

DOI 10.5862/JEST.254.10

УДК 621.3.048.015

А.М. Андреев, С.Д. Дубицкий, Т.Н. Муравьева, Т.М. Шикова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

A.M. Andreev, S.D. Dubitsky, T.N. Muravjova, T.M. Shikova

SIMULATION OF THE THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF AN INSULATION SYSTEM WITH STOCHASTIC GEOMETRY OF THE CALCULATED AREA

Рассмотрены вопросы расчета теплопроводности пазового уплотнения статорной обмотки мощных электрических машин с косвенным охлаждением. Разработана методика расчета теплопроводности статорного паза с учетом геометрических факторов (ширина газового зазора, неоднородность стенки статорного паза) и величины теплопроводности материалов корпусной изоляции и уплотнителя. Установлено, что величина расчетной теплопроводности статорного паза в первую очередь определяется теплопроводностью материала корпусной изоляции, а теплопроводность материалов уплотнительных волнообразных прокладок практически не оказывает влияния на эту величину. Определены граничные интервалы изменения величины расчетной теплопроводности статорного паза, уплотненного упругой волнообразной прокладкой для стандартной и высокотеплопроводной корпусной изоляции; они могут быть использованы при расчете и конструировании системы электрической изоляции мощных турбогенераторов с косвенным охлаждением.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА; СТАТОРНЫЙ ПАЗ; ПРОКЛАДКА; ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ; ИЗОЛЯЦИЯ.

The paper considers the problems of calculating the thermal conductivity of stator slot wedging of power electrical machines. A method for calculating the effective thermal conductivity of a stator slot with geometric factors is presented. The boundary values of the effective thermal conductivity of the stator slot of power electrical machines for different variants of stator sealing and thermal conductivity values of groundwall insulation materials and slot wedging were found. It was established that the value of the effective thermal conductivity of the stator slot is primarily determined by the thermal conductivity of the insulation material, and the thermal conductivity of the sealing spacer materials has practically no influence on this value.

ELECTRICAL MACHINE; STATOR SLOT; WEDGING MATERIAL; THERMAL CONDUCTIVITY; INSULATION.

Введение

Повышение мощности турбогенераторов с косвенным охлаждением может быть достигнуто применением систем электрической изоляции с повышенной теплопроводностью. Это связано с тем, что мощность турбогенераторов в основном ограничивается предельно допустимым током

обмотки статора, при этом тепло, генерируемое в проводниках, передается через систему изоляции, являющуюся тепловым барьером, т.к. значения коэффициентов теплопроводности λ слюдосодержащей корпусной изоляции и материалов пазового уплотнения во много раз меньше λ материалов проводников (медь) и сердечника

статора (сталь). Сопутствующий рост температуры в системе изоляции неизбежно приведет к нарушению теплового баланса и преждевременному ее разрушению по механизму теплового пробоя. Поэтому одним из основных способов увеличения удельной мощности электрических машин является улучшение теплопередачи за счет применения материалов с повышенным значением λ , а также оптимизации конструкции системы изоляции статорной обмотки.

За счет применения методов химической модификации изоляционных композиций [1–3] значительно (более чем в два раза) повышена теплопроводность материалов корпусной изоляции. Однако, наряду с теплопроводностью материалов корпусной изоляции, на теплопроводность системы изоляции статорной обмотки оказывают влияние материалы, применяемые в пазу статора для уплотнения стержней, а также качество этого уплотнения.

В мировой практике широко распространен способ пазового уплотнения [4–8] с использованием упругих волнообразных прокладок из электропроводящего стеклотекстолита (рис. 1). Этот способ оказался надежным в части подавления вибрации стержней и предотвращения чрезвычайно опасных для системы изоляции явлений вибрационного искрения [9–11] и пазовых частичных разрядов [12, 13]. Это, с одной стороны, привело к повышению надежности системы корпусной изоляции, с другой, – к снижению эффективности теплопередачи за счет неизбежного наличия остаточных газовых включений в межфазных зонах «стенка паза – прокладка» и «корпусная изоляция – прокладка».

Результаты количественной оценки эффективности теплопередачи пазового уплотнения чрезвычайно важны для оптимального выбора материалов системы изоляции статорной обмотки различных типов мощных электрических машин.

Однако такая оценка до настоящего времени практически не проводилась по причине невозможности экспериментального определения теплопроводности этих систем, а также отсутствия методики расчета.

Нашей задачей была разработка методики расчета теплопроводности статорного паза (пространства от медного проводника стержня до стальной стенки паза) и количественная оценка

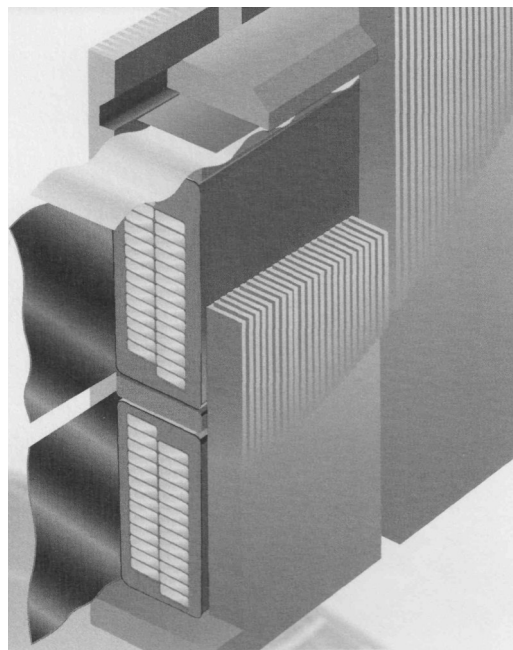


Рис. 1. Система пазового уплотнения, выполненная с использованием гибких волнообразных электропроводящих прокладок

эффективного коэффициента теплопроводности статорного паза с учетом допустимых значений теплопроводности материалов корпусной изоляции и пазового уплотнения, а также геометрических размеров статорного паза.

Расчетная часть

Расчет теплопроводности статорного паза основан на моделировании теплового поля между проводником стержня и стенкой паза для установившегося теплового режима методом конечных элементов. Эта задача имеет трансляционную симметрию, т. е. никакая физическая величина не зависит от пространственной координаты Z (вдоль оси машины). В этих условиях стационарное двумерное уравнение теплопроводности в декартовых координатах записывается так:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q, \quad (1)$$

где λ_x, λ_y – компоненты тензора теплопроводности; T – температура; q – объемная плотность источника тепловыделения.

Уравнение (1) имеет общий вид, включающий объемный источник тепла и возможную зависимость теплопроводности от температуры.

В рассматриваемом расчетном случае теплопроводность не зависит от направления ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda$) и температуры, а объемный источник тепла отсутствует ($q = 0$).

В расчетной практике удобно пользоваться приведенной величиной теплопроводности, равной отношению теплового потока через боковую поверхность стержня к разности температур меди стержня и стали статора и к площади сечения стержня:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\Phi}{(T_{\text{медь}} - T_{\text{сталь}}) w h}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{экв}}$ — эквивалентная теплопроводность изоляции с уплотнением; $T_{\text{медь}}$, $T_{\text{сталь}}$ — температуры соответственно поверхности проводниковой меди и стенки стального сердечника; w , h — высота и ширина боковой поверхности стержня.

Конкретные значения граничных температур в этом случае выбираются любыми, поскольку в силу линейности задачи тепловой поток пропорционален разности температур, а эквивалентная удельная теплопроводность, равная отношению теплового потока к разности температур, останется неизменной. Выполнив расчет температурного поля, можно вычислить тепловой поток Φ от медных проводников к стальной стенке паза. Для этого достаточно провести линию, параллельную стенкам паза, и вычислить поток вектора градиента температуры, умноженного на теплопроводность, через указанный контур:

$$\Phi = \int_S \lambda \operatorname{grad} T ds. \quad (3)$$

Для вычисления теплопроводности статорного паза достаточно подставить полученное значение теплового потока Φ в уравнение (2). Для конечно-элементного моделирования статорного паза использовалась программа ELCUT [14] (правообладатель — ООО «Тор», Санкт-Петербург, свидетельство о регистрации в Роспатенте № 2002610850), а для автоматизации серии расчетов в различных вариантах — специально разработанная программа автоматизации расчетов теплопроводности пазового уплотнения.

При использовании программы ELCUT моделирование температурного поля включает следующие этапы:

1. Построение геометрической модели расчетной области. Геометрическая модель вклю-

чает в себя двумерное сечение расчетной области, состоящее из отрезков, дуг и ограниченных ими областей.

2. Генерация сетки конечных элементов.

3. Решение и визуальный анализ результатов.

Помимо обычного способа взаимодействия с программой посредством меню, графических окон и других интерактивных инструментов, ELCUT предоставляет программный интерфейс ActiveField. Он дает возможность быстрой разработки специализированных программ для многократного решения частных задач в широком диапазоне варьирования геометрических и физических параметров статорного паза. Основное допущение, сделанное при расчете, — замена конвективного теплообмена в газовых включениях на эквивалентную теплопроводность. Расчет теплопроводности непроточной газовой прослойки по формулам для твердой стенки — общепринятый прием [15]. При разных температурах стенок прослойки возникают замкнутые циркуляционные токи газа. Расчет теплопередачи ведется путем замены конвективного теплообмена кондуктивным с использованием эквивалентной теплопроводности, равной действительной теплопроводности газа λ при средней температуре прослойки, умноженной на коэффициент ϵ_k , учитывающий влияние конвекции. В упомянутом справочнике приводятся эмпирические формулы для расчета коэффициента ϵ_k в зависимости от геометрии прослойки и критериев параметров газа (Pr и Gr).

Для демонстрации разработанного расчетного метода на рис. 2 представлены результаты расчета теплового поля для простого варианта уплотнения — волнообразной прокладки, контактирующей с гладкой стенкой статорного паза.

Более сложная картина распределения теплового поля (рис. 3) наблюдается для случая контакта волнообразной уплотнительной прокладки с реальной поверхностью статорного паза, которая представляет собой ступенчатую структуру, где горизонтальные координаты торцов отдельных листов распределены по нормальному закону с медианой, равной номинальному положению стенки паза, и средним квадратичным отклонением, равным половине толщины единичного стального листа (0,25 мм).

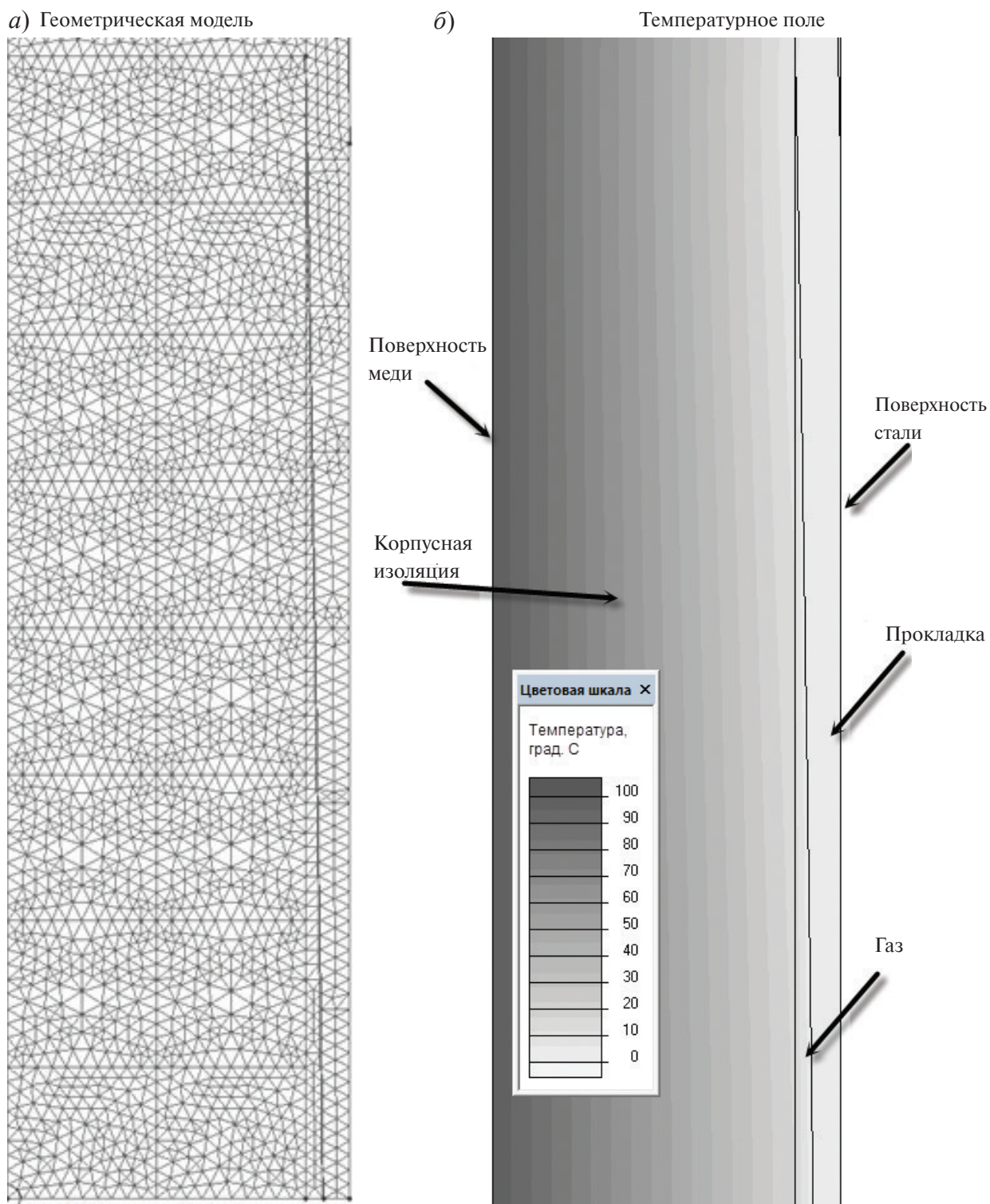


Рис. 2. Геометрическая модель (*a*) и температурное поле (*б*) варианта статорного уплотнения волнообразной прокладкой, контактирующей с гладкой поверхностью статорного паза

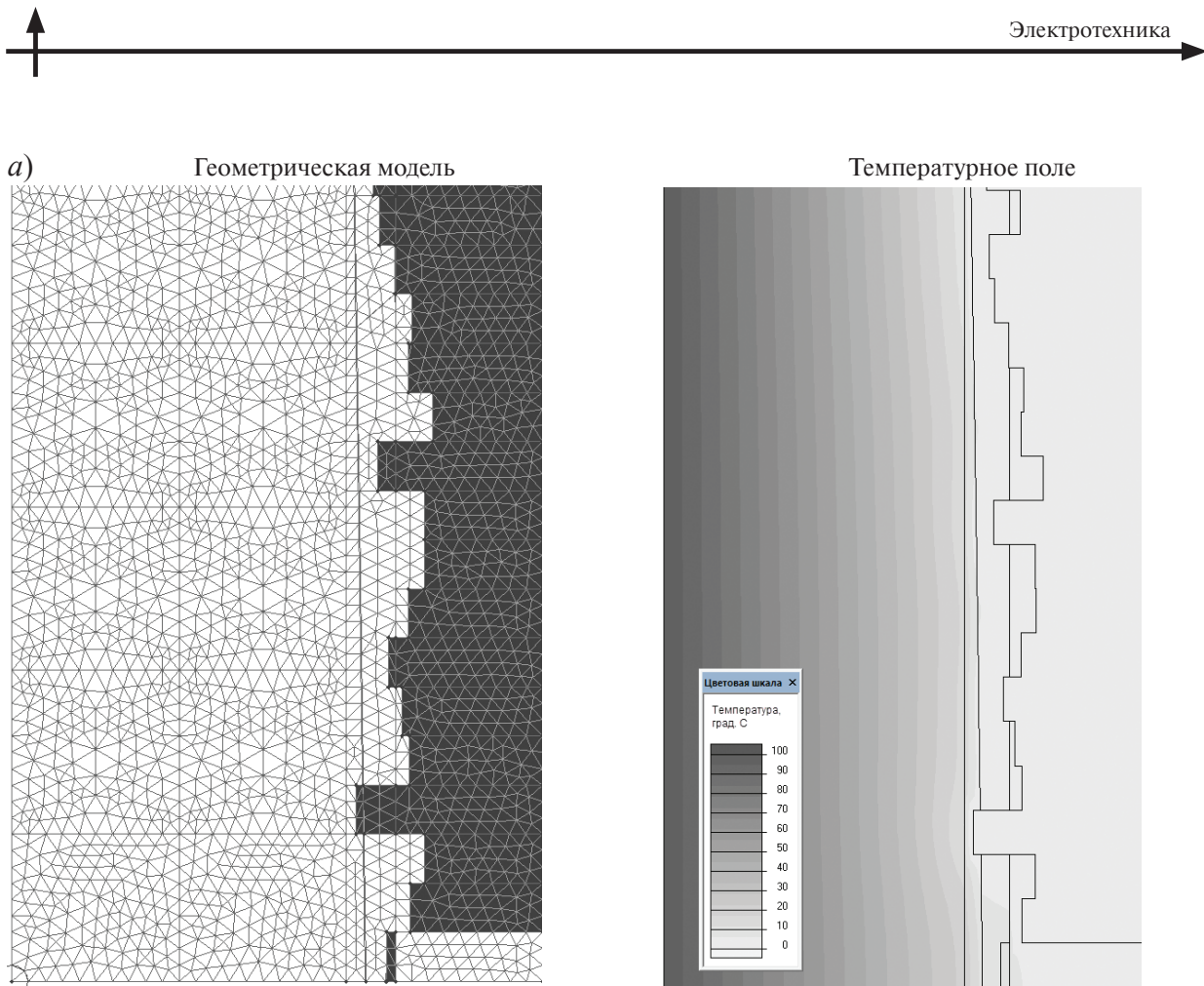


Рис. 3. Геометрическая модель (а) и температурное поле (б) варианта статорного уплотнения волнообразной прокладкой, контактирующей с реальной поверхностью статорного паза (обозначения аналогичны рис. 2)

Такой профиль связан с неизбежными технологическими погрешностями, возникающими при штамповке листов и сборке сердечника статора. Моделирование реального профиля стенки паза (рис. 3, а) проводилось путем вычисления горизонтальных координат торцов каждого листа статора, для чего использовался программный генератор псевдослучайных чисел, распределенных по нормальному закону. Как видно, профиль реальной стенки приводит к тому, что изомеры не параллельны стенкам паза (рис. 3, б), поэтому необходимое усреднение проводилось в процессе интегрирования теплового потока по формуле (1).

Расчет теплопроводности статорного паза проводился для различных геометрических размеров и теплофизических характеристик материалов корпусной изоляции и элементов уплотнения. Для всех расчетных вариантов односторонняя толщина корпусной изоляции составляла 3,4 мм, для стандартной изоляции величина λ выбиралась

равной $0,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, для высокотеплопроводной изоляции — $0,55 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Величина пазового зазора (расстояние от внешней поверхности корпусной изоляции до поверхности статорного паза) при расчетах выбиралась в диапазоне от 0,5 до 1,0 мм. Выбор толщины упругой волнообразной прокладки производился из условия, чтобы во всех расчетных вариантах остаточный зазор между стенкой паза и стержнем под гребнем волны после уплотнения не должен превышать 0,2 мм. Величина λ материала пазового уплотнения изменялась в пределах от 0,4 до $1,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Для волнообразной прокладки учитывался ряд дополнительных геометрических параметров, а именно: шаг волны (50 мм) и полуширина зоны контакта волнистой прокладки со стенкой паза (12 мм). В качестве газового заполнения паза использовался водород ($\lambda = 0,18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), как наиболее распространенная газовая среда, используемая для охлаждения статорной обмотки мощных электрических машин.



Рис. 4. Распределение расчетной теплопроводности статорного паза со ступенчатой поверхностью стенки для фиксированных значений теплопроводности корпусной изоляции ($\lambda_{\text{изол}} = 0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) и материала волнообразной прокладки ($\lambda_{\text{прок}} = 0,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$). Газовая среда – водород

На рис. 4 в качестве наглядного примера приведены результаты расчета теплопроводности статорного паза с реальной (ступенчатая) поверхностью при уплотнении упругой волнообразной прокладкой (толщиной 0,5 мм и $\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) стержня со стандартной корпусной изоляцией ($\lambda = 0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$).

Как видно, для случайно выбранных координатных значений (50 вариантов) ступенчатой поверхности стенки статорного паза выборка расчетных значений теплопроводности может быть аппроксимирована нормальным законом распределения. Разброс вычисленных значений теплопроводности статорного паза незначителен (не превышает 2–3%) для всех исследованных расчетных вариантов, различающихся геометрическими и теплофизическими параметрами корпусной изоляции и уплотнительного материала. Очевидно, что наблюдаемый статистический разброс теплопроводности статорного паза обусловлен, с одной стороны, случайными изменениями объема остаточных газовых включений, с другой, — появлением точечных контактов с низким тепловым сопротивлением в местах касания индивидуальных листов статорного пакета с уплотняющей прокладкой.

На рис. 5 приведены зависимости расчетной теплопроводности статорного паза с уложенным стержнем, уплотненным упругой волнообразной прокладкой, от теплопроводности ее материала. Расчет проводился для стержней со стандартной (графики 1, 1') и высокотеплопроводной (графики 2, 2') корпусной изоляцией с использованием программного генератора псевдослучайных чисел, имитирующего ступенчатый рельеф стенки статорного паза (графики 1, 2), и по схеме последовательного сопротивления уплотнительной прокладки и газового промежутка фиксированной толщины (0,2 мм) (графики 1', 2').

Как следует из представленных данных, величина расчетной теплопроводности статорного паза увеличивается с ростом теплопроводности материалов корпусной изоляции и уплотнителя. При этом следует отметить, что это влияние не равноценно. Максимально влияет на теплопроводность статорного паза материал корпусной изоляции. Увеличение теплопроводности изоляционного материала приводит к соответствующему росту расчетной теплопроводности паза. Теплопроводность же материала уплотнительной прокладки практически не влияет на величину расчетной теплопроводности статорного паза при значениях λ материала прокладки, превышающих 0,8 Вт/(м·К).

Аналогичный характер зависимостей теплопроводности статорного паза от коэффициентов теплопроводности материалов корпусной изоляции и уплотнительной прокладки наблюдается и при расчете по схеме последовательного соединения прокладки и газового промежутка, однако в этом случае расчетные значения теплопроводности статорного паза значительно ниже. Особенно наглядно эта тенденция проявляется для высокотеплопроводной корпусной изоляции (по сравнению со стандартной корпусной изоляцией снижение теплопроводности достигает 10%). Необходимо, однако, учитывать, что в реальных условиях реализация такого варианта уплотнения стержня в статорном пазу маловероятна ввиду того, что конфигурация уплотнительной волнообразной прокладки в сжатом состоянии обеспечивает значительную зону ее плотного контакта с боковой поверхностью паза; кроме того, может наблюдаться рост точечных тепловых контактов в местах неоднородности стенки.

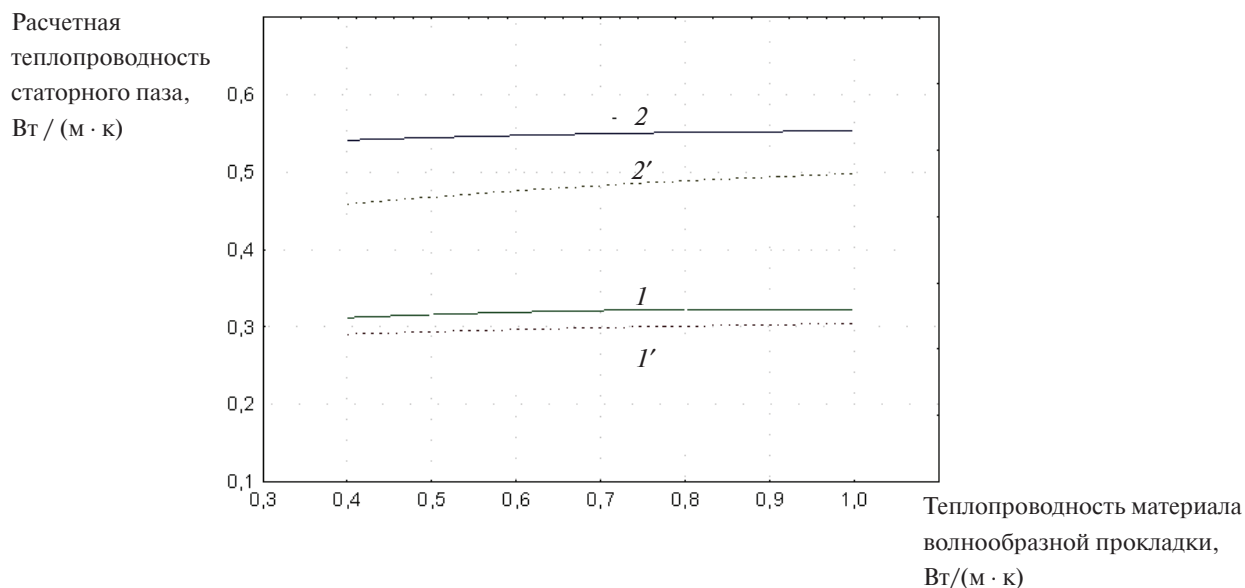


Рис. 5. Зависимости расчетной теплопроводности статорного паза от теплопроводности материала волнообразной прокладки при разных значениях теплопроводности корпусной изоляции: $I, I' - 0,3$ Вт/(м·К); $2, 2' - 0,55$ Вт/(м·К) для ступенчатой поверхности паза: $I, 2$ – расчет с использованием программного генератора псевдослучайных чисел, распределенных по нормальному закону; $I', 2'$ – расчет по схеме последовательного соединения прокладки и газового промежутка

Следовательно, изображенные на рис. 5 области между графиками I и I' , а также 2 и $2'$ могут определять граничные интервалы расчетной теплопроводности статорного паза в случае уплотнения в нем волнистой уплотнительной прокладкой стержней с высокотеплопроводной и стандартной корпусной изоляцией.

Выводы

Рассчитаны значения теплопроводности статорного паза, имеющего геометрическую конфигурацию и размеры, характерные для реальной конструкции электрической машины рабочим напряжением выше 11 кВ с водородным охлаждением, стержнями с высокотеплопроводной ($\lambda_{из} = 0,55$ Вт/(м·К)) и стандартной ($\lambda_{из} = 0,3$ Вт/(м·К)) корпусной изоляцией, уплотненных упругими волнообразными электропроводящими

прокладками с теплопроводностью, изменяющейся в пределах от 0,4 до 1,0 Вт/(м·К).

Установлено, что величина теплопроводности статорного паза в первую очередь определяется теплопроводностью материала корпусной изоляции стержня, а теплопроводность материала уплотнительных волнообразных прокладок практически не оказывает влияния на эту величину при значениях превышающих 0,8 Вт/(м·К).

Определены максимальные значения расчетной теплопроводности статорного паза уплотненного упругой волнообразной прокладкой для стандартной (0,32 Вт/(м·К)) и высокотеплопроводной корпусной изоляции стержней (0,56 Вт/(м·К)), которые могут быть использованы при расчете и конструировании системы электрической изоляции статорных обмоток мощных турбогенераторов с водородным охлаждением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тари М. Система высоковольтной изоляции для турбогенераторов с увеличенной теплопроводностью // Тр. IV Межд. симпозиума Элмаш. М., 2002. С. 102–104.
2. Fukushima K. [et al]. High Thermal Conductive Epoxy Resins with Controlled High Order Structure // Annual Report Conf. on Elec. Insul. and Diel. Phenom. 2004. P. 340–343.
3. Перминов В.Л. Испытания изоляции «Монолит – 2» на макете статора турбогенератора ТАГ-12 / Межд. Симпозиум Элмаш-2002. М., 2002. С. 67–70.
4. Miller M.L. Turbine Generator Stator Slot Thermal Conductivity // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings. Oct. 2005. P. 93–96.

5. **Zötsch W.** Andritz Generator Design // Generator Forum. Oslo. 13th October 2009. — 13p.

6. **Zhou Y.X. [et al].** Improvement in Electrical, Thermal and Mechanical Properties of Epoxy by Filling Carbon Nanotube // EXPRESS Polymer Letters. 2008. Vol. 2. № 1. P. 40–48.

7. **Coleman J.N., Khan U., Blau W.J., Gunko Y.K.** Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites // Carbon. 2006. Vol. 44. № 9. P. 162–165.

8. **Cherney E.A.** Silicone Rubber Dielectrics Modified by Inorganic Fillers for Outdoor High Voltage Insulation Applications // IEEE Transaction on Diel. and Elec. Insul. 2005. Vol. 12, № 6. P. 1108–1116.

9. **Stone G.C. [et al].** Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators // IEEE Elec. Insul. Magazine. 2008. Vol. 24. № 5. P.14–21.

10. **Liese M., Brown M.** Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking on High Voltage Winding // IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul. 2008. Vol. 15. № 4. P. 927–932.

11. **Xia Y. [et al].** Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots // IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul. 2013. Vol. 29. № 1. P. 42–53.

12. **Hudon C. [et al].** Study of Slot Partial Discharges in Air-cooled Generators// IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul. 2008. Vol. 15. № 6. P. 1675–1690.

13. **Hudon C. [et al].** Effect of Surface Degradation on Slot Partial Discharge Activity // IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul. 2010. Vol. 17. № 5. P. 1428–1440.

14. **Дубицкий С.Д., Ильина О.Я.** Возможности программного комплекса ELCUT для моделирования и анализа тепловых характеристик// Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ». 30 ноября – 2 декабря 2010 г.: Сборник трудов конференции. СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. С. 290–301.

15. **Кутателадзе С.С., Боришанский В.М.** Справочник по теплопередаче. М.: Госэнергоиздат, 1958. 414 с.

REFERENCES

1. **Tari M.** Sistema vysokovoltnoy izolyatsii dlya turbogeneratorov s uvelichennoy teploprovodnostyu. *Tr. IV Mezhd. simpoziuma Elmash.* M., 2002. S. 102–104 (rus).

2. **Fukushima K. [et al].** High Thermal Conductive Epoxy Resins with Controlled High Order Structure. *2004-Annual Report Conf. on Elec. Insul. and Diel. Phenom.* P. 340–343.

3. **Perminov V.L.** Ispytaniya izolyatsii «Monolit – 2» na makete statora turbogenerators TAG-12. *Mezhd. Simpozium Elmash-2002.* M., 2002. P. 67–70 (rus).

4. **Miller M.L.** Turbine Generator Stator Slot Thermal Conductivity. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo-2005. Proceedings.* Oct. 2005. P. 93–96.

5. **Zötsch W.** Andritz Generator Design. *Generator Forum.* Oslo. 13th October 2009. 13 p.

6. **Zhou Y.X. [et al].** Improvement in Electrical, Thermal and Mechanical Properties of Epoxy by Filling Carbon Nanotube. *EXPRESS Polymer Letters.* Vol. 2. № 1. 2008. P. 40–48.

7. **Coleman J.N., Khan U., Blau W.J., Gunko Y.K.** Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. *Carbon.* 2006. Vol. 44. № 9. P. 162–165.

8. **Cherney E.A.** Silicone Rubber Dielectrics Modified by Inorganic Fillers for Outdoor High Voltage Insulation Applications. *IEEE Transaction on Diel. and Elec. Insul.* 2005. Vol. 12. № 6. P. 1108–1116.

9. **Stone G.C. [et al].** Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators. *IEEE Elec. Insul. Magazine.* 2008, Vol. 24. № 5. P.14–21.

10. **Liese M., Brown M.** Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking on High Voltage Winding. *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.* 2008. Vol. 15. № 4. P. 927–932.

11. **Xia Y. [et al].** Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots. *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.* 2013. Vol. 29. № 1. P.42–53.

12. **Hudon C. [et al].** Study of Slot Partial Discharges in Air-cooled Generators. *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.* 2008. Vol. 15. № 6. P.1675–1690.

13. **Dubitskiy S.D., Ilina O.Ya.** Vozmozhnosti programmnogo kompleksa ELCUT dlya modelirovaniya i analiza teplovykh kharakteristik. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennyye metody i sredstva issledovaniya teplofizicheskikh svoystv veshchestv».* 30 noyabrya – 2 dekabrya 2010 g.: *Sbornik trudov konferentsii.* SPb.: SPbGUNiPT, 2010. P. 290–301 (rus).

14. **Hudon C. [et al].** Effect of Surface Degradation on Slot Partial Discharge Activity. *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.* 2010. Vol. 17. № 5. P. 1428–1440.

15. **Kutateladze S.S., Borishanskiy V.M.** Spravochnik po teploperedache. M.: Gosenergoizdat, 1958. 414 s. (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

АНДРЕЕВ Александр Михайлович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: alexandre1949@Yahoo.com

ANDREEV Aleksandr M. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: alexandre1949@Yahoo.com

ДУБИЦКИЙ Семен Давидович – директор ООО «Тор».

190013 Санкт-Петербург, Московский пр. 22, лит. Т.

E-mail: sdubitsky@gmail.com

DUBITSKY Semen D. – Tor, Ltd..

22 lit. T, Moskovsky pr, St. Petersburg, 190013.

E-mail: sdubitsky@gmail.com

МУРАВЬЕВА Татьяна Николаевна – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: tmuravl@mail.ru

MURAVJOVA Tatiana N. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: tmuravl@mail.ru

ШИКОВА Татьяна Михайловна – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: tshikova@mail.ru

SHIKOVA Tatiana M. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: tshikova@mail.ru