

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА СОВМЕЩЕННОГО ТИПА МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков, Ю.Н. Иванников

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Приводятся результаты исследования стационарных тепловых полей синхронного генератора малой мощности. Генераторы совмещенного типа применяются для электроснабжения автономных мобильных объектов: автомобилей, тягачей, военной техники. Основным требованием к этим генераторным установкам является требование обеспечения заданной мощности в условиях ограниченных габаритов и теплового воздействия от двигателя внутреннего сгорания. В статье исследуются различные способы охлаждения генератора и приводятся рекомендации по снижению перегрева наиболее нагретых точек машины до допустимого уровня.

Ключевые слова: синхронный генератор, тепловой расчет, численное моделирование, автономный, метод конечных элементов.

При разработке высокоиспользуемых электромеханических преобразователей существует проблема оценки их теплового состояния на стадии проектирования. Применяемые в настоящее время методики теплового расчета в большинстве своем являются приближенными и не учитывают реального распределения температурного поля в поперечном сечении электрической машины. Особенно остро эта проблема стоит для электрических генераторов, используемых в качестве источников питания бортовых систем автономных объектов. Генераторы в этих системах располагаются в жестко ограниченных условиях моторного отсека и подвержены значительным тепловым воздействиям и от двигателя внутреннего сгорания, и от собственных потерь. Поэтому уточнение значений тепловых нагрузок является актуальной задачей совершенствования подобных электромеханических преобразователей.

Объектом исследования выбран бесщеточный вентильный двухкаскадный синхронный генератор со следующими основными параметрами:

- мощность $P = 18 \text{ кВт}$;
- номинальное выпрямленное напряжение $U_d = 28,5 \text{ В}$;
- частота вращения $n = 7200 \text{ об/мин}$;
- охлаждение воздушное забортным воздухом под напором с расходом $G = 297,7 \text{ м}^3/\text{час}$ и возможностью увеличения расхода в два раза;
- температура охлаждающей среды $T_{\text{окр}} = 120^\circ \text{С}$.

Юрий Александрович Макаричев (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Юрий Валентинович Зубков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Юрий Николаевич Иванников, аспирант.

В качестве пазовой и полюсной изоляции используется изоляционная бумага *Notex*, позволяющая эксплуатацию при температуре до 220 °С [4]. Обмоточный провод – ПЭТ-имид с нагревостойкой эмалистой изоляцией. В качестве альтернативного воздушному охлаждению был рассмотрен вариант с жидкостным (антифриз) охлаждением.

Для решения тепловой задачи необходимо:

- выявить все источники тепла и определить объемные мощности тепловыделения в активных элементах машины;
- разработать геометрическую модель генератора и задать ее физические свойства.

Допущения, принятые в исследовании:

- генератор представлен двумерной геометрической моделью;
- параметры теплоотвода постоянны и изотропны (коэффициент теплопроводности $\lambda_x = \lambda_y = const$, коэффициент теплоотдачи $\alpha = const$);
- нагрев лобовых частей обмотки учитывается традиционными интегральными методами;
- основное направление теплоотдачи – радиальное.

Первое допущение не вызывает существенной ошибки при расчете температурного поля, так как относительная длина генератора $\lambda = \frac{l_\delta}{D} = 0,93$. При таких геометрических параметрах краевые эффекты слабо влияют на температурное и электромагнитное поле генератора. Поэтому решение 2D задачи является оправданным [2].

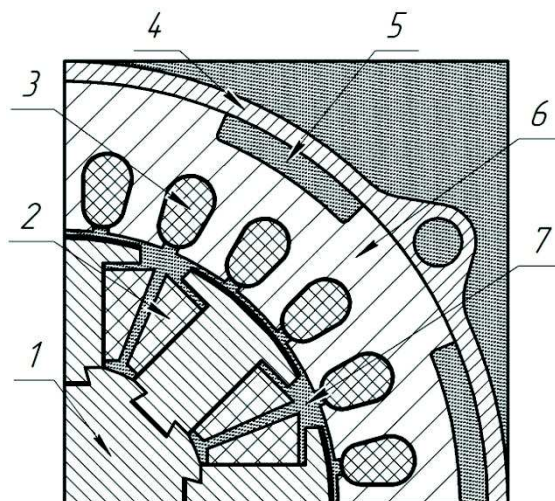


Рис. 1. Геометрическая модель синхронного генератора:

- 1 – магнитопровод ротора; 2 – катушка ротора; 3 – паз статора; 4 – корпус;
- 5 – вентиляционный канал; 6 – магнитопровод статора; 7 – межполюсное окно

Геометрическая модель (рис. 1) представляет собой поперечное сечение основного каскада двухкаскадного генератора с разбиением на расчетные блоки, а также область воздушного пространства вокруг статора машины. Пространство, через которое проходит забортный воздух, ограничено внутренней поверхностью статора и внешней поверхностью ротора (полюсы и намотанные на них обмотки индуктора), в поперечном сечении имеет площадь S .

Источниками тепла, выделяющегося в генераторе в номинальном режиме, являются: электрические потери в обмотках статора и ротора, потери от вихревых токов и на гистерезис в магнитопроводе статора, а также поверхностные потери в полюсных башмаках.

При решении тепловой задачи физические свойства стальных участков, окружающего воздуха, воздуха внутри машины и пазовой изоляции задавались соответствующими коэффициентами теплопроводности. Для обмоток якоря и индуктора были рассчитаны эквивалентные коэффициенты теплопроводности, учитывающие толщину изоляции, пропитку и коэффициент заполнения медью [1]. Потери в меди статора и ротора, а также поверхностные потери и потери в стали статора были рассчитаны аналитически, а в свойствах соответствующих блоков заданы объемные плотности тепловыделения ($Q, \text{Вт}/\text{м}^3$). Граничные условия задавались на поверхности корпуса генератора постоянным коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 16 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2$ без учета обдува и конвекции.

На поверхности, ограничивающей воздушный зазор, с учетом обдува заборным воздухом скоростью

$$v = \frac{G}{3600 \cdot S} = \frac{297,7}{3600 \cdot 0,001086} = 76,5 \text{ м}/\text{с}$$

число Рейнольдса

$$Re_s = 4,39 \cdot 10^3 > 2 \cdot 10^3,$$

следовательно, в зазоре устанавливается турбулентный режим течения, при котором теплообмен не зависит от вращения ротора [1].

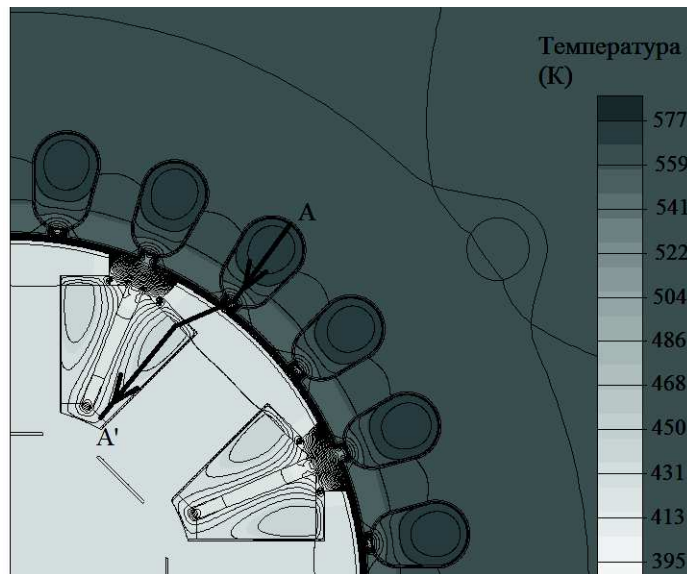


Рис. 2. Температурное поле генератора с воздушным охлаждением без каналов охлаждения в статоре

Коэффициент теплоотдачи в зазоре

$$\alpha_s = 148 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2,$$

на боковой поверхности полюсных наконечников ротора

$$\alpha_{n.n} = 306 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2,$$

на поверхности катушек ротора

$$\alpha_{к.р} = 292 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2.$$

Задача решалась для установившегося режима (стационарная задача) с фиксированной температурой на границе области расчета 393 К (+120 °С), соответствующей требованиям технического задания.

В результате расчета методом конечных элементов (МКЭ) в программной среде *Elcut* [3] была получена картина температурного поля, представленная на рис. 2.

На рис. 3 показана кривая распределения температуры по сечению А–А' главного каскада генератора. Сечение проходит по наиболее нагретым элементам статора и ротора – серединам катушек (см. рис. 2). Задача решалась для конструкции без осевых вентиляционных каналов.

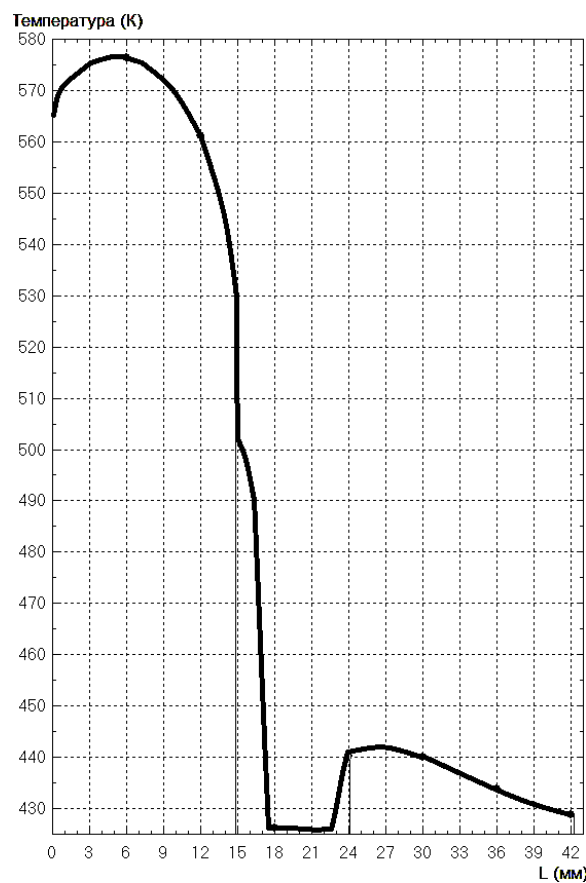


Рис. 3. Распределение температуры по сечению катушек статора и ротора

Из графика видно, что максимальную температуру имеет середина паза статора: $T_{max} = 576 \text{ К}$ (303 °С).

Так как тепловые нагрузки существенно выше допустимых, а наиболее нагретой частью машины является обмотка статора, в геометрической модели между статором (6) и корпусом (4) были введены каналы охлаждения (5) (см. рис. 1). После этого были пересчитаны коэффициенты теплоотдающих поверхностей, так как скорость циркуляции воздуха при этом изменилась. Решены не-

сколько вариантов тепловой задачи для 8, 16 и 32 каналов охлаждения (суммарная площадь каналов охлаждения при этом оставалась постоянной) при номинальном, полуторакратном и двукратном расходе воздуха. Результаты решения представлены на рис. 4.

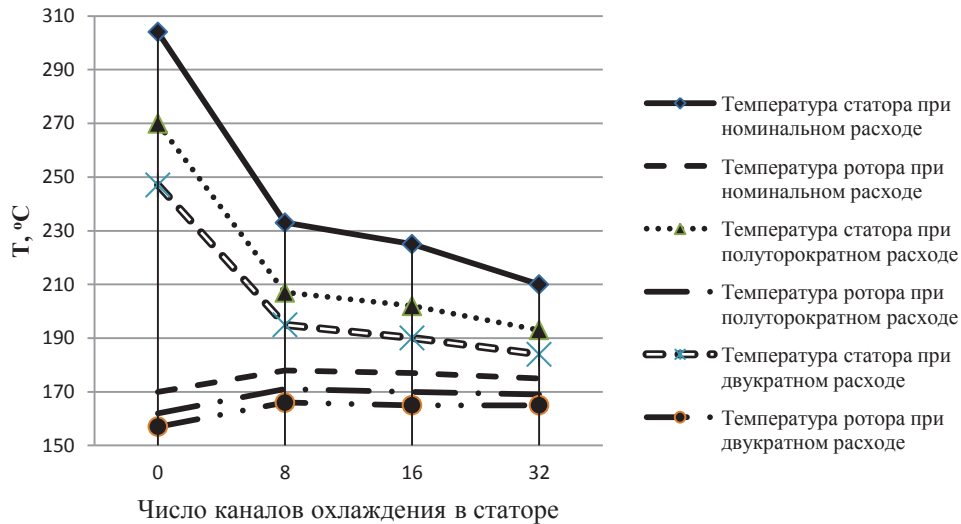


Рис. 4. Зависимость температуры обмоток статора и ротора от числа каналов в статоре при различных расходах охлаждающей среды

По итогам численного моделирования температурного поля генератора с воздушным охлаждением установлено:

- конструкция генератора без каналов охлаждения в статоре не удовлетворяет требованиям по перегреву в пределах допустимого расхода охлаждающей среды;
- при номинальном расходе воздуха конструкция с 32 каналами охлаждения имеет допустимые температуры обмоток;
- эффективность охлаждения увеличивается с увеличением числа каналов охлаждения при неизменном их суммарном сечении;
- допустимое значение перегрева можно обеспечить увеличением расхода воздуха.

В случае жидкостного охлаждения пространство, через которое проходит хладагент, ограничено внутренней поверхностью корпуса и внешней поверхностью статора. Тепловая задача формулировалась следующим образом: обеспечение приемлемого по классу изоляции уровня нагрева при различном расходе хладагента.

Расход охлаждающей среды (антифриза) варьируется

$$\text{от } G = 0,005 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \text{ до } G = 0,075 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

Расход охлаждающей среды рассчитывался по формуле

$$G = v \cdot S_k,$$

где S_k – суммарная площадь каналов охлаждения;

v – скорость охлаждающей среды.

На поверхности, ограничивающей воздушный зазор с учетом ламинарного с макровихрями течения среды, коэффициент теплоотдачи для зазора [1]

$$\alpha_{\text{ген.з}} = 86 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К},$$

на боковой поверхности полюсных наконечников

$$\alpha_{\text{п.н}} = 73,6 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2,$$

на поверхности катушек ротора

$$\alpha_{\text{к.р}} = 77,37 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2.$$

Для ламинарного режима движения жидкого теплоносителя ($Re < 2320$) коэффициент теплоотдачи канала охлаждения

$$\alpha_{\text{ко}} = 133 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

В результате расчета МКЭ в программной среде *Elcut* была получена картина температурного поля, представленная на рис. 5. На рис. 6 показана кривая распределения температуры по сечению А–А' главного каскада генератора. Сечение проходит по наиболее нагретым элементам статора и ротора – серединам катушек.

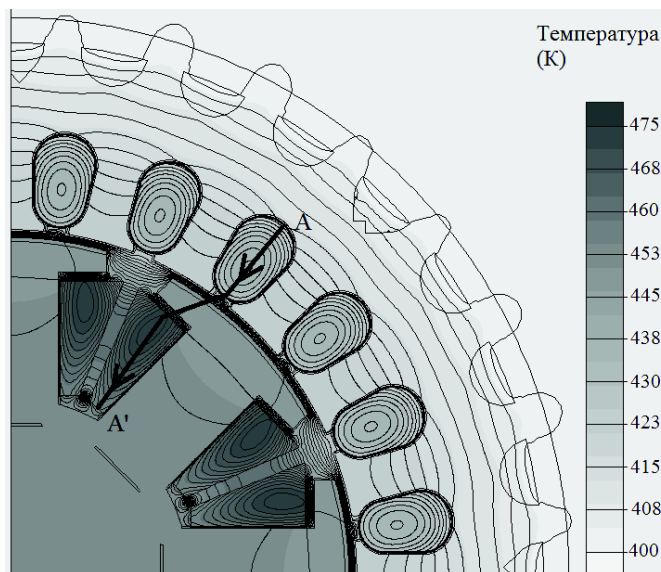


Рис. 5. Картина температурного поля генератора с жидкостным охлаждением

По результатам расчета максимально нагретыми оказались проводники обмотки возбуждения, расположенные в середине катушки, температура которых составила $200 \text{ }^\circ\text{C}$, причем плотность тока в этой обмотке на 40 % ниже, чем в обмотке якоря. Обмотка якоря находится в лучших условиях с точки зрения теплоотвода из-за наличия каналов между корпусом и сердечником статора, в которых циркулирует жидкий хладагент. Максимальная температура обмотки якоря составила $164 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тепловая задача решалась для различного расхода жидкой охлаждающей среды. На рис. 7 приведена зависимость температуры наиболее нагретых частей обмоток статора и ротора от скорости движения антифриза в каналах.

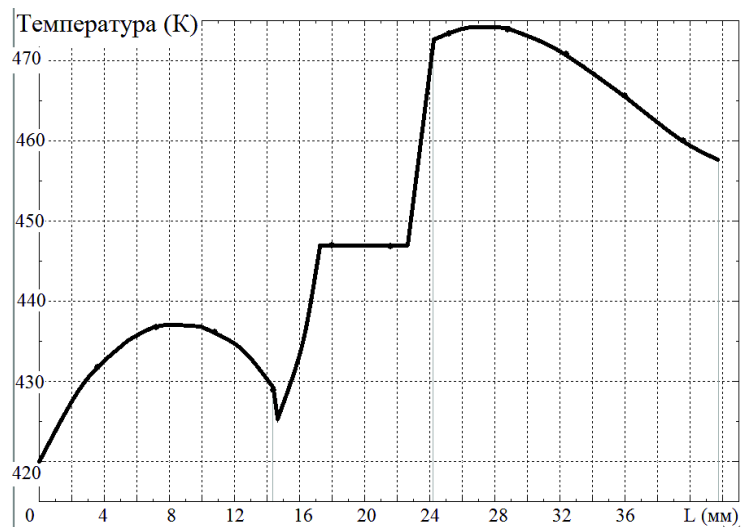


Рис. 6. Распределение температуры по сечению генератора

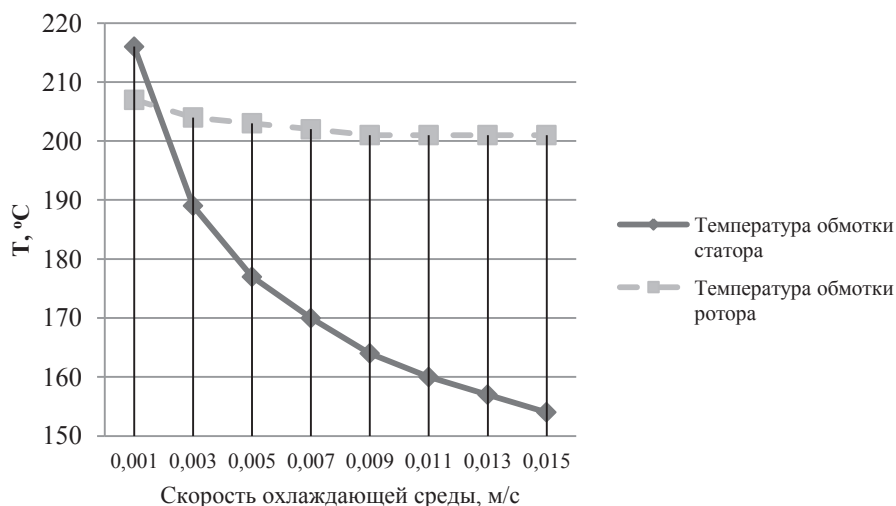


Рис. 7. Зависимость температуры обмоток от скорости движения жидкого хладагента

По итогам численного моделирования температурного поля генератора с жидкостным охлаждением установлено:

- наиболее нагруженным звеном в тепловом отношении является ротор основного каскада генератора;
- при увеличении расхода жидкой охлаждающей среды максимальная температура обмотки якоря (статора) снижается по экспоненциальной зависимости;
- температура обмотки возбуждения (ротора) практически не зависит от скорости прокачки антифриза в каналах статора, но соответствует применяемому классу изоляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Охлаждение электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с., ил.
2. Макарычев Ю.А., Иванников Ю.Н. Моделирование температурных полей радиального электромагнитного подшипника // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 3(43). – С. 139-145.
3. Руководство *Elcut*. Производственный кооператив ТОР. – СПб., 2010. – 345 с.
4. <http://elmatec.ru/nomex-hitemp>

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2015 г.

AN INVESTIGATION INTO THERMAL PROCESSES IN A COMBINED AUTONOMOUS GENERATOR BY MEANS OF MODELLING TEMPERATURE FIELDS

Yu.A. Makarychev, Yu.V. Zubkov, Yu.N. Ivannikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

The paper presents the results of a study of stationary temperature fields in a low-power synchronous generator. Combined generators are used to power mobile machines: vehicles, tractors, military vehicles. The main requirement for these generator sets is to ensure a predetermined power with limited overall dimensions and internal-combustion engine thermal effects. The paper examines various ways of generator cooling and provides recommendations to reduce the overheating of the machine most heated points to an acceptable level.

Keywords: *synchronous generator, thermal design, numerical simulation, self-contained, finite element method.*

*Yu.A. Makarychev (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Yu.V. Zubkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Yu.N. Ivannikov, Assistant.*