

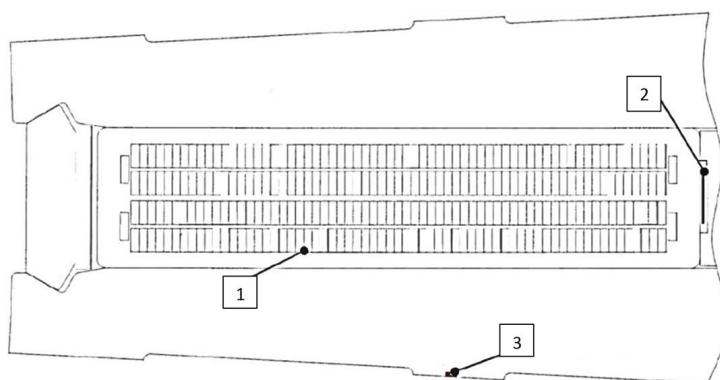


Рис. 8. Схема расположения температурных датчиков в пазовой зоне статора турбогенератора: 1 – оптоволоконный датчик, 2 – термометр сопротивления, 3 – термопара

Fig. 8. Layout of temperature sensors in the slot part of the turbine generator stator: 1 – fiber-optic sensor, 2 – standard thermal resistance thermometer, 3 – thermocouple

Таблица 3

Анализ расчетных данных и результатов эксперимента

Table 3

Analysis of calculated data and experimental results

Участок обмотки статора	Температура расчетная по отношению к замеренной, %
Верхний стержень по меди 1/3 по высоте	89,3
Вблизи скоса крайних пакетов	86,2
Граница пазовой и лобовой частей	97,7
Лобовая часть	92,2

Представленное выше расхождение расчетных и опытных данных объясняется условиями проведения натуральных испытаний: с пониженным расходом в статорном контуре охлаждения, вызванным вынужденными изменениями в узлах вентиляционного тракта машины, а также расположением вентиляционных распорок в каналах зубцов основных пакетов. Дополнительно требует более детальной проработки вопрос распределения добавочных потерь в обмотке статора в зоне выхода обмотки из паза.

Результаты рассчитанного теплового состояния системы изоляции, изготовленной по технологии Resin Rich с применением системы коронозащиты на ленточных материалах, выполнены в свете модернизации системы изоляции с целью повышения надежности турбогенераторов с воздушным охлаждением по разработанной авторами конструкции системы изоляции для турбогенератора мощностью 225 МВт и сведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительный анализ расчетных данных

Table 4

Comparative analysis of calculated data

Участок обмотки статора	Средний перепад температуры по толщине системы изоляции Resin Rich по отношению к расчетной Global VPI, %
Верхний стержень по меди 1/3 по высоте	109,6
Граница пазовой и лобовой частей	112,3

Как можно заметить из таблицы 4, наличие воздуха в системе бокового уплотнения стержней в пазовой части статора по причине применения гофрированных прокладок снижает эквивалентный коэффициент теплопроводности системы изоляции, находящейся на пути основного теплового потока от проводников обмотки к поверхности охлаждающих каналов, что несущественно ухудшает тепловое состояние изоляции, изготовленной по технологии Resin Rich.

Заключение

В настоящей работе произведено математическое моделирование теплового состояния обмотки статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт для конструкции изоляции, выполненной по технологии Global VPI, и варианта конструкции для технологии Resin Rich с ленточными полупроводящими покрытиями. По результатам произведенных расчетов следует заключить:

- 1) При переходе на технологию Resin Rich для системы коронозащиты на ленточных материалах тепловое состояние обмотки статора в сравнении с технологией Global VPI ухудшается несущественно, что обусловлено увеличением перепада температуры по толщине системы изоляции вследствие наличия низкотеплопроводного воздуха в боковом уплотнении посредством гофрированной прокладки;
- 2) Уровень средних перепадов температур по толщине изоляции для технологий Resin Rich и Global VPI в лобовых частях, в зоне выхода из паза и в пазовая части обмотки статора не превышает возможной границы зоны риска появления расслоений в изоляции;
- 3) Исходя из уровня расчетных и замеренных значений температур в системе изоляции, включая наружные полупроводящие покрытия, для обеспечения её работоспособности требуется применение электроизоляционных материалов класса нагревостойкости F;
- 4) Основная возможность снижения уровня нагрева обмотки статора заключается в уменьшении перепадов температур по толщине корпусной изоляции, что наиболее эффективно осуществляется за счет повышения теплопроводности корпусной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] 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 NW Russia. – 2021. – pp. 1193–1196. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396705

[2] The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A.S. Reznik, I.O. Ivanov, T.M. Shikova, A.M. Andreev, E.R. Mannanov // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1228–1231. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396613

[3] Андреев А.М., Дубицкий С.Д., Муравьева Т.Н., Шикова Т.М. Моделирование теплофизических свойств электрической изоляции со стохастической геометрией расчетной области // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2016. № 4. С. 89–97. DOI 10.5862/JEST.254.10

[4] Степанов В.В., Петреня Ю.К., Андреев А.М., Костельов А.М., Маннанов Э.Р., Талалов В.А. Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408

[5] Азизов А.Ш., Андреев А.М., Костельов А.М., Поликарпов Ю.И. Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением // Электротехника № 3, 2009, С. 26–28.

[6] Reine B., Di-Tomaso J., Dusserre G., Olivier P.A. Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.

[7] Шевчук Р.Э., Гаев А.В. Разработка и обоснование модели материала изоляции шин статора турбогенератора // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 118–121.

[8] Гаев А.В., Шевчук Р.Э. Расчетно-экспериментальная методика анализа и оценки вибрационного состояния токоведущих элементов электрических машин с композитной изоляцией // Надежность и безопасность энергетики. М.: «НПО Энергобезопасность», № 4 (35), 2016. С. 60–65.

[9] Mishra D., Satapathy A. A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.

[10] Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song. Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y

[11] Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon. Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.

[12] Патент CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Номер заявки: CN201610838317 20160920 Дата публикации: 2017-02-01.

[13] Raju L. Epoxy Resin Rich System for Electrical Machines // 16th Electrical/Electronics Insulation Conference, October 1983. pp. 430–438.

[14] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H. Electric Insulation for Rotating Machines // Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004, pp. 137–179.

[15] Jin H., Tsekmes I.A., Wu J., Mor A.R., Smit J. The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites // International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017, pp. 141–143.

[16] **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 // In the collection: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2019. 2019. P. 800–802. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657272

[17] **Toshikatsu T.** Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. – P. 914–928.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

ФИЛИН Алексей Григорьевич – руководитель группы, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: Filin_AG@power-m.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 16.04.2021

REFERENCES

[1] 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 (EIConRus-NW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1193–1196, DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396705

[2] The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A.S. Reznik, I.O. Ivanov, T.M. Shikova, A.M. Andreev, E.R. Mannanov // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1228–1231, DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396613

[3] **A.M. Andreyev, S.D. Dubitskiy, T.N. Muravyeva, T.M. Shikova**, Modelirovaniye teplofizicheskikh svoystv elektricheskoy izolyatsii so stokhasticheskoy geometriyey raschetnoy oblasti // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskkiye nauki. 2016. № 4. S. 89–97. DOI: 10.5862/JEST.254.10

[4] **V.V. Stepanov, Yu.K. Petrenya, A.M. Andreyev, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov, V.A. Talalov**, Vliyaniye svoystv komponentov na effektivnuyu teploprovodnost polimernykh kompozitnykh materialov // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskkiye nauki. 2018. T. 11. № 4. S. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408

[5] **A.Sh. Azizov, A.M. Andreyev, A.M. Kostelov, Yu.I. Polikarpov**, Teploprovodnost sistemy izolyatsii statornoy obmotki moshchnykh turbogeneratorov s vozdushnym okhlazhdeniyem // Elektrotehnika № 3, 2009, S. 26–28.

[6] **B. Reine, J. Di-Tomaso, G. Dusserre, P.A. Olivier**, Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.

[7] **R.E. Shevchuk, A.V. Gayev**, Razrabotka i obosnovaniye modeli materiala izolyatsii shin statora turbogeneratora // Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Institut prikladnoy matematiki i mekhaniki. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2016. Pp. 118–121.

[8] **A.V. Gayev, R.E. Shevchuk**, Raschetno-eksperimentalnaya metodika analiza i otsenki vibratsionnogo sostoyaniya tokovedushchikh elementov elektricheskikh mashin s kompozitnoy izolyatsiyey // Nadezhnost i bezopasnost energetiki. M.: «NPO Energobezopasnost», № 4 (35), 2016. Pp. 60–65.

- [9] **D. Mishra, A. Satapathy**, A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.
- [10] **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song**, Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y
- [11] **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon**, Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.
- [12] Patent CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Nomer zayavki: CN201610838317 20160920 Data publikatsii: 2017-02-01.
- [13] **L. Raju**, Epoxy Resin Rich System for Electrical Machines // 16th Electrical/Electronics Insulation Conference, October 1983. pp. 430–438.
- [14] **G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani**, Electric Insulation for Rotating Machines // Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004, pp. 137–179.
- [15] **H. Jin, I.A. Tsekmes, J. Wu, A.R. Mor, J. Smit**, The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites // International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017, pp. 141–143.
- [16] **V.O. Belko, Y.K. Petrenya, A.M. Andreev, A.M. Kosteliyov, M.B. Roitgarz**, Numerical simulation of discharge activity in hv rotating machine insulation // In the collection: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2019. 2019. P. 800–802. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657272
- [17] **T. Toshikatsu**, Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. P. 914–928.

THE AUTHORS

MANNANOV Emil R. – JSC “Power machines”.
E-mail: emil-mannanov@mail.ru

FILIN Aleksey G. – JSC “Power machines”.
E-mail: Filin_AG@power-m.ru

Received: 16.04.2021