

## РАСЧЕТ ДВУХМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Розглянуто особливості розрахунку двовимірного стаціонарного теплового поля із використанням метода кінцевих елементів, за допомогою якого є можливість урахувати особливості реальної геометрії та нерегулярну фізичну структуру вентильно-реактивного двигуна. Розрахунки виконано в програмах ELCUT та FEMM. Наведено порівняння результатів моделювання із експериментом.*

*Рассматриваются особенности расчета двумерного стационарного теплового поля с использованием метода конечных элементов, с помощью которого можно учесть сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру вентильно-реактивного двигателя. Расчеты выполнены в программах ELCUT и FEMM. Приведено сравнение результатов моделирования с экспериментом.*

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ тепловых процессов в электромеханическом преобразователе (ЭМП) вентильно-реактивного двигателя (ВРД) необходим на всех стадиях разработки. При этом перед разработчиком, как правило, ставится задача оценки температуры различных элементов двигателя. На сегодняшний день достаточно точный расчет теплового поля возможен при использовании численных методов, в частности, метода конечных элементов (МКЭ). Для расчета двумерных стационарных температурных полей МКЭ применим следующие программы: лицензионная версия ELCUT 5.6 [3] и свободно распространяемая версия FEMM 4.2 [7].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ

Основой расчета двумерных стационарных температурных полей МКЭ является общее дифференциальное уравнение теплопроводности [6], которое в декартовой системе координат имеет вид:

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

с граничными условиями, учитывающими конвективный теплообмен,

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} e_y - \alpha(T - T_{oc}) = 0; \quad (2)$$

при граничных условиях первого рода

$$T|_x = T^*; \quad (3)$$

с граничными условиями второго рода

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (4)$$

В результате решения уравнения (1) с граничными условиями (2) – (4) определяется искомое температурное поле для сечения анализируемой электрической машины в установившемся тепловом режиме.

В выражениях (1) – (4) приняты следующие обозначения:  $\lambda_x, \lambda_y$  – коэффициенты теплопроводности в текущей точке расчетной области в направлении осей координат  $x$  и  $y$  соответственно;  $T(x, y)$  – искомая функция распределения температуры;  $q$  – объемная плотность источников нагрева;  $e_x, e_y$  – направляющие косинусы нормали теплоотдающей поверхности по

отношению к осям координат;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией в окружающую среду;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды;  $n$  – нормаль к внешней теплоотдающей поверхности;  $T_x$  – температура на границе расчетной области;  $T^*$  – известное значение температуры на границе расчетной области.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассмотрим ВРД SRM-57-100 производства завода "Электротехника" [2] (рис. 1).



Рис. 1

Это четырехфазный ВРД конструкции 8/6, внешний диаметр статора которого 57 мм, активная длина – 28 мм. Обмотка статора содержит восемь сосредоточенных катушек, объединенных по две в одну фазу. Сопrotивление фазы составляет 0,48 Ом. Поперечное сечение ЭМП приведено на рис. 2. Способ охлаждения данного ВРД – IC0040.

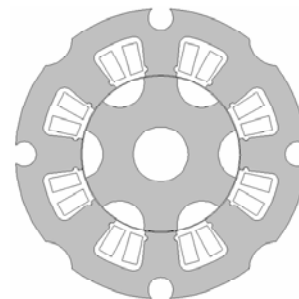


Рис. 2

### ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

В качестве исходных данных для решения тепловой задачи необходимо знать величину потерь в электрической машине. Для этого выполнено модели-

рование SRM-57-100 в системе автоматизированного анализа и синтеза ВРД SRM-CAD [4, 5] с нагрузкой на валу 0,02 Н·м и частотой вращения вала 3000 об/мин. Результаты расчета квазиустановившегося режима приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение, Вт
Потребляемая мощность $P_1$	17,3
Мощность на валу $P_2$	6,3
Мощность электрических потерь $P_{эл}$	5,8
Механические потери $P_{мех}$	0,7
Потери в стали статора $P_{стат}$	1,1
Потери в стали ротора $P_{рот}$	0,4
Потери в системе управления $P_{прив}$	3

При выборе коэффициентов теплопроводности и граничных условий будем руководствоваться данными [1].

Магнитная система SRM-57-100 выполнена из электротехнической стали марки 2211, у которой продольная теплопроводность находится в диапазоне от 36 до 39 Вт/(К·м) [1]. Объемная плотность тепловыделения в статоре и роторе рассчитывается исходя из величины потерь в стали и равна для статора – 19115 Вт/м<sup>3</sup>, для ротора – 17480 Вт/м<sup>3</sup>.

Обмотка статора. По методике [1] тепловая проводимость паза на единицу длины в радиальном направлении – 64 Вт/(К·м). В катушках выделяются электрические потери, создающие объемную плотность тепловыделения 109000 Вт/м<sup>3</sup>.

Рассматриваемый ВРД – это закрытая электрическая машина с естественным охлаждением. При расчете нагрева закрытых устройств с помощью пакета ELCUT необходимо описывать границы внутренней воздушной среды, т.к. в соответствии с руководством по применению пакета при задании коэффициента теплоотдачи на какой-либо границе необходимо одновременно задать температуру на этой границе, а эта

температура неизвестна. Вместо этого можно принять, что воздух вне зависимости от того, есть ли внутри какие-либо перемешивающие устройства или нет, имеет во всем объеме, исключая очень тонкий пограничный слой, одну и ту же температуру. Опираясь на это положение и зная коэффициенты теплоотдачи как от тепловыделяющих элементов к воздуху, так и от воздуха к корпусу  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ , где  $n$  – число участков, в пределах которых можно считать коэффициент теплоотдачи постоянным, вводим в расчет условные среды, которые назовем  $BA_1, \dots, BA_n$  (Boundary Air ...) и TSC (Thermal Superconductivity) [1]. Эти среды характеризуются следующими значениями теплопроводности:

$$\lambda_{BA_i} = \alpha_i \cdot \delta \quad (i=1..n), \quad \lambda_{TSC} = 10^5,$$

где  $\delta$  – очень малое расстояние по сравнению с размерами описываемых областей.

Для программы FEMM описывать границы внутренней воздушной среды не нужно (однако при этом не учитывается внутренняя конвекция вследствие перемешивания воздуха ротором).

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты расчета в программе ELCUT приведены на следующих рисунках:

- на рис. 3 приведено распределение вектора теплового потока в ЭМП,
- на рис. 4 приведено распределение изотерм в ЭМП (изотермы проведены с шагом 0,02 К),
- на рис. 5 приведено распределение теплового потока  $F$  в ЭМП ВРД,
- на рис. 6 приведено распределение температуры в ЭМП ВРД.

Распределение температурного поля в программе FEMM приведено на рис. 7.

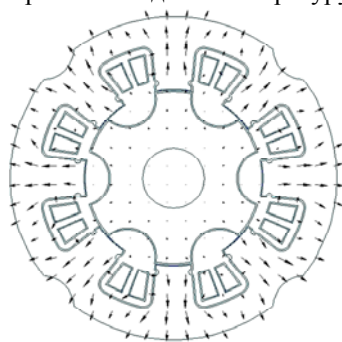


Рис. 3

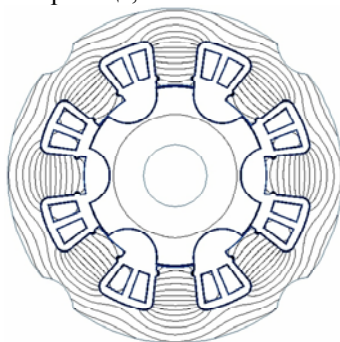


Рис. 4

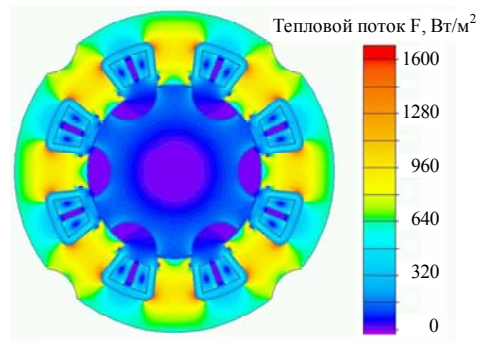


Рис. 5

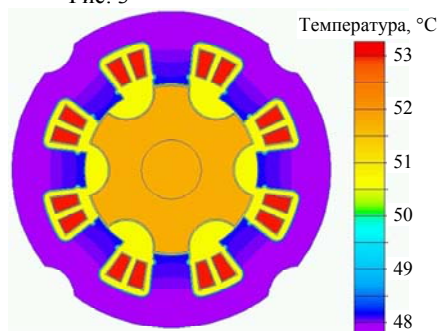


Рис. 6. Распределение температуры в ЭМП ВРД, рассчитанное в программе ELCUT

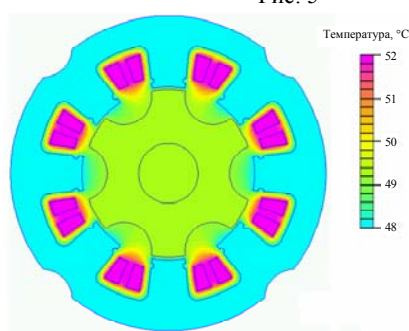


Рис. 7. Распределение температуры в ЭМП ВРД, рассчитанное в программе FEMM

Таблица 3

	Внешняя поверхность статора	Обмотка статора
Эксперимент, °С	50	54,5
Моделирование в ELCUT, °С	48	53
Моделирование в FEMM, °С	48	52

Как видно, из рис. 6 и 7, результаты расчета двухмерного стационарного теплового поля в ЭМП ВРД, полученные в программах ELCUT и FEMM близки друг к другу. Процесс подготовки исходных данных и анализа результатов, а также времени решения тепловой задачи для обеих программ практически совпадают.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент проводился с использованием двух датчиков температуры КТУ83-122, установленных на ЭМП. Один датчик был установлен на внешней поверхности статора. Другой датчик находился в катушке ЭМП.

В ходе эксперимента частота вращения поддерживалась постоянной и составляла 3000 об/мин. ВРД был нагружен на постоянную нагрузку 0,02 Н·м. Напряжение питания составляет 24,5 В, а потребляемый ток от источника – 0,71 А.

Эксперимент проводился в течении 40 минут. При этом температура ЭМП установилась через 25 минут с момента начала эксперимента. Значения температуры в различные моменты времени приведено в таблице 2. На рис. 8 показан график изменения температуры в функции времени. Во время эксперимента температура окружающей среды составляла 26,6 °С.

Таблица 2

Время проведения замеров, мин	Показания температуры на поверхности статора, °С	Показания температуры в обмотке статора, °С
0	26,6	26,6
5	39	43,5
10	44	49
15	48	52
20	49	54
25	50	54,5
40	50	54,5

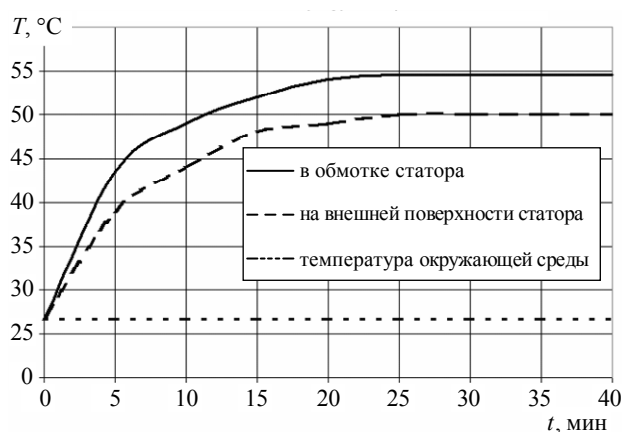


Рис. 8. Изменение температуры в функции времени

### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ELCUT И FEMM

В таблице 3 приведено сравнение значений установившейся температуры внешней поверхности статора и обмотки при математическом моделировании и эксперименте.

### ВЫВОДЫ

Данные математического моделирования двухмерного стационарного теплового поля с использованием программных пакетов ELCUT и FEMM, а также физического эксперимента достаточно близки. Отличие между ними не превышает пяти процентов, что свидетельствует о целесообразности использования разработанных полевых математических моделей для расчета теплового состояния ЭМП ВРД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гандшу В.М. / Особенности расчета нагревания электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT // источник: <http://elcut.ru/articles/gandshou/>
2. Описание вентильного электропривода SRM-57-100 // источник: <http://www.ukrainemotors.com/>
3. Описание возможностей программы ELCUT // источник: [http://elcut.ru/feat\\_r.htm](http://elcut.ru/feat_r.htm).
4. Рымша В.В., Радимов И.Н., Процына З.П. / Подсистема компьютерного моделирования вентильно-реактивных электродвигателей // Вестник Херсонского национального технического университета. Вып. 2(25) 2006. С. 437-442.
5. Свидетельство о регистрации авторского права № 30929. Компьютерная программа "Система автоматизированного анализа и синтеза вентильно-реактивных двигателей SRM-CAD" / Гулый М.В., Малёваний О.Е., Процына З.П., Радимов И.Н., Рымша В.В. Украина, г. Киев: Министерство образования и науки Украины, Государственный департамент интеллектуальной собственности, 10.11.2009.
6. Щучинский С.Х., Никитенко А.Г., Ковалев О.Ф., Лобов Б.Н. / Расчет стационарного температурного поля электромагнитного привода методом конечных элементов // Изв. ВУЗов "Электромеханика". – 1993. – № 4. – С. 69-77.
7. David Meeker. User's Manual. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 / David Meeker // source: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>.

Поступила 23.06.2010

Рымша Виталий Викторович, д.т.н., проф.

Процына Зиновий Павлович

Кравченко Петр Алексеевич

Одесский национальный политехнический университет, кафедра электрических машин

Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1

Тел. (048) 738-58-55, e-mail: rimsha@ukrainemotors.com

V.V. Rymsha, Z.P. Protsyna, P.A. Kravchenko

### The finite element method of the calculation of the two-dimensional stationary thermal field of the switched reluctance motor.

Features of calculation of a two-dimensional stationary thermal field with use of finite element method are considered. It allows considering difficult geometry switched reluctance motor. Calculations are executed in programs ELCUT and FEMM. Comparison of results of modeling with experiment is present.

**Key words** – switched reluctance motor, thermal design, finite element method.