

д.т.н. В.В. РЫМША, З.П. ПРОЦЫНА, С.К. ДЕМЬЯНЕНКО
Одесский национальный политехнический университет
Кафедра электрических машин

РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение

Рассмотрение тепловых процессов в электромеханическом преобразователе (ЭМП) вентильно-реактивного двигателя (ВРД) необходимо на всех стадиях разработки и эксплуатации. Адекватный расчет теплового поля на сегодняшний день возможен при использовании метода конечных элементов (МКЭ).

Математическая постановка задачи расчета теплового поля

Основой расчета двумерных стационарных температурных полей МКЭ является общее дифференциальное уравнение теплопроводности [1], 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

$$T|_x = T^*; \quad (4)$$

с граничными условиями второго рода

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (3)$$

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: λ_x, λ_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; α – 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). Поперечное сечение ЭМП которого приведено на рис. 2. Способ охлаждения данного ВРД – IC0040 (закрытый двигатель с естественным охлаждением).



Рис. 1. Внешний вид ЭМП электромеханического преобразователя ВРД SRM-57-100

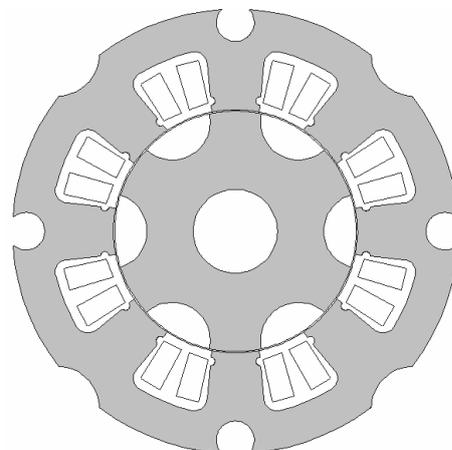


Рис. 2. Поперечное сечение ЭМП SRM-57-100

Подготовка исходных данных для расчета стационарного температурного поля в программе ELCUT.

В качестве исходных данных для решения тепловой задачи необходимо знать величину потерь в электрической машине. Для этого смоделируем SRM-57-100 в системе автоматизированного анализа и синтеза ВРД SRM-CAD [3, 4] с нагрузкой на валу 0.02 Н·м и частотой вращения вала – 3000 об/мин. Результаты расчета квазиустановившегося режима приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Потребляемая мощность P_1 , Вт	17.3
Мощность на валу P_2 , Вт	6.3
Мощность электрических потерь $P_{эл}$, Вт	5.8
Механические потери $P_{мех}$, Вт	0.7
Потери в стали статора $P_{ст_с}$, Вт	0.76
Потери в стали ротора $P_{ст_р}$, Вт	0.76
Потери в системе управления $P_{прив}$, Вт	3

Для теплового расчета МКЭ воспользуемся ELCUT версии 5.2 [6]. При выборе коэффициентов теплопроводности и граничных условий будем руководствоваться данными [5].

Определим коэффициенты теплопроводности, объемные плотности тепловыделения для материалов, а также зададим граничные условия.

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) [5].

Объемная плотность тепловыделения в статоре и роторе рассчитывается исходя из величины потерь в стали и равна для статора – 19115 Вт/м^3 , для ротора – 17480 Вт/м^3 .

Обмотка статора. По методике [5] тепловая проводимость паза на единицу длины в радиальном направлении – 64 Вт/(Км) . В катушках выделяются электрические потери, создающие объемную плотность тепловыделения 109000 Вт/м^3 .

При расчете нагрева закрытых устройств с помощью пакета ELCUT необходимо описывать границы внутренней газовой среды. Вместо этого можно ввести в расчет условную гипотетическую среду (BA12) и TSC – сверхпроводящую тепловую среду. Описание данного приема, а также методики расчета теплопроводности среды BA12 подробно описано в [5].

В результате, для моделирования в программе ELCUT было создано 6 материалов и два граничных условия (рис. 3)

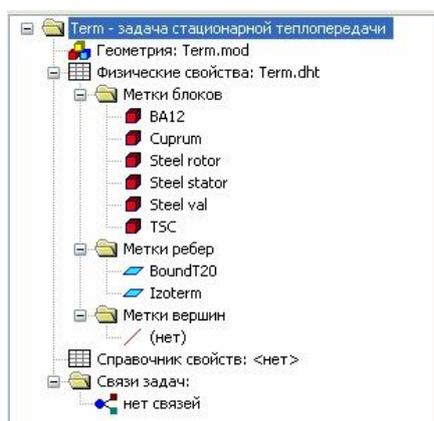


Рис. 3. Свойства задачи стационарной теплопередачи

При расчете в ELCUT автоматически была сгенерирована сетка конечных элементов. При этом в модели было 122610 узла сетки (рис. 4). Расчет выполнялся на двух ядерном процессоре с эквивалентным рейтингом 4200 за 9 секунд.

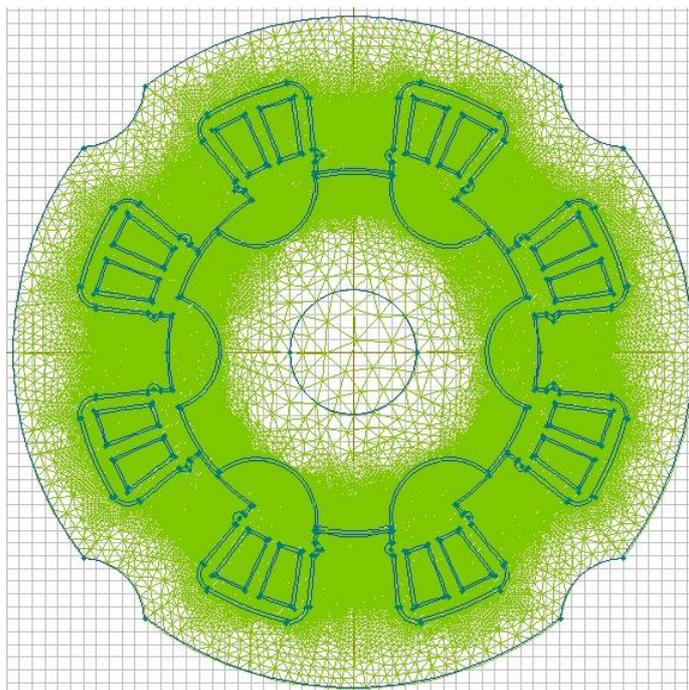


Рис. 4. Дискретизация расчетной области на конечные элементы

Анализ результатов

Результаты расчета приведены на рисунках 5 – 8.

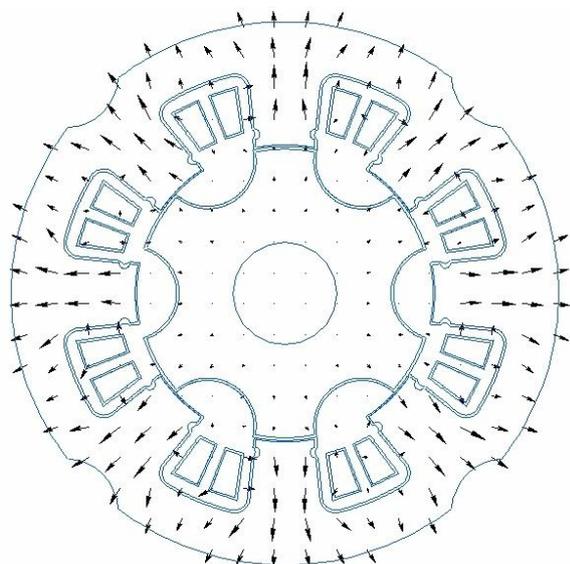


Рис. 5. Распределение вектора теплового потока в ЭМП (при масштабе 0.0008 и шаге сетки 3 мм)

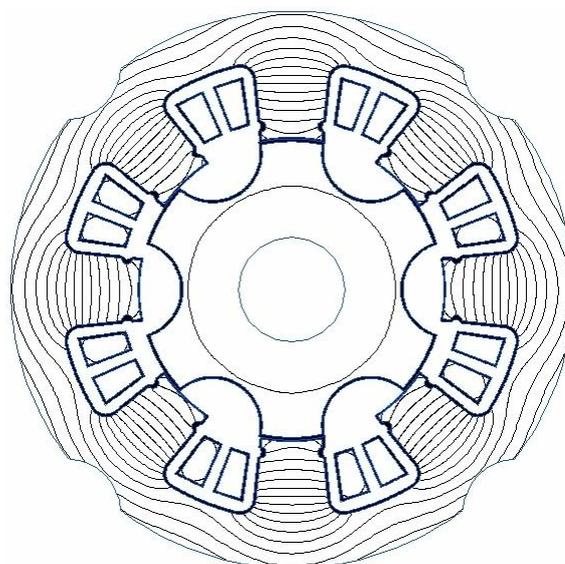


Рис. 6. Распределение изотерм в ЭМП (изотермы проведены с шагом 0.02 К)

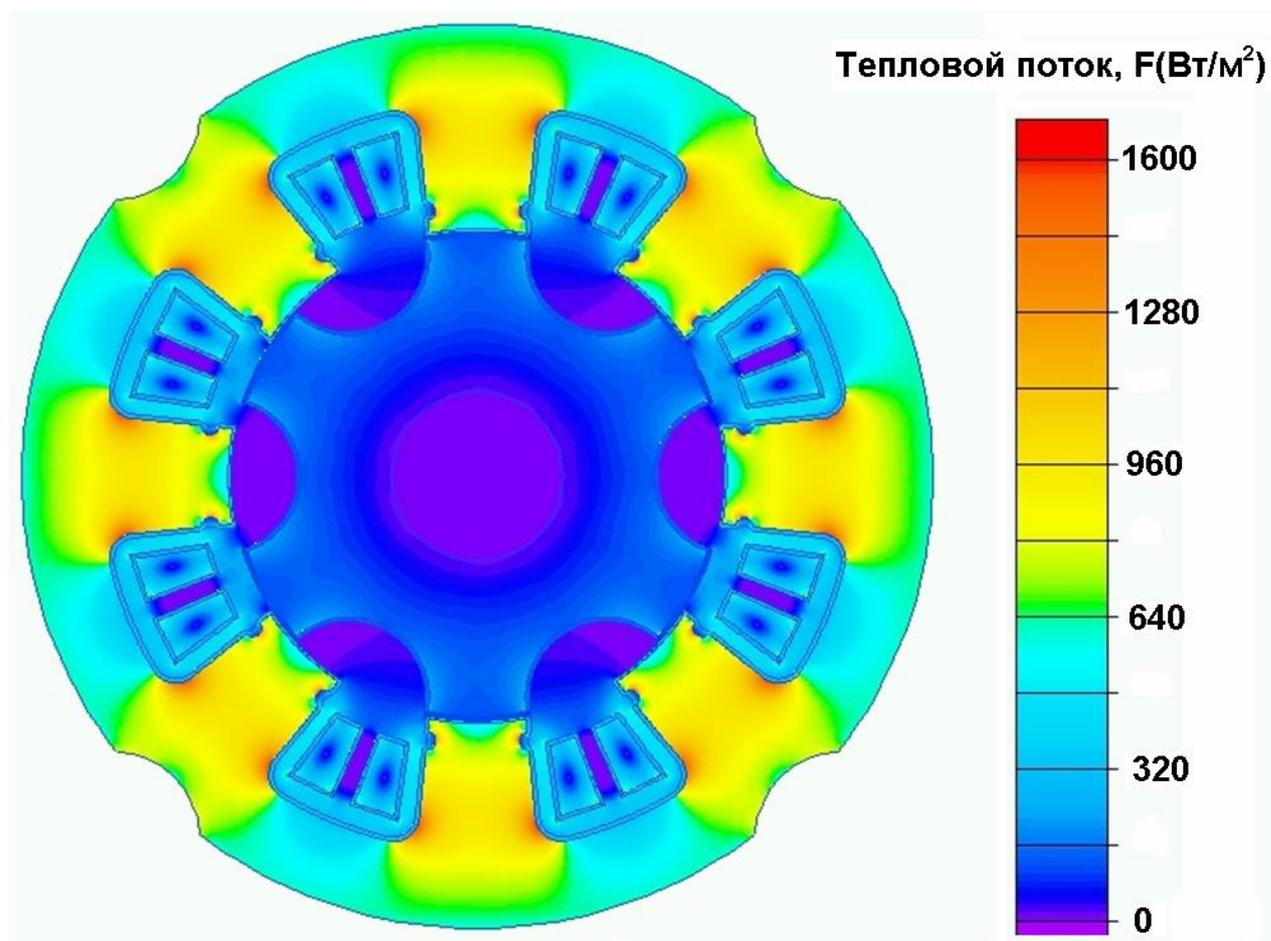


Рис. 7. Распределение теплового потока в ЭМП ВРД

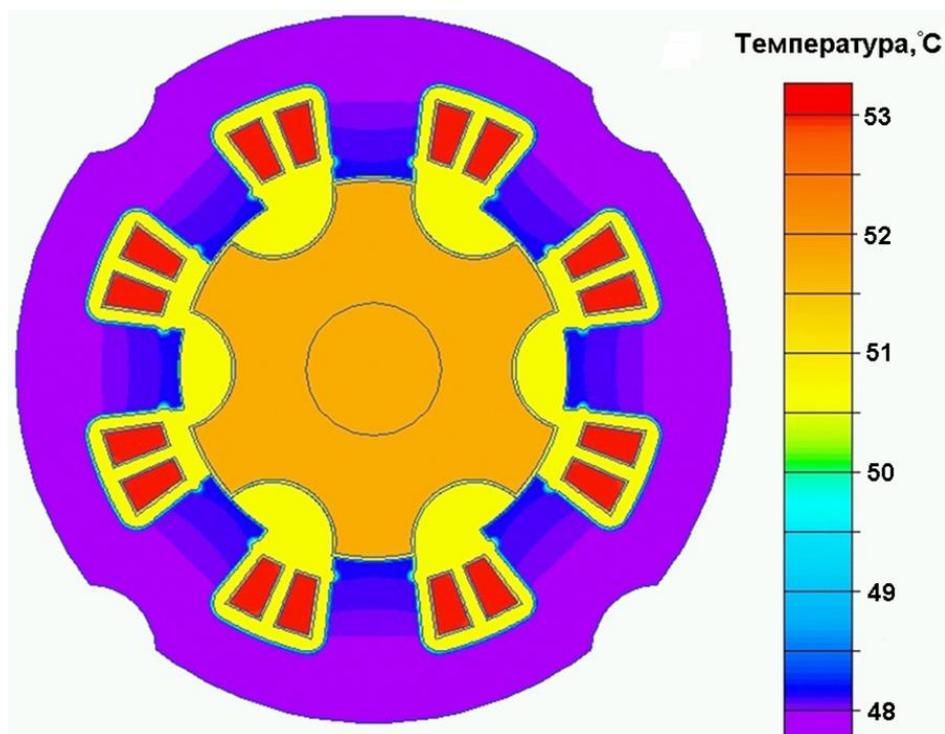


Рис. 8. Распределение температуры в ЭМП ВРД

Экспериментальная проверка результатов моделирования

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

В эксперименте частота вращения поддерживалась постоянной и составляла 3000 об/мин. ВРД нагружен на постоянную нагрузку 0.02 Н·м. Напряжение питания 24.5 В, при этом потребляемый ток от источника составляет 0.71 А.

Эксперимент проводился в течении 40 минут, при этом температура ЭПМ установилась через 25 минут с момента начала эксперимента. Значения температур от времени приведено в таблице 2, на рис. 9 показан график изменения температуры от времени. При эксперименте 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
30	50	54.5
35	50	54.5
40	50	54.5

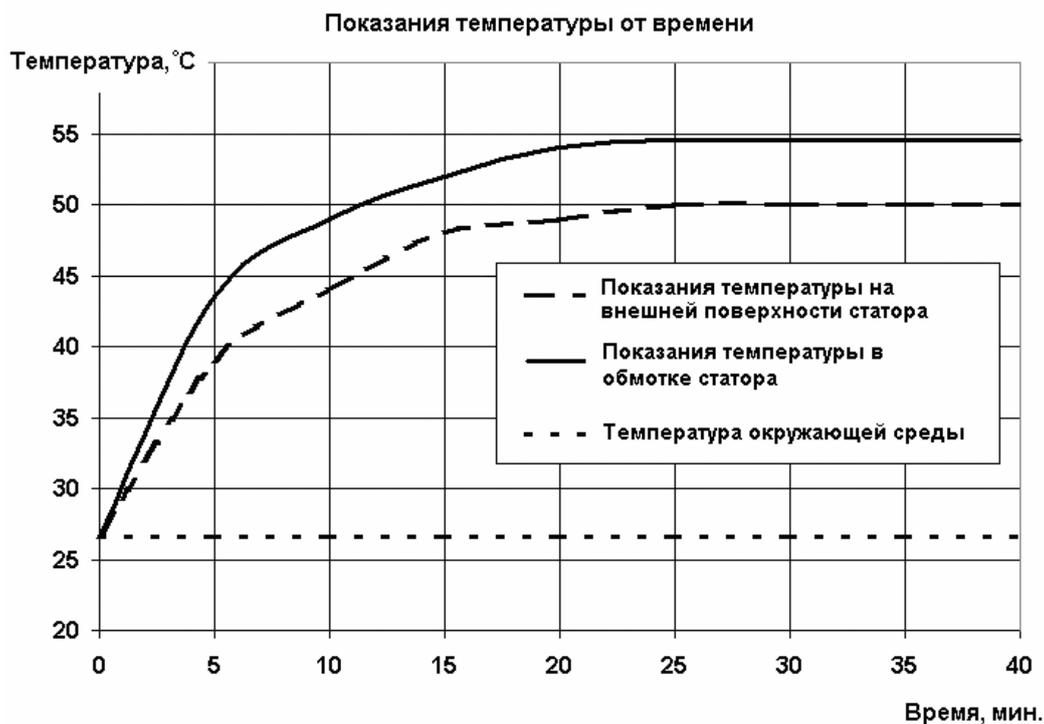


Рис. 10. Изменение температуры датчиков от времени работы

Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования в ELCUT

В таблице 3 приведено сравнение установившихся температур, как внешней поверхности статора, так и в обмотке при математическом моделировании и эксперименте.

Таблица 3.

	Внешняя поверхность статора	Обмотка статора
Эксперимент, °C	50	54.5
Моделирование в ELCUT, °C	48	53
Относительная погрешность, %	4	3

Выводы

Результаты математического моделирования стационарного теплового поля с использованием ELCUT и физического эксперимента достаточно близки. Отличие между ними не превышает 4 %, что свидетельствует о высокой эффективности системы моделирования тепловых полей, реализованной в программном продукте ELCUT.

Список литературы

1. 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
2. Описание вентильного электропривода SRM-57-100 // источник: <http://www.ukrainemotors.com/>
3. 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.
4. 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.
5. Гандшу В.М. / Особенности расчета нагрева электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT // источник: <http://elcut.ru/articles/gandshou/block.pdf>
6. Описание возможностей программы ELCUT // источник: http://elcut.ru/feat_r.htm
7. David Meeker. User's Manual. Fenite Element Method Magnetics. Version 4.2 / David Meeker // source: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>