

УДК 621.313.8

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ВЕТРОГЕНЕРАТОРЕ ТОРЦЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Ю.Б. КАЗАКОВ, д-р техн. наук, В.П. ШИШКИН, канд. техн. наук, Д.С. КОРНИЛОВ, асп.

Приведено описание торцевого магнитоэлектрического генератора оригинальной конструкции, предназначенного для работы в составе ветроэнергетических установок малой мощности. Представлены результаты исследования тепловых и аэродинамических процессов в генераторе, проведенного с использованием созданных цепных и конечно-элементных моделей.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, торцевой генератор, беспазовый сердечник, кольцевая обмотка якоря, постоянные магниты, тепловой расчет, моделирование условий охлаждения.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR TEMPERATURE FIELDS CALCULATION IN WIND-POWERED AXIAL FLUX GENERATOR

Yu.B. KAZAKOV, Doctor of Engineering, V.P. SHISHKIN, Candidate of Engineering, D.S. KORNILOV, Post Graduate Student.

The description of the front magnet electric generator of the original construction for work in low power wind-energetic units is represented. Research results of thermal and aerodynamic processes in the generator, carried out with the usage of the developed chain and finite-element models are presented.

Keywords: wind-energetic unit, front generator, slotless core, toroidal-winding of anchor, permanent magnets, heat calculation, simulation of cooling conditions.

Для ветроэнергетических установок небольшой мощности (1,5–10 кВт) разработана методика проектирования торцевых синхронных генераторов (ТСГ) [1]. Торцевая конструкция электрических машин зачастую обеспечивает меньшие массогабаритные показатели, конструктивную совместимость с механизмом, удобство эксплуатации и сборки. Выполнены электромагнитные расчеты ТСГ разных мощностей и частот вращения.

Завершающей стадией разработки ТСГ является проведение исследований теплового состояния и условий охлаждения. При тепловом расчете возникает необходимость совместного решения уравнений, описывающих распределение температуры стенок теплообмена и температуры теплоносителя. Распределения плотностей тепловых потоков на поверхностях охлаждаемых частей электрической машины зависят от распределений температур стенок и теплоносителя, которые сами определяются плотностями тепловых потоков в машине. ТСГ, по сравнению с цилиндрическими машинами, обладают, как правило, лучшими условиями теплоотвода и охлаждения за счет более развитой внешней поверхности. В то же время потери в области внутреннего диаметра приходятся на меньший объем и площадь охлаждения. Одновременно наиболее интенсивное охлаждение достигается в зоне внешнего диаметра. Это вызывает неравномерность теплового поля и радиальную неравномерность нагрева обмоток. Превышение температуры внутренних лобовых частей обмотки статора над средней температурой статора может достигать 10–20 %. Оценка надежности изоляции обмотки якоря по средней температуре может оказаться неверной. В известной литературе [2 и др.] корректной методики теплового расчета ТСГ найде-

но не было. Это явилось побудительной причиной данной работы.

Разработанный ТСГ на частоту вращения 500 об/мин мощностью 4,5 кВт с напряжением 220 В частоты 50 Гц представлен на рис. 1.

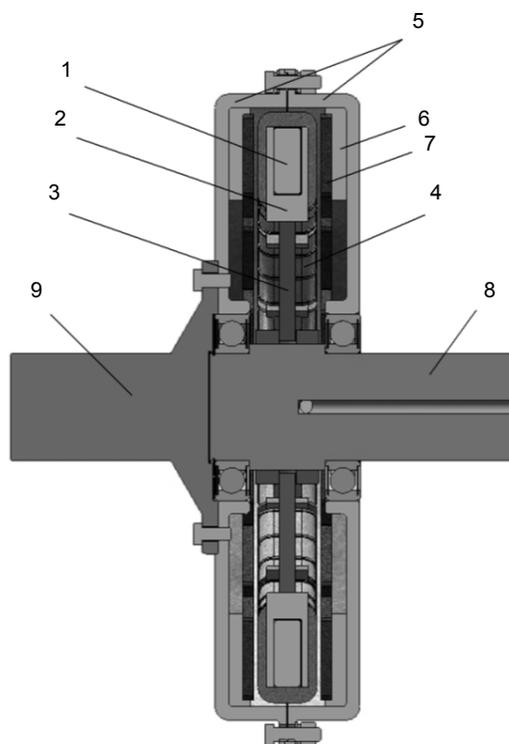


Рис. 1. Аксиальный разрез генератора: 1 – сердечник; 2 – вилка; 3 – спица; 4 – катушка; 5 – щиты; 6 – индуктор; 7 – магнит; 8 – несущий вал; 9 – подвижный вал

Сердечник статора ТСГ представляет собой тороид прямоугольного сечения, который по-

средством вилок П-образной формы и спиц крепится на втулке. Втулка жестко закреплена на неподвижном несущем валу. Один конец вала консольно заделан в опоре, второй свободен. Вилки распределены по окружности статора, их число, как и число спиц, равно числу полюсов $2p$. Катушки фаз намотаны на сердечник статора. Число катушек на полюс равно числу фаз. Концы катушек внутренним монтажом через отверстие во втулке и валу выведены наружу. Ротор представляет собой два щита, соединенных фланцами. На щитах расположены два кольцеобразных индуктора с закрепленными плоскими магнитами трапецеидальной формы. Число магнитов $2p$. Магниты намагничены аксиально; их полярность периодическая. К щиту со стороны, противоположной несущему валу, через фланец крепится второй вал – подвижный. Ветроколесо располагается на нем или связано с ним через повышающий редуктор.

При моделировании процессов конвективного теплообмена должны рассматриваться совместно уравнения энергии, неразрывности, движения и состояния. В случае малых скоростей течения диссипация энергии за счет вязкого трения и работа сил давления малы. Частным случаем уравнения энергии является уравнение смешанной конвекции при стационарном потоке движения теплоносителя [4]:

$$C_T \vec{v} \cdot \text{grad } T - P = \text{div} (\lambda \cdot \text{grad } T), \quad (1)$$

где T – превышение температуры над температурой окружающей среды T_{oc} ; \vec{v} – векторное поле скоростей движения теплоносителя; C_T – объемная удельная теплоемкость теплоносителя; λ – коэффициент теплопроводности; P – объемная плотность мощности источников тепловыделения.

Для обеспечения достоверности анализа теплового режима и условий охлаждения ТСГ тепловые расчеты были проведены на основе методов эквивалентных тепловых схем (ЭТС) [3], конечно-элементного двухмерного моделирования

[4, 5] в осесимметричной постановке в пакете ELCUT и конечно-объемного трехмерного моделирования в пакете FlowVision. В среде SolidWorks создана 3D-модель ТСГ. На ее основе разработана схема сборки ТСГ. Одновременно 3D-модель явилась базой для разработки моделей на основе методов ЭТС, конечных элементов и конечных объемов.

Эквивалентная тепловая схема замещения ТСГ представлена на рис. 2.

Схема содержит тепловые сопротивления следующих элементов: сердечника статора с температурой $\theta_{ст}$; внешней лобовой части обмотки с температурой $\theta_{м_вщ}$; активной части обмотки с температурой $\theta_{м_а}$; внутренней лобовой части обмотки с температурой $\theta_{м_вт}$; воздуха внутри ТСГ с температурой $\theta_{\alpha i}$; корпуса с температурой θ_k ; магнита с температурой θ_m ; индуктора с температурой $\theta_{и}$; щита с температурой $\theta_{щ}$. Учтены источники тепловыделений: потери в стали статора $P_{ст}$; потери в меди обмотки статора P_m , которые подразделяются на потери во внешних лобовых, активных и внутренних лобовых частях; механические и добавочные потери $P_{мех}$. Щит и корпус рассматриваются как связанные между собой элементы.

Расчет по методу ЭТС выполнен при следующих допущениях:

- отсутствует перемещение теплоты в поперечном сечении генератора, что позволяет рассматривать двумерную задачу в аксиальном сечении;
- обмотка статора монолитна, средняя температура равна средней температуре проводников;
- коэффициенты теплопроводности твердых тел и воздуха постоянны;
- подвижный и неподвижный валы и подшипники в теплоотводе не участвуют.

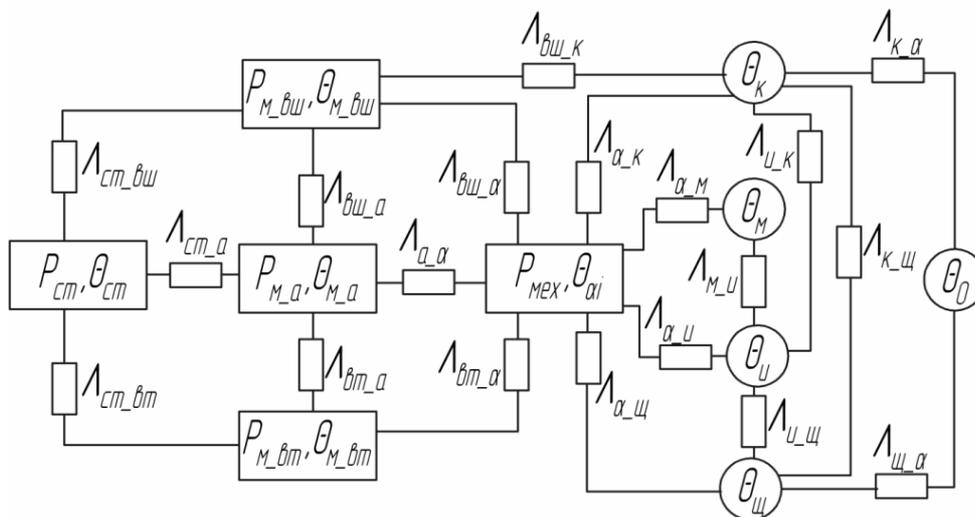


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема замещения ТСГ

Перепад температур статора в радиальном направлении является причиной разделения модели обмотки статора на три части. Сердечник статора обладает различной теплопроводностью по листу и поперек листов, поэтому тепловой поток от сердечника к катушкам разделен на три части (поперек листов вверх, вдоль листов влево и вправо и поперек листов вниз). На своем пути он встречает три тепловых проводимости $\Lambda_{ст_вш}$, $\Lambda_{ст_а}$ и $\Lambda_{ст_вт}$ – к внешней лобовой, активной и внутренней лобовой частям соответственно. Части обмоток связаны между собой проводимостями $\Lambda_{вш_а}$ и $\Lambda_{вт_а}$. Далее от катушек теплота передается окружающему воздуху ($\Lambda_{вш_а}$, $\Lambda_{а_а}$, $\Lambda_{вт_а}$), а также через зазор непосредственно корпусу ($\Lambda_{вш_к}$) и магнитам ($\Lambda_{а_м}$). Внутренний воздух, при допущении, что он перемешивается и во всем объеме имеет одинаковую температуру, передает тепло магнитам, индукторам, щитам и корпусу ($\Lambda_{а_м}$, $\Lambda_{а_и}$, $\Lambda_{а_щ}$ и $\Lambda_{а_к}$). Магнит и индуктор связаны между собой проводимостью $\Lambda_{м_и}$, индуктор и щит – проводимостью $\Lambda_{и_щ}$, индуктор и корпус – проводимостью $\Lambda_{и_к}$, корпус и щит – проводимостью $\Lambda_{к_щ}$. Теплота с поверхности щитов и корпуса отдается окружающему воздуху ($\Lambda_{щ_а}$ и $\Lambda_{к_а}$ соответственно).

Тепловой поток на своем пути встречает две тепловых проводимости: проводимость перехода через стенку и проводимость теплоотдачи с поверхности. Первая проводимость для ЭТС рассчитывается как

$$\Lambda = \lambda \frac{S}{d}, \quad (2)$$

где λ – удельная теплопроводность; S – площадь поверхности; d – толщина стенки.

Вторая проводимость определяется соотношением

$$\Lambda = \alpha \cdot S, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности; S – площадь поверхности.

Коэффициент α зависит от скорости и направления течения воздуха возле стенки, вязкости воздуха, шероховатости поверхности, степени турбулизации воздушного потока. Предварительно коэффициенты теплоотдачи α с поверхности катушек ТСГ могут быть рассчитаны аналогично коэффициентам теплоотдачи с поверхности катушек возбуждения машин постоянного тока или синхронных машин, а с поверхности щитов – аналогично щитам асинхронных двигателей, однако скорости и направления потоков воздуха в ТСГ и в цилиндрических машинах различаются. Для корректного определения коэффициентов теплоотдачи необходимо численное моделирование движения воздушных потоков и теплового состояния ТСГ. Коэффициенты α могут быть определены из результатов аэродинамического расчета в пакете FlowVision по значениям тепловых потоков Φ через поверхность S при перепаде температур ΔT у стенки $\Phi = \alpha \cdot S \cdot \Delta T$. (4)

Подлежащий в методе конечных элементов минимизации функционал двумерного плоскомеридианного поля при анизотропной теплопроводности с осями анизотропии r и z , совпадающими с координатными осями в области $S(r, z)$ с внутренними и внешними границами теплоотдачи для переменной $\varphi = T \cdot r$, может быть записан как [5]

$$Q = \iint_{rz} \left[\frac{1}{2} \left\{ \lambda_r \frac{r}{r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \lambda_z \frac{z}{r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right\} - \varphi P + \frac{C_T}{r} \left(v_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} + v_r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \varphi \right] dr dz + \int_{G_{ВНЕШ}} \left(\alpha \frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{r} - \varphi P_G \right) dG - \int_{G_{ВНУТ}} \left[\alpha \left(\frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{r} - \frac{\varphi_{TH}}{r_{TH}} \varphi \right) + \frac{1}{2} \varphi P_G \right] dG + \int_{G_{ВНУТ}} \left[\alpha \left(\frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{r} - \frac{\varphi_{TH}}{r_{TH}} \varphi \right) - \frac{1}{2} \varphi P_G \right] dG. \quad (5)$$

Здесь G – участок границы теплообмена с окружающей средой. Последние интегралы отражают отводимую/подводимую энергию через внешнюю границу области.

Таким образом, для проведения корректных расчетов теплового состояния ТСГ необходима взаимосвязанная итерационная процедура взаимодействия численных моделей для расчета задачи теплопроводности в методе конечных элементов Elcut и для расчета аэродинамической задачи в методе конечных объемов в пакете FlowVision.

На основе результатов моделирования в FlowVision уточнены пути теплоотвода, рассчитаны α (табл. 1), которые использованы в методах ЭТС и конечных элементов.

Таблица 1. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности

Поверхность элемента ТСГ	α , Вт/(м ² °С)
Катушки	75,89
Левый магнит	366,09
Правый магнит	396,89
Левый индуктор	35,12
Правый индуктор	35,76
Левый щит внутри	26,29
Правый щит внутри	26,05
Корпус внутри	107,19
Неподвижный вал внутри	32,17
Левый подшипник внутри	7,69
Правый подшипник внутри	8,00
Фланец подвижного вала	42,08
Левый щит снаружи	41,73
Правый щит снаружи	36,08
Правый подшипник снаружи	30,65

В результате проведенных аэродинамических и тепловых расчетов получены поля распределения температур в ТСГ (табл. 2, рис. 3), тепловых потоков, скоростей потоков воздуха внутри и

снаружи ТСГ (рис. 4), выработаны предложения по усовершенствованию конструкции ТСГ и улучшению теплового состояния.

Таблица 2. Сравнительные результаты тепловых расчетов

Элемент ТСГ	Средняя по объему температура, °C		
	Метод ЭТС	Моделирование в ELCUT	Моделирование в FlowVision
Сердечник статора	123,2	125,7	–
Катушка (нижняя лобовая часть)	119,0	114,8	115,2
Катушка (верхняя лобовая часть)	112,0	107,8	108,3
Левый магнит	74,3	68,8	64,2
Правый магнит		69,3	64,4
Левый индуктор	71,7	67,4	63,5
Правый индуктор		67,9	63,7
Левый щит	69,4	66,6	63,3
Правый щит		67,1	63,4
Неподвижный вал	–	66,0	64,5
Левый подшипник	–	65,4	64,0
Правый подшипник	–	66,1	63,7
Подвижный вал	–	64,1	44,0
Внутренний воздух	81,4	77,5	75,0
Окружающий воздух	–	43,3	41,7

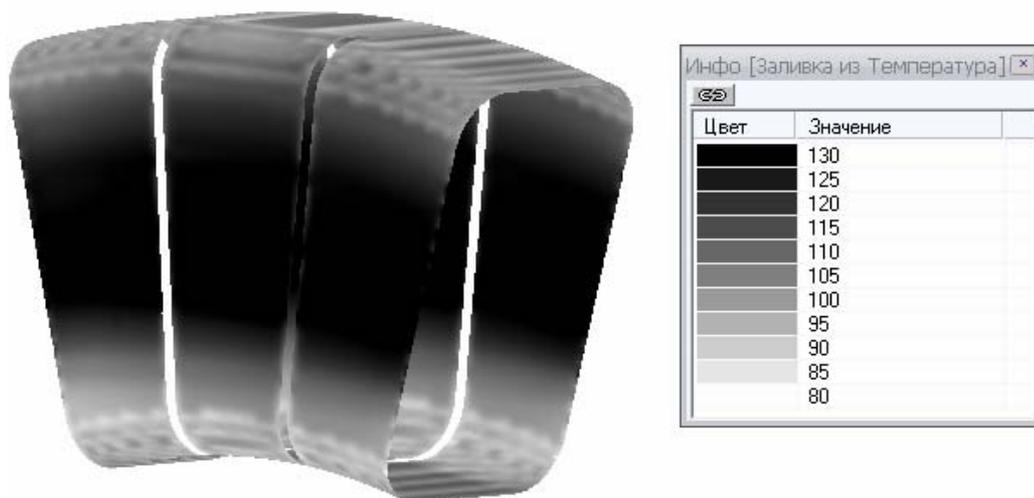


Рис. 3. Распределение температур на поверхности катушки

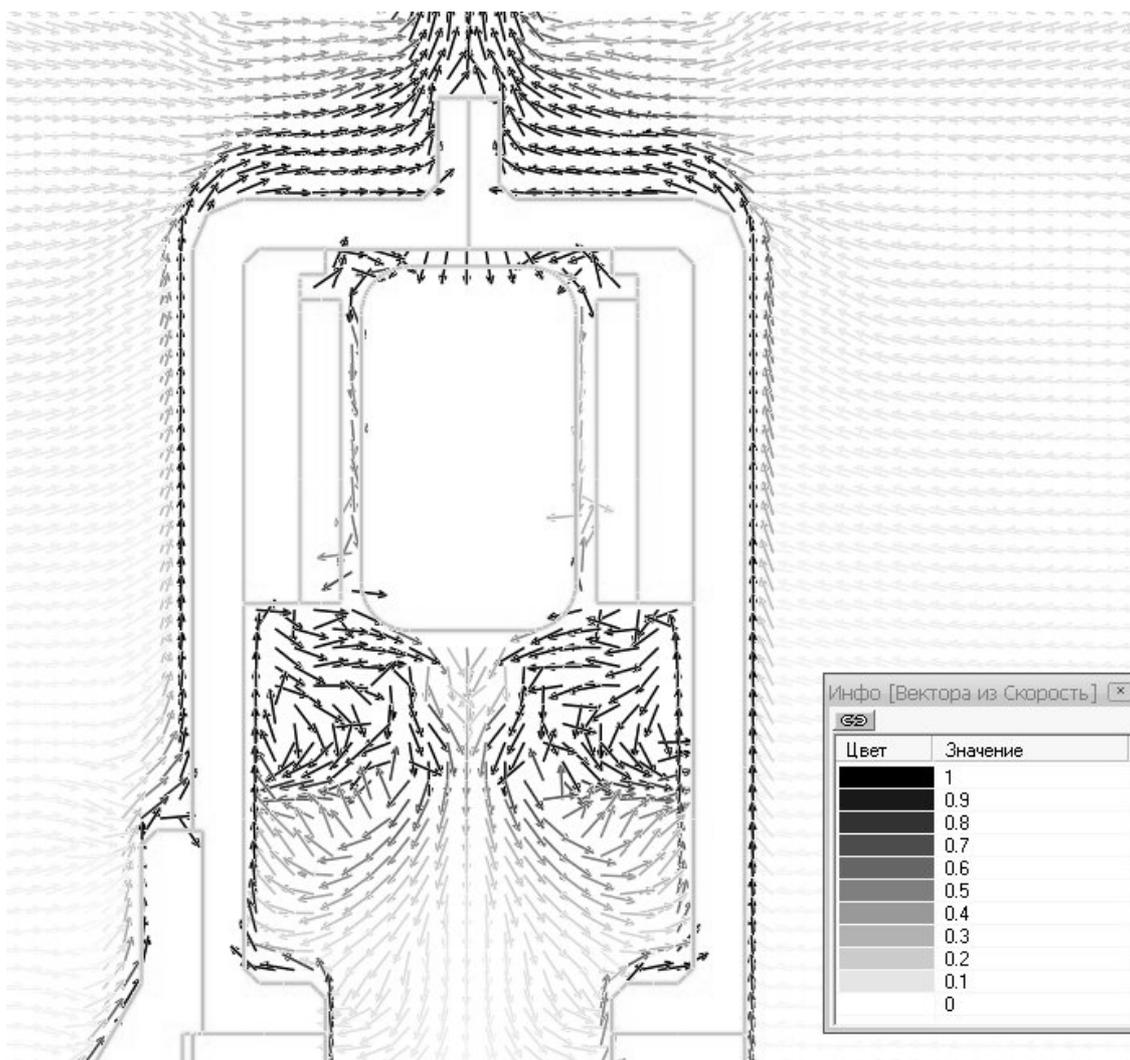


Рис. 4. Распределение скоростей потоков воздуха (векторов скоростей) в сопряженной задаче в аксиальном сечении между спицами в диапазоне 0–1 м/с

Таким образом, выполнено численное моделирование движения воздушных потоков и теплового состояния магнитоэлектрического торцевого генератора, решена задача сопряженно-конвективного теплообмена с учетом рассчитанного поля скоростей воздушных потоков, подогрева и теплоемкости теплоносителя.

Список литературы

1. **Шишкин В. П.** Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного

тока: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2006. – 68 с.

2. **Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А.** Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.

3. **Ши Д.** Численные методы в задачах теплообмена: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 544 с.

4. **ELCUT:** Руководство пользователя / Препринт ПК ТОР. – СПб., 2007. – 162 с.

5. **Казаков Ю.Б.** Конечно-элементное моделирование сопряженного теплообмена в электрических машинах // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 3. – С. 38–42.

Казаков Юрий Борисович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Шишкин Валерий Павлович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры электромеханики,
телефон (4932)26-97-47,
e-mail: shishkin@em.ispu.ru

Корнилов Дмитрий Сергеевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электромеханики,
телефон (4932)26-97-05,
e-mail: elmash@em.ispu.ru