

УДК 621.313

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

**Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников**

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

*Методом численного моделирования электромагнитных и тепловых полей определены наиболее нагретые участки радиального электромагнитного подшипника и предложены рекомендации по снижению их температуры до допустимого уровня. Приведены картины температурных полей для подшипников в бескорпусном исполнении и подшипников с алюминиевым корпусом и ребрами охлаждения. Для подшипников, имеющих корпус, определены размеры и количество ребер охлаждения, обеспечивающие заданный перегрев наиболее нагретой части обмотки.*

**Ключевые слова:** радиальный электромагнитный подшипник, вихревые токи, температурное поле.

Электромагнитные подшипники (ЭМП) в устройствах подвеса быстроходных роторов обладают кроме известных преимуществ и рядом недостатков, основным из которых является большая масса и габариты по сравнению с традиционными подшипниками скольжения и качения [1].

Снижение объема и массы ЭМП при заданной грузоподъемности возможно лишь за счет увеличения магнитной индукции в зазоре и плотности тока в обмотках, что приводит к увеличению нагрева активных частей подшипника. Поэтому определение допустимых значений тепловых нагрузок – актуальная задача совершенствования ЭМП.

Для решения этой задачи необходимо:

- выявить все источники тепла и определить объемные мощности тепловыделения в активных элементах ЭМП;
- разработать геометрическую модель ЭМП и задать ее физические свойства;
- при принятых допущениях рассчитать температурное поле машины и определить наиболее нагретые точки;
- предложить конкретные меры, если это необходимо, для снижения нагрева обмоток.

Допущения, принятые в исследовании:

- ЭМП представлен двумерной геометрической моделью;
- нагрев лобовых частей обмотки учитывается традиционными интегральными методами [1];
- параметры теплоотвода постоянны и изотропны (коэффициент теплопроводности  $\lambda_x = \lambda_y = const$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha = const$ ).

Математическая модель ЭМП представляет собой плоскопараллельное описание радиального подшипника с разбиением на расчетные блоки с заданными

---

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

*Юрий Николаевич Иванников, магистрант.*

физическими свойствами и сетку конечных элементов. Геометрия расчетной области кроме изображения поперечного сечения подшипника включает и область воздушного пространства вокруг статора. Свойства магнитопроводов статора и ротора, выполненных из электротехнической стали, задаются кривыми намагничивания. Для воздуха, обмотки и изоляции задается относительная магнитная проницаемость  $\mu=1$ . Источниками поля служат токи в обмотках, которые задаются средней плотностью тока в пазах статора. Для границы расчетной области воздушного пространства вокруг подшипника задаем значения магнитного потенциала  $A_0 = 0$ , что соответствует условию отсутствия внешних магнитных полей. Данное свойство определяет внешние граничные условия электромагнитной задачи.

При решении тепловой задачи физические свойства стальных участков и воздуха внутри машины задавались соответствующими коэффициентами теплопроводности и коэффициентами теплоотдачи, свойства обмотки – через коэффициент эквивалентной теплопроводности, учитывающий толщину изоляции, пропитку и коэффициент заполнения медью [4]. Наружный воздух моделировался постоянным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha = 16 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$  без учета обдува и конвекции, что соответствует наиболее тяжелому режиму охлаждения корпуса.

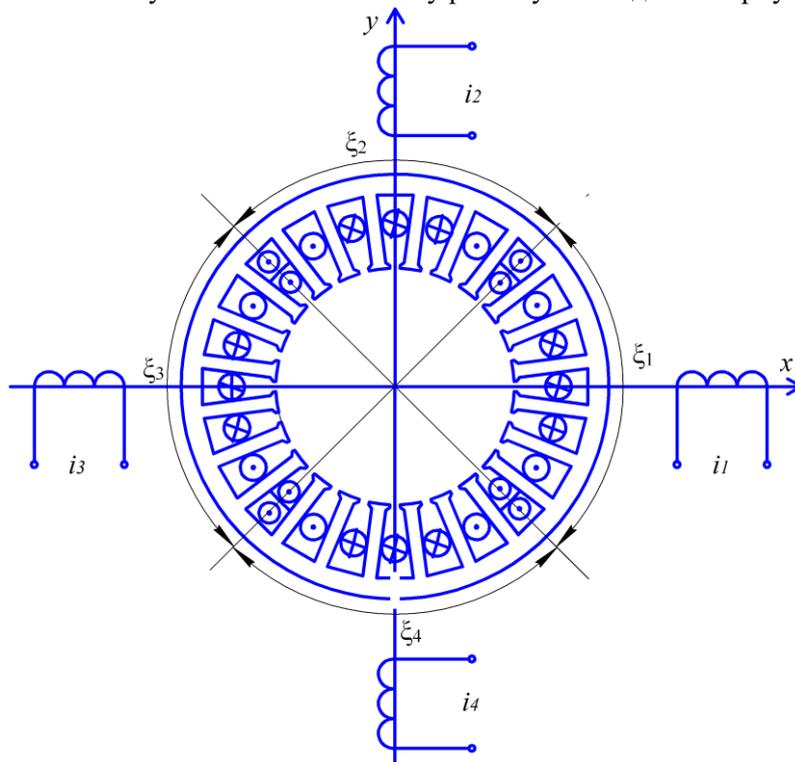


Рис. 1. Геометрическая модель радиального ЭМП:  
 $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  и  $\xi_4$  – токовые зоны подшипника

Задача решалась для установившегося режима (стационарная задача) с фиксированной температурой на границе области расчета 313 К (+40 °С), соответствующей требованиям технического задания.

Плоскопараллельная геометрическая модель (рис. 1) сформирована для радиального ЭМП со следующими номинальными параметрами:

- номинальная грузоподъемность  $F = 120, \text{ Н}$ ;

- номинальная частота вращения  $n = 1500$ , об/мин;
- число полюсов  $2p = 8$ ;
- номинальное напряжение питающей сети  $U = 24$ , В;
- число зубцов статора  $Z_1 = 24$ .

Внутренними источниками тепла радиального ЭМП служат электрические потери в обмотках и потери от вихревых токов, наводимых в сердечнике ротора при его вращении в магнитном поле.

Расчет электрических потерь в обмотке  $\Delta p_{y\delta}$  проводился исходя из предположения, что основная механическая нагрузка радиального ЭМП – вес ротора. При этом наиболее нагруженной является токовая зона  $\xi_2$  (ток  $i_2 = i_{\max}$ ) – вертикальная ось модели.

Плотности тока в остальных токовых зонах соответственно принимались:  $j_2 = j_{\max}$ ,  $j_1 = j_3 = 0,5j_{\max}$ ,  $j_4 = 0,15j_{\max}$ .



Рис. 2. Кривая магнитного потенциала на поверхности ротора

Такому распределению токовых нагрузок соответствует несинусоидальная кривая магнитного поля в зазоре. Задача исследования – рассчитать значения магнитного поля в зазоре, например в виде разложения в ряд Фурье кривой магнитного потенциала  $A_0 = f(x)$ . Данная задача относится к расчету магнитного поля переменных токов и была решена методом конечных элементов (МКЭ) в программной среде *Elcut*. Результаты решения представлены на рис. 2 и в табл. 1 в виде амплитуд и фаз наиболее значимых гармоник кривой магнитного потенциала в зазоре ЭМП. Величины амплитуд гармоник более высокого порядка, чем выбранные в табл. 1, не превышают 3 %, поэтому исключены из анализа.

Так как глубина проникновения вихревых токов во вращающемся роторе при относительно высоких частотах перемагничивания (в рассматриваемом при-

мере  $f_{\text{пер}} \frac{p \cdot n}{60} = \frac{4 \cdot 1500}{60} = 100$ , Гц) составляет величину, не превышающую не-

скольких миллиметров, то и выделение тепла от вихревых потерь происходит только в поверхностном слое. Для уточнения толщины этого слоя был проведен расчет тепловыделения в роторе при питании обмотки статора синусоидальным током частотой 100 Гц. Результаты расчета представлены на графике (рис. 3). Глубина слоя, в котором выделяется 98 % тепла, составила 0,6 мм.

Таблица 1

**Параметры основных гармоник разложения кривой магнитного потенциала  
в воздушном зазоре ЭМП**

№ гармоники	Амплитуда×10 <sup>-4</sup>	Фаза
1	6,96	8
2	3,19	-74,4
3	3,7	-154,9
5	3,05	36,5
7	3,9	-126,1
8	4,95	151,4
10	0,9531	167,3
15	0,803	115,8
24	0,961	-85,1

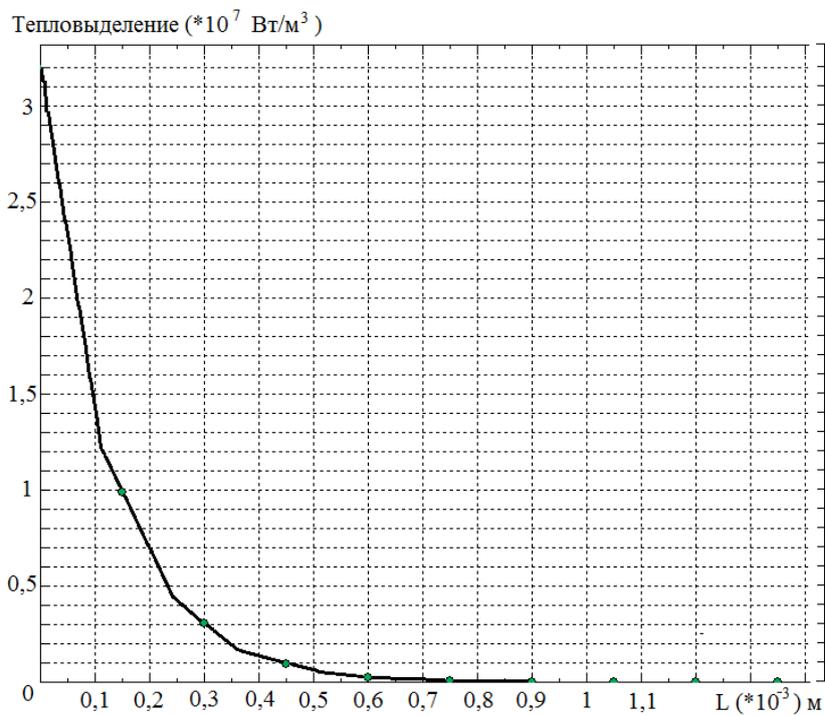


Рис. 3. Глубина проникновения теплового потока

Для уточнения картины тепловыделения в поверхностном слое ротора при несинусоидальном поле в зазоре зададим магнитный потенциал на поверхности ротора уравнением (1), где амплитуды и фазы  $A_0$  соответствует полученным ранее в электромагнитном расчете (см. табл. 1):

$$\begin{aligned}
 A_0 = & [11,9 + 6,96 \cdot \sin(628 \cdot t + 8) + 3,19 \cdot \sin(2 \cdot 628 \cdot t - 74,4) + \\
 & + 3,7 \cdot \sin(3 \cdot 628 \cdot t - 154,9) + 3,05 \cdot \sin(5 \cdot 628 \cdot t - 36,5) + \\
 & + 3,9 \cdot \sin(7 \cdot 628 \cdot t - 126,1) + 4,95 \cdot \sin(8 \cdot 628 \cdot t + 151,4) + \\
 & + 0,9531 \cdot \sin(10 \cdot 628 \cdot t + 167,3) + 0,803 \cdot \sin(15 \cdot 628 \cdot t + 115,8) + \\
 & + 0,961 \cdot \sin(24 \cdot 628 \cdot t - 85,1)] \cdot 10^{-4}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Расчет температурного поля проводился для частоты вращения  $n=1500$  об/мин. В результате расчета МКЭ в программной среде *Elcut* была получена картина температурного поля, представленная на рис. 4. На диаграмме (рис. 5) показана кривая распределения температуры по оси  $y$  ЭМП. Сечение проходит по наиболее нагретому пазу. Температура наиболее нагретой точки составила 408 К (перегрев относительно температуры окружающей среды  $T_{oc} = 40^0 C$  составил  $\Delta T = 95^0 C$ ).

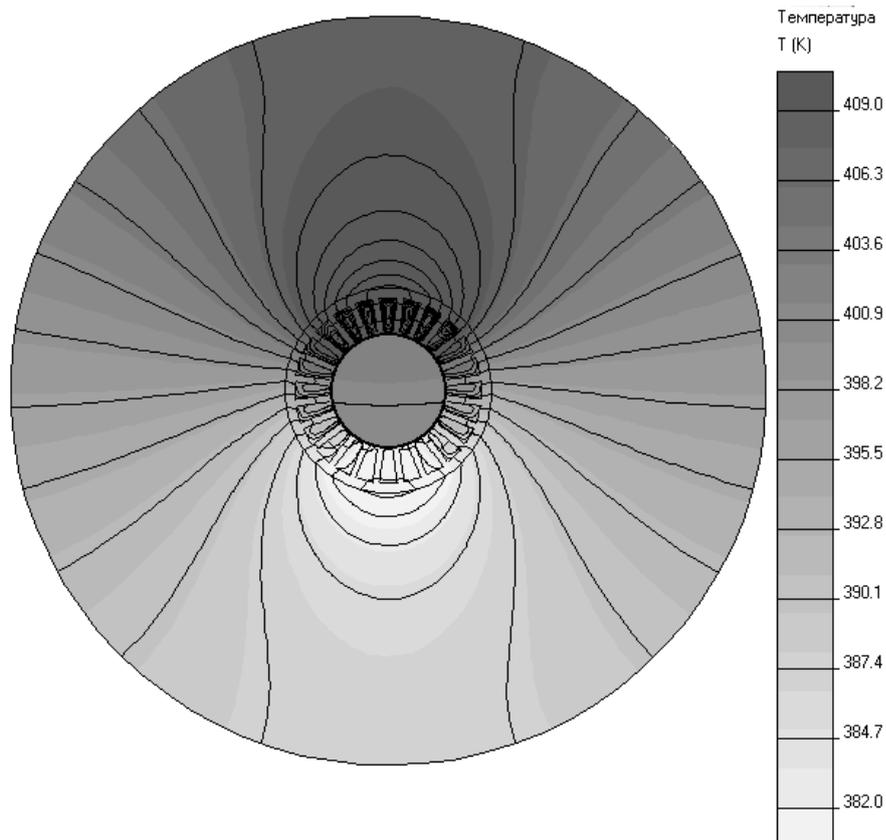


Рис. 4. Картина температурного поля РЭМП при несинусоидальном магнитном поле в зазоре

Для класса изоляции *B* допустимая рабочая температура составляет 130 °C (403 К). Следовательно, если не снижать значения электромагнитных нагрузок, то для обеспечения допустимого перегрева необходимо принимать конструктивные меры для увеличения интенсивности теплоотвода. К таким мерам в первую очередь относится применение корпуса из материала с высокой теплопроводностью и теплоотдающей способностью. В электрических машинах для этих целей применяют гладкий или ребренный алюминиевый корпус.

Результаты расчета теплового поля для ЭМП с алюминиевым корпусом различной толщины и конструкции представлены в табл. 2.

На рис. 6 показано температурное поле машины с алюминиевым корпусом толщиной  $\Delta_{Al} = 2$  мм, 18 ребрами охлаждения высотой 5 мм и шириной 2 мм.

Были проведены расчеты для различных корпусов, как гладких, так и с ребрами охлаждения (см. табл. 2).

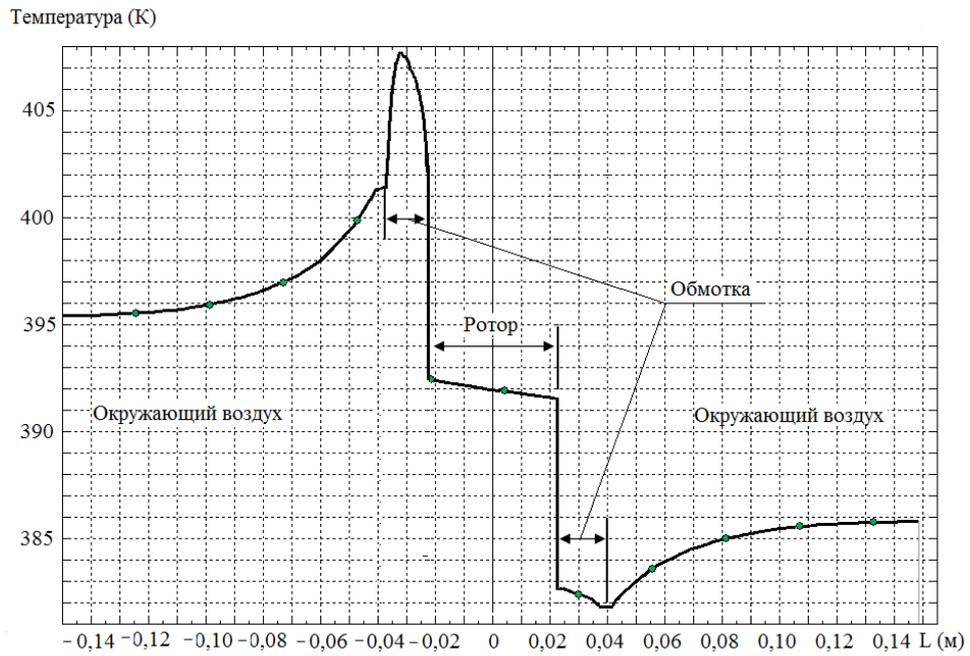


Рис. 5. Распределение температуры по сечению РЭМП

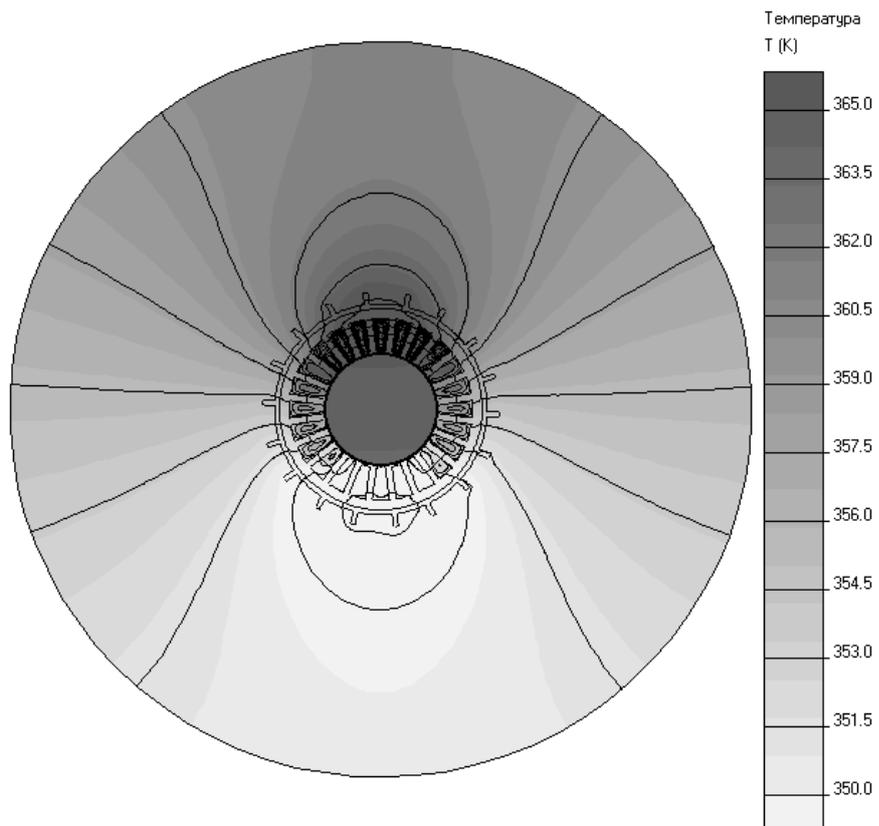


Рис. 6. Тепловое поле ЭМП с алюминиевым корпусом и ребрами охлаждения

Таблица 2

## Температура наиболее нагретых точек ротора и обмотки статора

№ варианта	Толщина стенки корпуса	Высота ребра, мм	Толщина ребра, мм	Т ротора, К	Т обмотки, К
0	0	0	0	392,5	408
1	2	0	0	380,8	389,5
2	3	0	0	379,2	387,1
3	2	5	2	354,1	362,9
4	2	7	2	349,3	358
5	2	5	1	354,2	362,5

## Выводы:

В результате математического моделирования электромагнитных и тепловых процессов, происходящих в радиальном электромагнитном подшипнике при статическом нагружении опоры, установлено:

– наиболее нагруженным по перегреву является центральный паз второй токовой зоны (ось  $y$ );

– глубина зоны выделения тепла от действия вихревых токов в сердечнике ротора составляет 0,6 мм;

– для снижения перегрева обмотки статора в наиболее нагретой зоне до допустимого уровня необходимо применять гладкий или оребренный корпус из алюминиевых сплавов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. Санкт-Петербург: Политехника, 2003. – 206 с.
2. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.: ил.
3. Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
4. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.

## TEMPERATURE FIELDS MODELING OF THE RADIAL ELECTROMAGNETIC BEARING

*Yu. A. Makarichev, Yu. N. Ivannikov*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The most heated areas of the radial magnetic bearings identified by numerical simulation of the electromagnetic and thermal fields, recommendations to reduce them to an acceptable level were presented. Pictures of temperature fields for bearings in the plug-in system, with aluminum body and cooling fins were given. The size and the number of cooling fins for bearings with a body are defined.*

**Keywords:** *the radial electromagnetic bearing, vortex currents, temperature field.*

---

*Yu. A. Makarichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Yu. N. Ivannikov, Graduate student.*