

*Л.П. ГАЛАЙКО*, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ", Харьков  
*М.В. ПИПИЧ*, магистрант, НТУ "ХПИ", Харьков

## **ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОБМОТОК СТАТОРА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

In the paper computation of the temperature field in stator windings of DC motor intended for the rotating furnace of 630 kW are resulted using the final elements method realized in FEMM 4.2. Comparison of the results by final elements method and classical one are got up.

В статье приведен расчет температурного поля обмоток статора двигателя постоянного тока для вращающейся печи мощностью 630 кВт методом конечных элементов в программе FEMM 4.2. Приведены результаты сравнения результатов расчета методом конечных элементов и классическим методом.

У статті приведений розрахунок температурного поля обмоток статора двигуна постійного струму для печі, що обертається, потужністю 630 кВт методом кінцевих елементів в програмі FEMM 4.2. Приведено результати порівняння результатів розрахунку методом кінцевих елементів і класичним методом.

**Введение.** При проектировании электрической машины наравне с механическими и магнитными ограничениями определяющими являются также тепловые ограничения, для определения которых необходимо знать значение температур в каждой точке электрической машины. Такие сведения позволяют определить места перегрева, которые и становятся наибольшей опасностью в тепловом отношении – в первую очередь перегрев, и как следствие преждевременный выход из строя изоляции. Также знание развернутой картины температурного поля позволяет провести необходимые конструктивные изменения для повышения эффективности системы охлаждения и уменьшения нормы расхода материалов (при проектировании без детального теплового расчета необходимо задаваться большими тепловыми запасами) и уменьшить массогабаритные показатели электрической машины.

Классические методы расчета не дают полной картины теплового поля. Наиболее распространенный метод тепловых эквивалентных схем замещения дает возможность определить средние значения температур отдельных элементов электрической машины, но не максимальные значения.

В настоящее время с развитием компьютерных технологий все шире распространяется метод конечных элементов [3]. Этот метод является самым эффективным для расчета тепловых, электромагнитных полей и полей механических напряжений. Но он еще не приобрел широкого распространения на предприятиях электромашиностроительной отрасли.

**Цель работы:** провести исследование температурного поля обмоток статора машины постоянного тока, провести сравнение результатов расчета по методу конечных элементов и по другим методам и сделать вывод о целесообразности применения метода конечных элементов для таких расчетов.

**Постановка задачи.** Объект исследования - это двигатель постоянного тока серии 4П со следующими номинальными данными: мощность 630кВт, число пар полюсов 3, частота вращения 630/1000 об/мин, режим работы двигателя продолжительный S1, исполнение горизонтальное, класс изоляции обмотки возбуждения F, вентиляция принудительная.

Машина защищенного исполнения. Охлаждение осуществляется посторонним устройством, благодаря которому воздух нагнетается вовнутрь машины. Отдельные части машины охлаждаются независимо одна от другой. Это позволяет рассматривать отдельно их температурные поля.

В данной работе выполнен тепловой расчет магнитной системы двигателя методом конечных элементов (МКЭ) в программе FEMM 4.2. Эта программа позволяет рассматривать только плоскопараллельные задачи, что накладывает некоторые ограничения, которые необходимо учитывать. Длина главных и добавочных полюсов намного меньше чем длина станины. Для учета этого искусственно увеличиваем коэффициент теплоотдачи станины пропорционально соотношению длины главного полюса и станины. Также в данной задаче считается, что тепловые процессы по всей длине машины одинаковые.

Тепловые процессы магнитной системы в машине имеют симметричный характер относительно осей полюсов, поэтому расчетная модель представляет собой половину полюсного деления.

Геометрия расчетной модели построена в программе КОМПАС 3D и указана на рис. 1. Расчетную модель разбиваем на 10 блоков. Для каждого блока задаем значение коэффициента теплопроводности. При протекании тока через обмотки возбуждения (ОВ), обмотки добавочных полюсов (ОДП) и компенсационной (КО) в них выделяется тепло.

То есть, они выступают в качестве источников теплоты. Для расчета были найдены значения удельных потерь для соответствующих

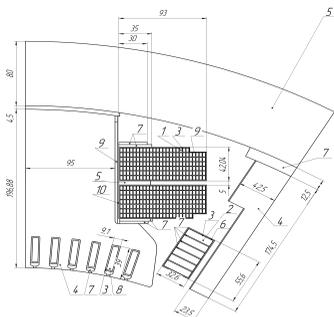


Рис. 1. Геометрия расчетной модели.

блоков. Вышеупомянутые данные указаны в таблице 1.

Для выполнения расчета необходимо задание граничных условий. Используем граничные условия 3-го рода – конвекция. Задаем коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  и температуру охлаждающего воздуха. Температура окружающей среды была принята  $40^{\circ}\text{C}$ . Температура охлаждающего воздуха определяется как сумма температуры окружающей среды и половина превышения температуры охлаждающего воздуха. Эти коэффициенты указаны в табл. 2.

Таблица 1 – Свойства блоков расчетной модели

Номер блока	Материал	Значение коэффициента теплопроводности, $\lambda$ , Вт/(м К)	Значение удельных потерь, Вт/м <sup>3</sup>
1 (ОГП)	медь	390	147526
2 (ОДП)	медь	390	260764,97
3	витковая изоляция	0,19	
4	сталь электротехническая марки М800-100А	25	
5	сталь Ст3	32,5	
6	стеклотекстолит	0,3	
7	текстолит	0,25	
8 (КО)	медь	390	497764
9	корпусная изоляция	0, 19	
10	воздух	0,03	

Таблица 2 – Граничные условия расчетной модели

Название границы	Температура, $T_0$ , $^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
Наконечник главного полюса – охлаждающий воздух (о.в.)	50,2	91,5
Катушка главного полюса – о.в.	50,2	46
Катушка добавочного полюса – о.в.	50,2	57
Станина – окружающая среда	40	30

**Анализ результатов расчета.** В результате расчета была получена картина распределения температурного поля в расчетной области, которая указана на рис. 2. На этом рисунке указаны векторы тепловых потоков и

изотермы.

**Анализ температурного поля обмотки возбуждения.** Самое большое значение температуры в обмотке возбуждения машины. Среднее значение температуры составляет  $119^{\circ}\text{C}$ , максимальное  $143,05^{\circ}\text{C}$ . По ширине катушки наблюдается значительный перепад температуры. Это обусловлено большой разницей условий теплообмена вблизи сердечника главного полюса и на поверхности катушки. Перепад температуры составляет  $50^{\circ}\text{C}$ , что мы и видим на рис. 3 (на рисунке показана нижняя катушка, линия на уровне 2-го ряда витков). Тепло от катушки в большей степени рассеивается во внутренний воздух, который охлаждает машину. Это обусловлено тем, что между главным полюсом и катушкой возбуждения есть изоляция и воздушный зазор, который возникает вследствие технологических допусков при их изготовлении. Уменьшение воздушного зазора на значительным образом влияет на распределение тепловых потоков, это приводит к увеличению теплового потока к сердечнику, и как следствие, уменьшает температуру катушки возбуждения. Если уменьшить зазор до нуля, то температура катушки уменьшится на  $10^{\circ}\text{C}$ .

**Анализ температурного поля компенсационной обмотки.** Максимальное значение температуры витков компенсационной обмотки составляет  $89^{\circ}\text{C}$ , среднее  $86^{\circ}\text{C}$ .

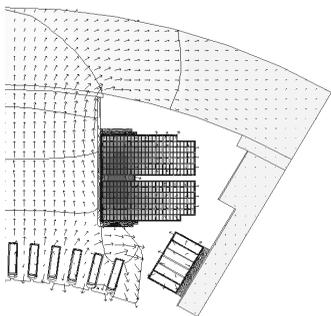


Рис. 2. Распределение температурного поля в расчетной области.

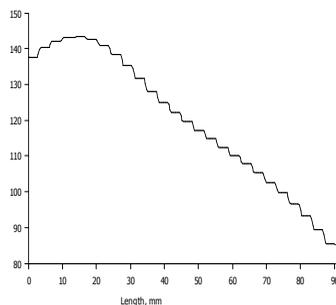


Рис. 3. Распределение температуры в катушке возбуждения по ширине.

Температуры всех стержней одинаковые за исключением крайних. Распределение температуры по ширине главного полюса указано на рис. 4. Как видно на рис. 4, наблюдается значительный перепад в изоляции компенсационной обмотки. Тепло от потерь в дугах компенсационной обмотки приводим к стержням.

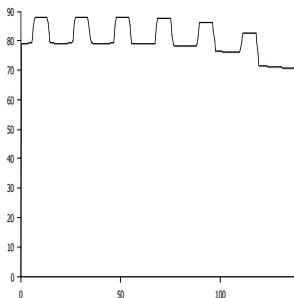


Рис. 4. Распределение температуры по ширине главного полюса.

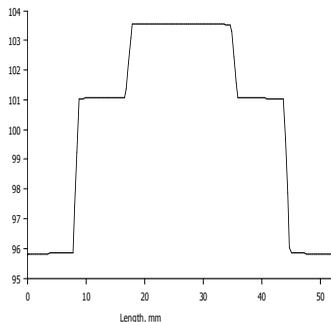


Рис. 5. Распределение температуры по высоте добавочного полюса.

**Анализ температурного поля обмотки дополнительных полюсов.** Средняя температура обмотки добавочных полюсов составляет  $100^{\circ}\text{C}$ . Для выбранного класса изоляции это довольно низкая температура. Максимальное значение температуры составляет  $103,5^{\circ}\text{C}$ . Распределение температуры по высоте катушки добавочного полюса указано на рис. 5.

**Сравнение результатов расчета методом конечных элементов (МКЭ) и классическим методом.**

Для сравнения был выполнен расчет классическим методом согласно [1]. Значение средних температур для обоих методов сведено в табл. 3.

Таблица 3 – Сравнение средних температур обмоток для разных методов

Обмотка	Классический метод	МКЭ
Обмотка главных полюсов, $T, ^{\circ}\text{C}$	116,1	119
Обмотка добавочных полюсов $T, ^{\circ}\text{C}$	92,51	86
Компенсационная обмотка, $T, ^{\circ}\text{C}$	97,46	100

**Выводы:** 1. Метод конечных элементов позволяет определить максимальные значения температуры в обмотках, при этом дает такую же точность результатов для средней температуры, что и классический метод.

2. При помощи метода конечных элементов мы получаем результат, используя меньшее количество экспериментальных данных, что делает метод незаменимым при проектировании новых машин.

**Список литературы:** 1. Курочкин М.Н. Проектирование электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1965. – 350 с. 2. Борисенко А.И., Костиков О.Н.,

*Яковлев А.И.* Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 297 с. **3.** *Галайко Л.П., Гаевская Н.А.* Анализ теплового состояния вентильно-индукторного двигателя для рудничного электровоза с помощью метода конечных элементов. – Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. № 48. – С. 65-67.

*Поступила в редколлегию 06.02.2012*

*Рецензент д.т.н., проф. Милых В.И.*