

**А. В. Третьяк**, канд. техн. наук

ГП «Завод «Электротяжмаш»,  
Национальный аэрокосмиче-  
ский университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
г. Харьков, Украина  
e-mail: [alex3tretjak@ukr.net](mailto:alex3tretjak@ukr.net)

УДК 621.313.322-82

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АППАРАТА ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛЕЙ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

*Проведен детальный анализ конструкции аппарата щеткодержателей для турбогенераторов мощностью от 200 до 600 МВт. Показаны основные причины повреждений и определены пути развития и усовершенствования существующей конструкции. Выполнен анализ методик расчета тепловыделений, обусловленных разными факторами по своей природе. Показана возможность выполнения трехмерного расчета с использованием результатов аналитического расчета совместно с методом CFD. Впервые выполнен расчет и разработана методика для определения теплового состояния аппарата щеткодержателей для турбогенераторов большой и средней мощности в трехмерной постановке.*

**Ключевые слова:** аппарат щеткодержателей, тепловое состояние, трехмерное моделирование.

### Введение

В настоящее время происходит пересмотр существующих методик проектирования и расчетов электрических машин. Наиболее интересным и сложным в проектировании является аппарат щеткодержателей (ЩКА). Важной особенностью является то, что при проектировании и тепловом расчете приходится решать тепловую задачу с тремя типами тепловыделений: электрические потери в классической постановке, трение щеток о контактное кольцо и добавочные потери, вызванные действием «паразитных» токов. В работах [1]–[3] изложены основные методы расчета и проектирования электрических машин схожих типов, однако они не дают возможность восстановить действительную картину теплового состояния аппарата щеткодержателей в трехмерном виде. В связи с этим для удовлетворения требований надежности и эксплуатации необходимо пересмотреть существующие методики, для реализации решения в программных комплексах методами CFD.

Целью работы является создание методики по определению теплового состояния аппарата щеткодержателей в трехмерной постановке, с учетом тепловыделений, вызванных электрическими и механическими воздействиями.

### Описание и конструкция аппарата щеткодержателя

Щеточно-контактный аппарат (ЩКА) представляет собой узел, обеспечивающий подачу постоянного тока от неподвижных токоведущих частей цепи возбуждения к вращающейся обмотке возбуждения ротора генератора посредством скользящего контакта.

Траверса ЩКА включает в себя щеткодержатели и укомплектована щетками скользящего контакта. Количество щеток, установленных на каждом полюсе щеточно-контактного аппарата, определяется величиной максимального тока возбуждения обмотки ротора и допустимым током щеток.

В объем поставки оборудования обычно входят один щеточно-контактный аппарат и комплект запасных частей, включающих в себя щеткодержатели и электрические щетки (при необходимости).

Технические требования, предъявляемые к ЩКА, следующие:

- обеспечение равномерного расположения щеток по поверхности контактного кольца, а также одинаковое усилие нажатия всех щеток на всем протяжении их функционирования;
- оснащение быстроръемными брукатами с применением МС-буксы;
- использование двух клеммных панелей для подсоединения шинпровода возбуждения (по 3 наконечника на каждый полюс);
- шины траверс должны обеспечивать токопередачу номинального тока возбуждения и иметь коррозионно стойкое покрытие;
- щетки должны быть установлены на контактном кольце со смещением (в «шахматном» порядке);

© А. В. Третьяк, 2018

- должны быть предусмотрены места под установку изолированной щетки на каждой полярности;
- схема вентиляции должна быть разомкнутой;
- забор охлаждающего воздуха должен осуществляться из машинного зала, через корпус ЩКА с выбросом в машинный зал.

На рис. 1 представлен общий вид турбогенератора мощностью 200 МВт производства ГП «Завод «Электротяжмаш» с аппаратом щеткодержателей.



Рис. 1. Общий вид турбогенератора

В табл. 1 приведен перечень турбогенераторов различных мощностей, изготавливаемых на Украине и за рубежом, на которых в настоящий момент фирма «MERSEN» (Франция) поставила проработанные варианты модернизаций щеточно-контактного аппарата.

Таблица 1. Турбогенераторы (ТГ) с ЩКА

Тип ТГ	Производитель ТГ	Размер диаметра контактных колец, мм	Ток, А	Примечание
ТВФ-63	ЭЛСИБ, Электросила	463	1350	открытый тип ЩКА, без вентиляции
ТВФ-110	ЭЛСИБ, Электросила	463	1750	открытый тип ЩКА, без вентиляции
ТВФ-63	ЭЛСИБ, Электросила	320	1350	закрытый тип ЩКА, вентилятор между полюсов
ТВФ-110	ЭЛСИБ, Электросила	320	1750	закрытый тип ЩКА, вентилятор между полюсов
ТЗФП-110	Электросила	320	2000	закрытый тип ЩКА, вентилятор между полюсов
ТЗФП-160	Электросила	320	2000	закрытый тип ЩКА, вентилятор между полюсов
ТВВ-220	Электросила	460	2750	открытый тип ЩКА, без вентиляции
ТГВ-200	ГП «Завод «Электротяжмаш»	450	2100	закрытый тип, вентилятор на конце вала
ТВВ-320	Электросила	460	2750	закрытый тип, вентилятор по краям полюсов
ТВВ-800	Электросила	400	3850	закрытый тип ЩКА, вентилятор между полюсов

### Системы контроля

Для обеспечения оптимального температурного состояния всей системы, во избежание аварийных ситуаций I и II категорий, устанавливаются тепловые системы автоматического контроля состояния ЩКА.

Абсолютная погрешность устройства проверяется методом сравнения его показаний с показаниями контрольных мостов постоянного тока, подключаемых к термообразователям сопротивления вме-

сто штатного устройства. Отклонение измеренных значений разницы температур воздуха не должно быть более  $\pm 1$  °С.

На ЩКА турбогенераторов серии ТГВ устанавливаются датчики температуры холодного и горячего воздуха ТСМ-0879-01.

На турбогенераторах мощностью 63 МВт и выше применяются униполярные электрощетки марки ЭГ4 или монополярные электрощетки марок 6110М на положительном полюсе и ЭГ2АФ на отрицательном полюсе. Краткие физико-технические характеристики этих электрощеток соответствуют техническим условиям ИЛЕА 685211.037 ТУ [4].

Регулирование и контроль усилий нажатия на электрощетки проводятся косвенным методом по степени сжатия пружины.

В работе [5] представлена статистика причин отказа работы турбогенератора, одна четвертая которых составляет отказ щеточно-контактного аппарата (см. рис. 2). Это говорит о том, что явления, происходящие при работе ЩКА, довольно сложны и мало изучены.

Основными причинами отказов ЩКА являются:

- круговой огонь;
- нагрев контактных колец выше предельно допустимого значения;
- неравномерный износ щёток;
- местный бой;
- вибрация и сколы щёток;
- сопротивление изоляции ниже предельно допустимого значения.



Рис. 2. Статистика отказов работы

### Методы расчета теплового состояния аппарата щеткодержателя

Основным материалом, из которого изготавливаются щетки, является LFC 554. Этот материал состоит из натурального, искусственного графита и угольной смолы. Для получения хорошей консистенции данная смесь запекается в печи при 1000°С, полученный материал имеет легкую структуру, небольшую плотность и относительно низкое сопротивление.

Физические характеристики материала: плотность – 1,25 г/см<sup>3</sup>, сопротивление – 2,000 мкОм, сила на изгиб – 10 МПа.

На рис. 3 показано, что при эксплуатации одного и того же ЩКА электрические и тепловые характеристики будут изменяться в зависимости от технического состояния щеток. Таким образом, тепловой расчет должен обеспечивать надежную работу при достаточно продолжительном сроке эксплуатации щеток. При этом снижение напряжения должно быть незначительным, чтобы избежать перегрева и аномальных электрических потерь, которые могут повредить скользящему контакту и повлиять на распределение тока между щетками.

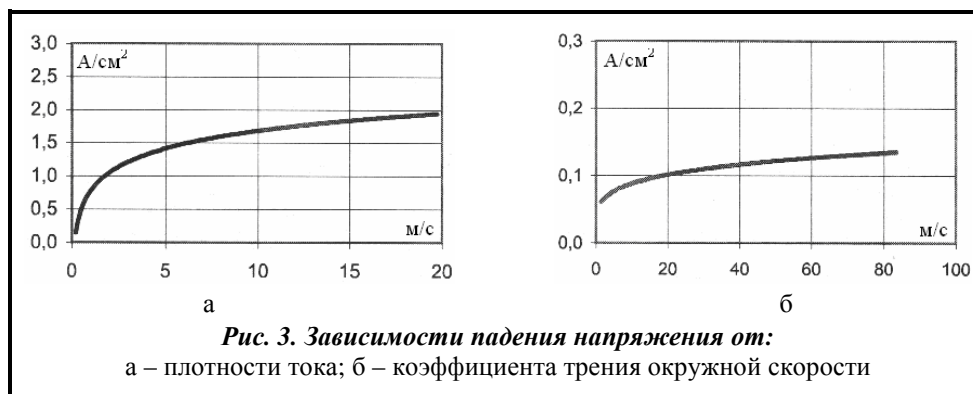


Рис. 3. Зависимости падения напряжения от:  
а – плотности тока; б – коэффициента трения окружной скорости

Рассмотрим приведенную схему расчета контакта щеток аппарата щеткодержателей (см. рис. 4). Эта важная характеристика зависит от класса угольной щетки, электрического контакта и пленки.

Последняя представляет собой сложную смесь оксидов металла, углерода и воды, нанесенных на кольцо скольжения или коммутатор. Отсюда следует вывод, что на качество снижения контакта влияют следующие факторы:

– температура, давление и влажность окружающей среды;

– загрязняющие примеси;

– скорость скольжения;

– давление воздействия на щетки;

– ток.

В табл. 2 приведены типичные значения снижения контакта, полученные в конкретных условиях эксплуатации щеток «Mersen». Данные указаны для каждого из типов щеток и сгруппированы в пять категорий: от «крайнего низкого» до «высокого».

Таблица 2. Значения падения контакта и коэффициента трения

Обозначение	Величина	Падение контакта	Коэффициент трения $\mu$
Е	Значительно	$> 3 \text{ V}$	$\mu > 0.20$
М	Среднее	$2.3 \text{ V} - 3 \text{ V}$	$0.12 < \mu < 0.20$
В	Низкое	$1.4 \text{ V} - 2.3 \text{ V}$	$\mu < 0.12$
ТВ	Очень низкое	$0.5 \text{ V} - 1.4 \text{ V}$	–
ЕВ	Чрезвычайно низкое	$< 0.5 \text{ V}$	–

Для работы углеродной щетки без перегрева необходимо, чтобы ее коэффициент трения  $\mu$  был низким и неизменным с течением времени. Этот коэффициент не имеет постоянного значения и является результатом многих факторов (см. рис. 5), зависящих от качества углерода щетки, скорости вращения ротора, условий работы коллектора и условий окружающей среды. Износ щеток производится по методике ГОСТ 9506.7-74 и составляет не более 0,4–0,6 мм, что определяет величину коэффициента трения.

Для представленного значения типов щеток невозможно задать точное значение  $\mu$ , а только приблизительный диапазон разброса значений. Однако этого достаточно для большинства численных расчетов или проектов.

Проблема аналитического решения задачи расчета нестационарного температурного поля в области микроконтакта рассматривалась в работе [6]. При создании имитационной модели электрофрикционного взаимодействия решалась задача нестационарной теплопередачи для каждого контактного элемента переходной поверхности пятна. На рис. 6 представлена схема для определения пятна микроконтакта.

С использованием среды COMSOL Multiphysics авторами разработана нестационарная трёхмерная модель электрического микроконтакта (см. рис. 7) и представлены результаты численного эксперимента, показавшие принципиальную возможность построения многофакторной модели.

Однако в настоящее время данная задача может быть решена лишь для частного случая и не может быть распространена на весь аппарат щеткодержателей.

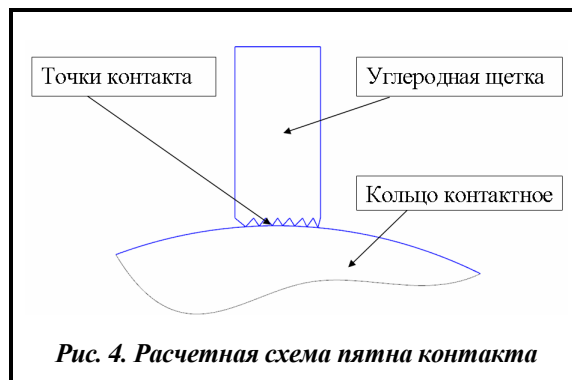


Рис. 4. Расчетная схема пятна контакта

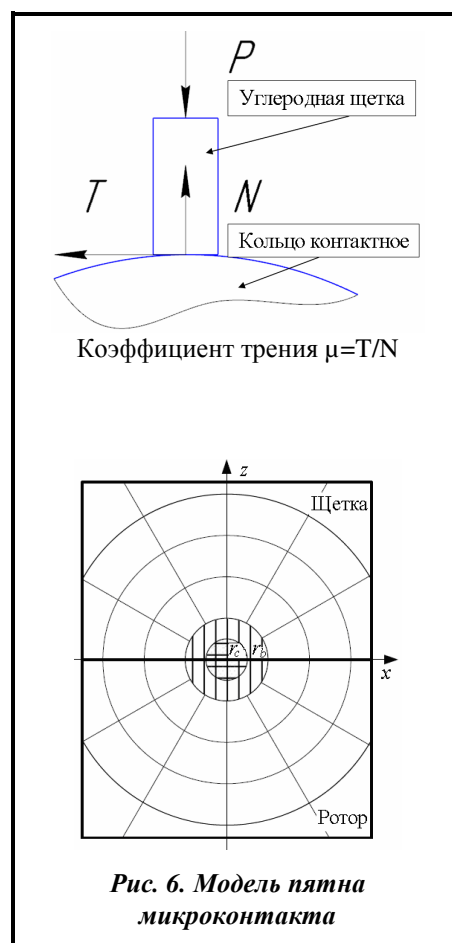


Рис. 6. Модель пятна микроконтакта



Решение задачи определения теплового состояния аппарата ЩКА выполнялось в несколько этапов:

1. Определение тепловыделений.
2. Определение напорных характеристик нагнетателя.
3. Разработка трехмерной модели.
4. Расчет теплового состояния.

Расчетное удельное сопротивление меди составило  $1,75 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а удельное сопротивление стали  $1,3 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

Тепловыделение, вызванное трением щеток о контактное кольцо, 10050 Вт. Расчет выполнялся по методике [6].

Расчет напорной характеристики вентилятора выполнялся аналитическим методом по [7, 8].

Расчетные параметры центробежного вентилятора:

- статический напор вентилятора 1800 Па,
- номинальный расход воздуха  $2,26 \text{ м}^3/\text{с}$ ,
- скорость воздуха на входе в вентилятор 23 м/с,
- скорость воздуха на выходе из улитки вентилятора 65 м/с.

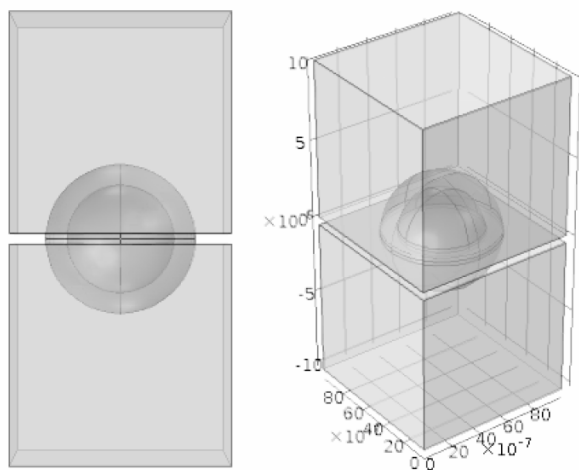


Рис. 7. Трёхмерная модель микроконтакта в COMSOL

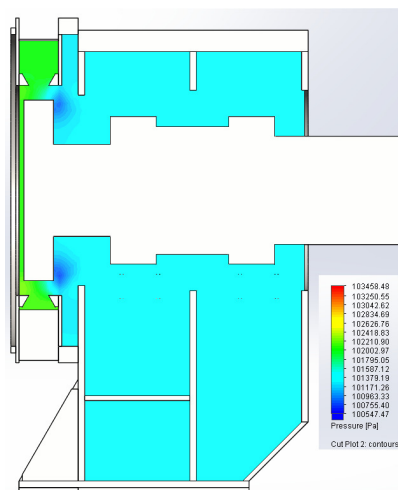


Рис. 8. Эпюра давлений охлаждающего воздуха на установившемся режиме работы

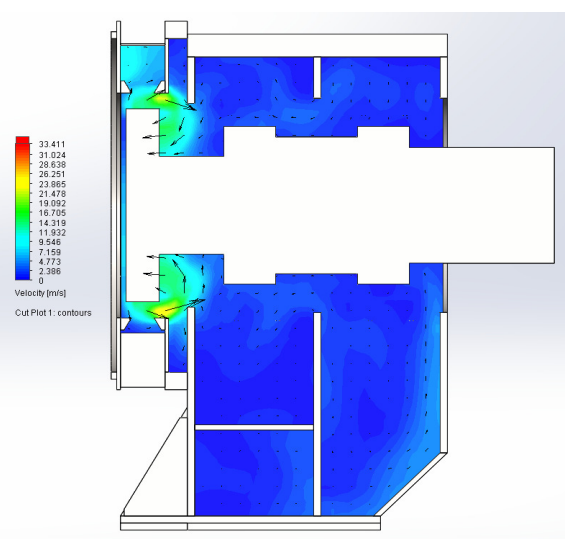


Рис. 9. Эпюра скоростей охлаждающего воздуха на установившемся режиме работы

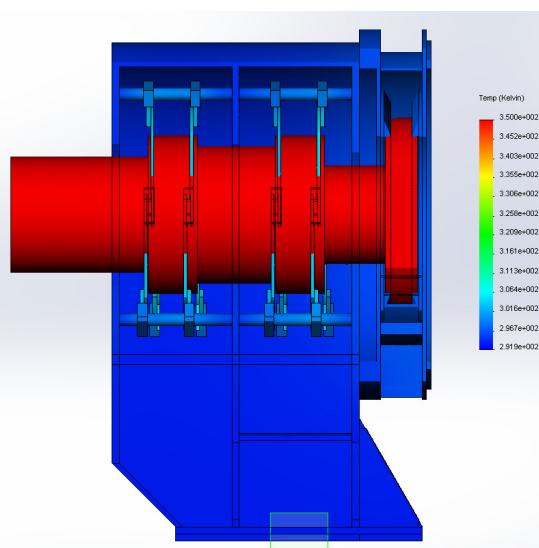


Рис. 10. Эпюра температур на установившемся режиме работы

Расчет теплового состояния аппарата щеткодержателя выполнялся в трехмерной постановке с помощью пакета твердотельного моделирования Solid Works Flow Simulation.

Программный комплекс SolidWorks содержит прикладной модуль Flow Simulation, который позволяет выполнять численное моделирование внутренних и внешних обтеканий жидкостями или газами. Для моделирования течения используется решение уравнений Навье-Стокса для движения вязкой жидкости в трехмерной постановке, осредненных по Рейнольдсу и дополненных  $k$ - $\epsilon$ -моделью турбулентности. Достаточная точность данного модуля позволяет применять его для решения большинства инженерных задач. Основные методы и описание математического аппарата, используемого в SolidWorks FlowSimulation, представлены в [9].

Моделирование движения воздуха в корпусе гидрогенератора выполнялось при стандартных настройках детализации расчетной сетки с дополнительным сгущением в узких каналах. Такие настройки позволяют с достаточной точностью определить особенности течения, обусловленные сложностью точной части.

В качестве критериев сходимости решения были выбраны следующие значения по объему: минимальное, среднее и максимальное статическое давление, средний массовый расход; на указанных поверхностях – осредненный тепловой поток. Расчет выполнялся до достижения критерия сходимости и при исполнении не менее трех продувок расчетной области.

На рис. 8 – 10 представлены эпюры давлений, скоростей охлаждающего воздуха и температур на установившемся режиме работы турбогенератора мощностью 200 МВт для номинального режима работы. Поток внутри аппарата ЩКА является турбулентным. Зоны запираания отсутствуют.

Значения температур, полученные в результате моделирования теплового состояния ЩКА в среде SolidWorks FlowSimulation, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к вновь проектируемым электрическим машинам. Расчетная погрешность не превышает измерительную, что позволяет производить оценку работоспособности ЩКА на этапах проектирования, а полученные значения не превышают предельно допустимых температур согласно ГОСТ 183-74 для коллекторов и контактных колец.

### Заключение

Впервые решена задача определения теплового состояния аппарата щеткодержателя в трехмерной постановке. Предложено совмещение аналитического метода расчета с решением в трехмерной постановке с помощью программного комплекса SolidWorks FlowSimulation.

Разработана методика по определению теплового состояния аппарата щеткодержателей в трехмерной постановке, с учетом тепловыделений, вызванных электрическими и механическими воздействиями. Расчет проводится на основании совмещения трехмерного решения методом CFD и аналитического решения тепловой задачи. Данная методика апробирована на аппаратах щеткодержателей турбогенераторов производства ГП «Завод «Электротяжмаш» серий ТГВ мощностью 200 и 300 МВт соответственно.

### Литература

1. Хуторецкий Г. М., Токов М. И., Толвинская Е. В. Проектирование турбогенераторов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 255 с.
2. Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. М.: Гос. энерг. изд-во, 1958. 426 с.
3. Данилевич Я. Б., Кашарский. Э. Г. Добавочные потери в электрических машинах. М.: Гос. энерг. изд-во, 1963. 214 с.
4. ТУ 16 - ИЛЕА.685211.037ТУ-88.
5. Самородов Ю. Н. Дефекты и неисправности генераторов. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2005. 100 с.
6. Ильин А. В. Плохов И. В., Козырева О. И., Андрусич А. В. Трехмерное моделирование нестационарного температурного поля в микроконтакте. *Вестн. Псков. ун-та. Сер. Эконом. и техн. науки.* 2014. Т. 2. № 5. С. 208–214.
7. Морозов А. Г. Расчет электрических машин постоянного тока: учеб пособие для втузов. изд 2-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1977. 264 с.
8. Бак О. Проектирование и расчет вентиляторов. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горному делу, 1961. 363 с.
9. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.

Поступила в редакцию 08.05.2018