

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ FEMM И ПРЕОДОЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.И.Милых, д.т.н., И.В.Поляков, к.т.н., Н.В.Полякова

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ», кафедра «Общая электротехника»
Тел. (0572) 40-04-27, факс (0572) 40-06-01, E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Е.И. Штангеев, к.т.н.

НПО «Электротяжмаш», Украина, 61055, г. Харьков, пр. Московский, 299. Тел. (0572) 95-66-12

Розглянуто загальні можливості та проблеми використання програми FEMM (Finite Element Method Magnetics), що розташована на сайті <http://femm.berlios.de>. Тестування програми проведено на прикладі електричної машини складної конструкції шляхом порівняння розрахункових і дослідних даних. Запропоновано практичний варіант подолання однієї з виявлених проблем розрахунку магнітного поля, що полягає в необхідності урахування різномірних осевих довжин ділянок магнітопровода електричних машин.

Рассмотрены общие возможности и проблемы использования программы FEMM (Finite Element Method Magnetics), размещенной на сайте <http://femm.berlios.de>. Тестирование программы проведено на примере электрической машины сложной конструкции посредством сопоставления расчетных и экспериментальных данных. Предложен практический вариант преодоления одной из выявленных проблем расчета магнитного поля, что связано с необходимостью учета разнородных осевых длин участков магнітопровода электрических машин.

ВВЕДЕНИЕ

При расчете электромагнитных полей в устройствах с неоднородной сложной структурой получили распространение численные методы [1-3]: метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ). Второй считается более эффективным при наличии множественных границ раздела сред, не совпадающих с координатными линиями, однако этот метод имеет значительно более сложную программную реализацию. В настоящее время последняя проблема практически снята, так как появились готовые программные комплексы со встроенными редакторами подготовки исходных данных для расчета магнитных полей устройств произвольной структуры.

Из программ, ориентированных на решение полевых задач МКЭ в двумерных областях, привлекает внимание программа FEMM [4], размещенная на общедоступном сайте <http://femm.berlios.de>. Уровень реализации программы и интерфейса таковы, что пользователю достаточно самых общих представлений о МКЭ и можно обойтись без знания алгоритмических языков программирования.

Несмотря на достаточную простоту работы в среде FEMM и возможность эффективного решения прикладных задач, основанных на расчетах электромагнитных полей, данная программа еще не получила должного распространения, за редким исключением - например, [5,6]. Можно предположить, что виной тому недостаточная информированность об этой программе и ее возможностях, а также известное недоверие к новому и неизведанному, неуверенность в достоверности получаемых результатов. Эти обстоятельства ставят потенциального пользователя перед дилеммой: стоит ли делать умственные усилия и тратить время на освоение нового программного продук-

та, либо продолжать эксплуатировать или разрабатывать собственные программы.

Целью данной статьи является попытка помочь решить эту дилемму. А именно, описать общие возможности FEMM, провести ее расчетно-экспериментальное тестирование на примере электрической машины (ЭМ) достаточно сложной конструкции, выявить проблемы пользования и решения прикладных задач, а также показать пути преодоления наиболее существенной из выявленных проблем расчета магнитных полей и электромагнитных параметров электрических машин.

Достижение указанной цели представляется вполне оправданным, так как программы рассматриваемого рода могут в корне изменить подходы к электромагнитным расчетам электрических машин, аппаратов и других электротехнических устройств. Многочисленные аналитические и приближенные методики расчета их электромагнитных параметров могут быть заменены единой расчетной методикой на основе численного решения полевых задач в среде FEMM или аналогичных программных комплексов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ FEMM

FEMM – это пакет программ для численного решения полевых задач в двумерных областях, выделяемых в устройствах с плоскопараллельной или аксиально-осевой симметрией. Конкретно, на основе МКЭ обеспечены расчеты магнитостатических полей и гармонически изменяющихся электромагнитных полей в линейных и нелинейных средах, а также электростатических полей в линейных средах.

FEMM подразделяется на 3 основные части:

1. Интерактивная оболочка Femm.exe является

связующим пакетом предрасчетных и послерасчетных операций. Здесь обеспечиваются геометрические построения рассматриваемых объектов, причем в декартовых или полярных координатах. Геометрия исследуемого объекта может быть импортирована в FEMM еще и из других графических пакетов (например, AutoCAD или CorelDraw).

Оболочка обеспечивает задание свойств материалов, в том числе кривых намагничивания ферромагнетиков, а также граничных условий на внешних и внутренних границах в сформированной области. Это условия Дирихле, Неймана, смешанные условия (комбинация двух предыдущих), условия на границе со скин-эффектом, условия периодичности и антипериодичности, специальные условия на внешних незамкнутых границах.

Полученные решения отображаются на фоне области расчета (по выбору) силовыми линиями, в векторной форме, тонированием по уровням поля. Для заданных линий строятся графики, характеризующие распределения плотности поля. Можно просматривать параметры поля в любых точках области, а также оценивать ряд интегральных величин в определенных ее зонах: магнитные потоки, силы, индуктивности, энергию, магнитные напряжения и др.

2. Программа `triangle.exe` разбивает сформированную область решения на большое количество треугольных элементов, что соответствует сути МКЭ. Наряду с внутренне обусловленным характером триангуляции области, могут быть реализованы и пожелания пользователя относительно необходимой степени дискретизации локальных подобластей, а также допустимой формы треугольников.

3. Программы `fkern.exe` для магнитных и `belasolv` для электростатических полей связывают решаемую задачу с соответствующей математической моделью на основе системы уравнений Максвелла и решают эту систему в числовой форме с учетом заданных свойств материалов и граничных условий.

В интерактивную оболочку интегрирован алгоритмический язык Lua, с помощью которого можно программным путем (в отличие от ручного) формировать, корректировать и анализировать геометрию области расчета, а также организовывать выдачу и оценку результатов расчетов, вводя необходимые уравнения или математические выражения.

ОБЪЕКТ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ

Для иллюстрации возможностей программы FEMM используется тяговый двигатель постоянного тока (ДПТ), уже рассматривавшийся в [7]. Его электромагнитная система представлена на рис.1 поперечным сечением в пределах половины полюсного деления. Этот ДПТ имеет следующие основные параметры: мощность 413 кВт; число пар полюсов $p=2$; диаметр якоря – 493 мм; немагнитный зазор является эксцентричным: от 7 до 18 мм; число пазов якоря - 58; расчетная активная длина якоря $l_a=380$ мм; номинальный ток обмотки возбуждения $I_{fN} = 865$ А, ее число витков на полюс – 20.

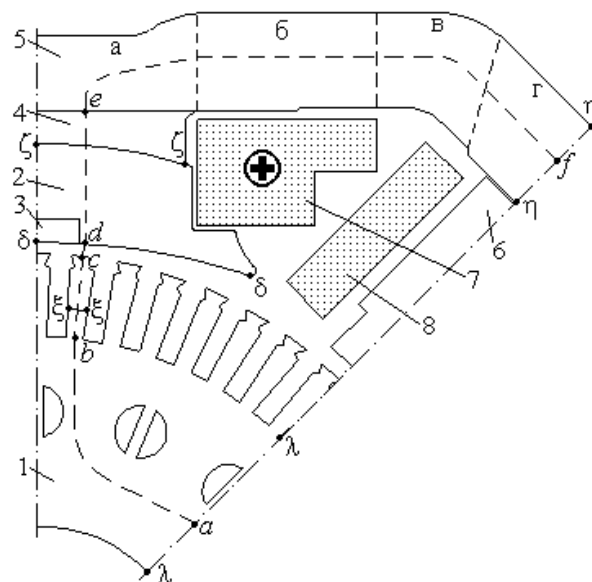


Рис.1. Расчетная модель ДПТ

Таблица 1

k	Название участка	l_{Fe} , мм	K_{Fe}	Марка стали	$k_{п}$	
1	СЯ	380	0,955	2211	0,97	
2	СГП	390	0,96	Ст.2	1	
3	Вставка СГП	390	1	Ст.2	1	
4	Отлив станины над СГП	480	1	Ст.3	1	
5	Станина (разбивка на локальные зоны)	а	480	1	Ст.3	1,23
		б	530			1,36
		в	570			1,46
		г	620			1,59
6	СДП	400	1	Ст.3	1,03	

Разнородность структуры магнитопровода ДПТ по аксиальной координате представлена в табл.1, где обозначены: k – номер участка, показанный на рис.1; l_{Fe} – длина активной части сердечника; K_{Fe} – коэффициент заполнения сталью. В названиях участков сделаны сокращения: СЯ - сердечник якоря; СГП – сердечник главного полюса; СДП – сердечник добавочного полюса. Станина подразделена еще на четыре локальные зоны (а, б, в, г) с учетом предполагаемого распределения магнитного потока по ее аксиальной длине. На рис.1 еще обозначены: 7 – обмотка возбуждения; 8 - обмотка добавочного полюса.

В качестве тестовых проводились расчеты магнитного поля обмотки возбуждения при варьировании ее тока, результаты которых сравнивались с имеющимися экспериментальными данными.

В отличие от модели на рис.1, достаточно полная минимальная область расчета охватывала полюсное деление ДПТ, так как только в этом случае можно было соблюсти симметрию зубцовой зоны сердечника якоря. Такая модель представлена на рис.2. В FEMM, как это и вообще принято при расчете магнитных полей МКЭ, решение ищется в виде распределения векторного магнитного потенциала (ВМП). В данном случае - при принятой плоскопараллельной симмет-

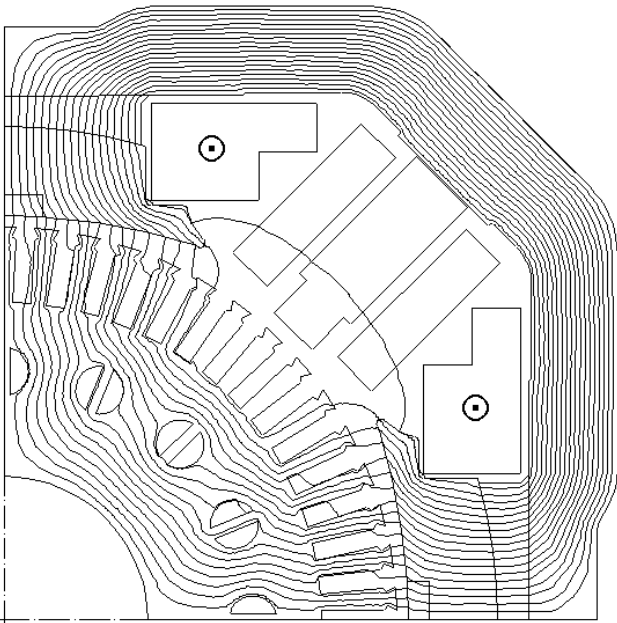


Рис.2. Принятая область расчета с картиной силовых линий магнитного поля возбуждения ДПТ

рии - это его аксиальная составляющая $A_z(r, \varphi)$, где r, φ - полярные координаты. На внешних границах области расчета - за пределами станины, а также на границах, совпадающих с линиями симметрии главных полюсов, для ВМП приняты условия Дирихле

$$A_z(r, \varphi) = 0. \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПО БАЗОВОМУ ВАРИАНТУ FEMM

Сначала расчеты магнитного поля проведены для модели, соответствующей собственным возможностям программы FEMM. Это значит, что магнитное поле во всей области расчета образует единую плоскопараллельную структуру. Фактически все части МПТ, представленные на рис.1 и рис.2, имеют одинаковую аксиальную длину, в качестве которой вынужденно принята и задана для FEMM ранее упомянутая активная длина l_a . Разнородные длины участков магнитопровода программа FEMM учесть не может. Для участков магнитопровода были заданы (введены) кривые намагничивания сталей и коэффициенты заполнения, представленные в табл.1, что в FEMM реализуется достаточно просто.

При автоматической триангуляции в области расчета на рис.2 была нанесена конечно-элементная структура из 6744 узлов и 13284 треугольников. Фрагменты этой структуры даны на рис.3 и рис.4.

Следует заметить, что различные дуги в программе FEMM аппроксимируются совокупностью относительно малых прямых отрезков. Из-за этого здесь порождаются излишне мелкие треугольные элементы и из этих мест (см. рис.4) распространяются излишне подробные конечно-элементные структуры. Поэтому дугообразные линии раздела сред в области расчета целесообразно представлять при возможности допустимым минимумом прямых отрезков.

Расчеты магнитного поля проведены при токах возбуждения I_f , приведенных в табл.2. Каждый из рас-

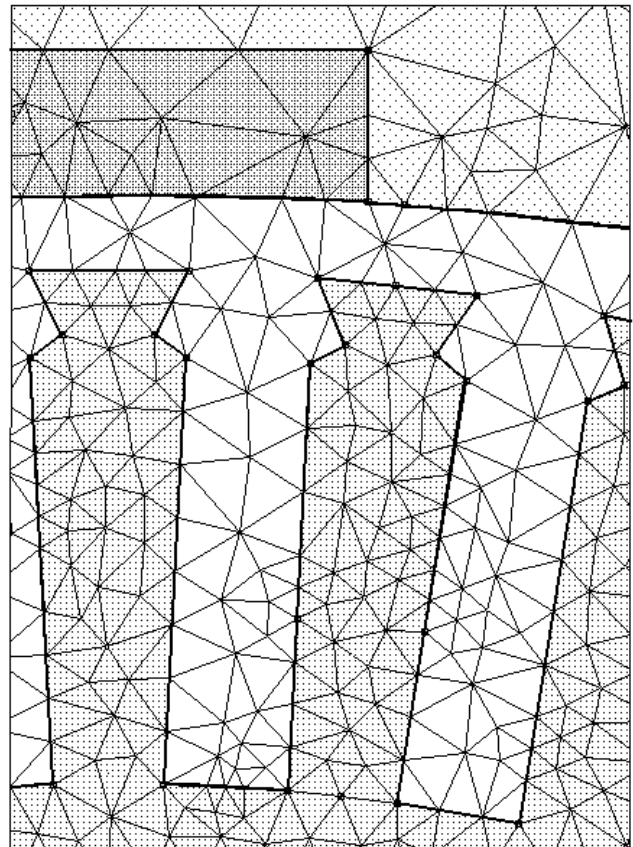


Рис.3. Фрагмент конечно-элементной структуры в зубцовой зоне якоря

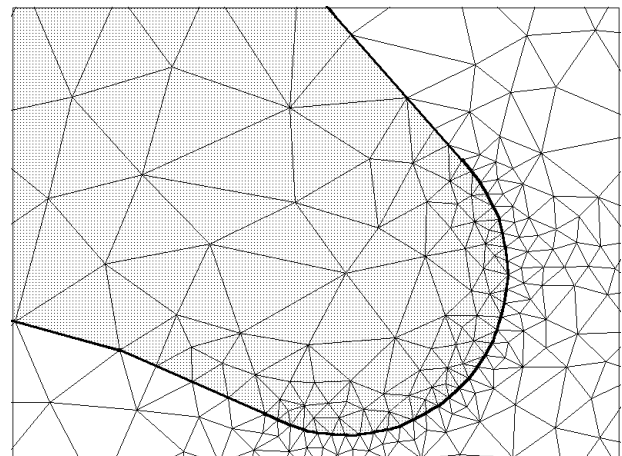


Рис.4. Фрагмент конечно-элементной структуры на краю наконечника главного полюса

четов на ПЭВМ с процессором Intel Celeron 2.2GHz длился примерно 20 с.

Для проверки результатов расчета использовались экспериментальные значения ЭДС обмотки якоря $E_{1экс}$, приведенные к частоте вращения 1 об/с. Аналогичные расчетные значения ЭДС получалось по известной из теории машин постоянного тока [8] формуле:

$$E_1 = \frac{pN}{a} \Phi_\tau, \quad (2)$$

где $N=464$ - число активных проводников обмотки якоря; a - число пар параллельных ветвей этой обмотки; p - упоминалось ранее; Φ_τ - магнитный поток,

входящего в якорь на полюсном делении, извлекавшийся из результатов решения полевой задачи.

Значения ЭДС E_1 для данного расчетного варианта, обозначенного как V1, представлены в табл.2. Здесь же дана приведенная погрешность

$$\varepsilon_N = \frac{E_1 - E_{1\text{экс}}}{E_{1N}} 100\%, \quad (3)$$

нормированная значением ЭДС E_{1N} , соответствующим номинальному току возбуждения.

Очевидно, с ростом тока возбуждения и, значит, насыщения магнитопровода погрешность быстро возрастает, достигая недопустимых (даже для технических расчетов) значений.

Это явление полностью соответствует рассмотренному в [9] и имеет очевидное объяснение – неучет разнородных длин участков магнитопровода (табл.1). Из-за того, что все аксиальные длины приняты одинаковыми, происходит расчетное перенасыщение тех участков магнитопровода, реальная длина которых больше принятой активной длины l_a . И, прежде всего, это касается станины. Таким образом, использование возможностей, заложенных в программе FEMM, приводит к большим погрешностям, чем при общепринятом классическом расчете магнитной цепи МПТ.

Таблица 2

Эксперимент		Вариант расчета			
		V1		V2	
I_f, A	$E_{1\text{экс}}, B\cdot c$	$E_1, B\cdot c$	$\varepsilon_N, \%$	$E_1, B\cdot c$	$\varepsilon_N, \%$
200	21,0	19,06	-4,3	19,45	-3,4
400	33,65	31,23	-5,3	33,36	-0,6
600	39,85	35,60	-9,4	39,92	0,2
800	44,08	37,75	-13,9	43,97	-0,2
865	-	38,24	-	44,9	-
1000	47,25	39,11	-17,9	46,62	-1,4
1250	50,52	40,31	-22,5	48,93	-3,5

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ FEMM: ПРИНЦИП УЧЕТА РАЛИЧНЫХ ДЛИН УЧАСТКОВ МАГНИТОПРОВОДА

Принципиальный подход к учету разных аксиальных длин частей магнитопровода ЭМ был представлен в [9]. Исходной посылкой было то, что магнитное поле считается плоскопараллельным только в пределах ограниченных зон, на которые делится область расчета в поперечном сечении ЭМ. Стыковка полей отдельных зон делается по условию непрерывности магнитного потока с учетом конкретных аксиальных длин элементов, входящих в эти зоны. В качестве зон могут быть взяты участки магнитопровода, а также части немагнитных пространств между ними.

Практическая реализация усовершенствований, предложенных в [9], выразилась в использовании так называемых коэффициентов приведения разнородных аксиальных длин к единой аксиальной длине ЭМ. Это сопровождалось соответствующим пересчетом магнитных свойств и магнитных величин в ограниченных зонах области расчета. Однако непосредственное использование этого в программе FEMM не представля-

ется возможным, так как доступа к ее внутренней структуре у пользователей нет. Поэтому усовершенствования, соответствующие [9], предлагаем реализовать на уровне исходных данных, которые пользователь вводит при решении своих задач.

Для того, чтобы при расчете магнитного поля в поперечном сечении ЭМ учесть различные аксиальные длины ее частей, необходимо определенным образом скорректировать задаваемые магнитные свойства локальных зон этого сечения. Не вдаваясь в теоретические обоснования, уже сделанные в [9], здесь представим конкретные операции, необходимые для достижения достаточно адекватных результатов расчета магнитного поля по программе FEMM в ЭМ с неоднородной торцевой структурой.

Итак, область расчета (рис.2) делим на зоны, и в данном случае в качестве таких зон возьмем участки магнитопровода, уже представленные на рис.1 и в табл.1. Здесь, в первом приближении, в качестве отдельной единой зоны возьмем оставшееся немагнитное пространство. Для более детальных расчетов последнее можно еще поделить на локальные зоны, с выделением зазоров между полюсами и якорем и еще дроблением междуполюсного пространства, как это делалось в [9].

Для каждой зоны принимается определенная аксиальная длина l_k (здесь и далее индекс k означает номер зоны) и определяется коэффициент приведения

$$K_{l,k} = \frac{l_k}{l_B} \quad (4)$$

к некоторой базовой длине l_B , в качестве которой может быть принята аксиальная длина одного из участков магнитопровода, хотя и не обязательно: произвольный выбор l_B не влияет на конечные результаты.

В зонах с линейными магнитными свойствами, характеризующимися исходным значением абсолютной магнитной проницаемости μ_k , необходимо задать ее приведенное значение

$$\mu_{п,k} = \mu_k \cdot K_{l,k} \quad (5)$$

Для ферромагнитных сердечников, характеризующихся определенной кривой намагничивания $B(H)$, необходимо шкалу магнитной индукции B изменить применительно к каждой выделенной зоне так:

$$mB_{п} = mB \cdot K_{l,k}, \quad (6)$$

где mB , $mB_{п}$ - масштабы по шкале индукции исходной и приведенной кривых намагничивания. Шкала напряженности магнитного поля H сохраняется.

С заданными таким образом магнитными свойствами материалов проводится расчет магнитного поля по программе FEMM в соответствии с ее инструкцией. Все полученные в результате расчета значения полевых параметров ($B_{п}$, магнитная индукция $B_{п}$ и т.д.) будут соответствовать приведенной расчетной модели с единой аксиальной длиной l_B .

Вернуться к исходной модели с разнородными аксиальными длинами надо опять с использованием коэффициента приведения, например, для $B_{п}$ и магнитной индукции:

$$A_Z = \frac{A_{Z,П}}{K_{l,k}}; \quad B = \frac{B_{П}}{K_{l,k}}. \quad (7)$$

Для прочих величин делаются пересчеты аналогичного вида.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО ПРОГРАММЕ FEMM С РАСШИРЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Приняв в качестве базовой длины l_b активную длину СГП, по формуле (4) для выделенных на рис.1 участков магнитопровода были определены коэффициенты приведения, которые представлены в табл.1. Посредством формулы (6) для сталей, указанных в этой же таблице, были пересчитаны кривые намагничивания и введены в соответствующее информационное окно диалогового меню FEMM.

Для немагнитного пространства, как единого участка, коэффициент приведения равнялся единице. Поэтому для этой зоны по формуле (5) осталось

$$\mu_{п,к} = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}. \quad (8)$$

Проведя все остальные действия, предписанные базовым вариантом FEMM, получили новые результаты для FEMM с расширенными возможностями. Этот расчетный вариант обозначен как V2. Картина магнитного поля в этом варианте при номинальном токе проиллюстрирована линиями равного ВМП на рис.2, причем максимальное значение ВМП составило $A_{max} = 0,1341$ Вб/м (для варианта V1 картина поля имела примерно такой же вид, но при $A_{max} = 0,1168$ Вб/м).

По результатам расчета магнитного поля при разных токах возбуждения определены значения ЭДС обмотки якоря (2), а также нормированные погрешности (3). Данные расчетов для варианта V2 представлены в табл.2. По сравнению с вариантом V1 погрешности уменьшились в весьма значительной мере, особенно при токах, дающих более насыщенное состояние магнитопровода МПТ.

Уровень насыщения магнитопровода МПТ в целом можно оценить по нелинейности магнитных характеристик $\Phi_r(I_f)$ – зависимостей магнитного потока, входящего в сердечник якоря на полюсном делении, от тока возбуждения. Графики таких характеристик для расчетных вариантов V1 и V2 и точки, определенные по экспериментальным данным, представлены на рис.5. Этот рисунок, как и данные табл.2, свидетельствуют о достаточной близости расчета по варианту V2 к эксперименту, а также о слишком больших отклонениях от эксперимента расчетного варианта V1. В принципе, погрешности расчета по варианту V2 находятся в тех пределах, которые могут быть вызваны технологическими отклонениями в конструкции ДПТ, а также неадекватностью реальных магнитных свойств сталей и справочных кривых намагничивания.

В табл.3 сравниваются некоторые магнитные параметры из расчетов по вариантам V1 и V2 при номинальном токе возбуждения для указанных на рис.1 мест в области расчета. В таблице обозначено: B_{ns} – среднее значение нормальной составляющей магнитной индукции по определенным линиям сечения

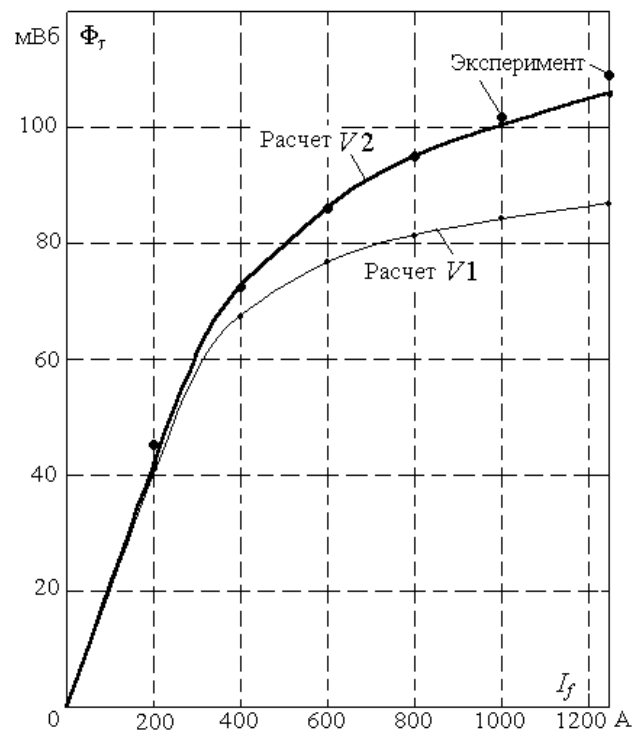


Рис.5. Магнитные характеристики ДПТ

участков магнитной цепи ДПТ; U_m – падения магнитного напряжения на длине определенных линий контура, охватывающего сторону катушки главного полюса, вычисляемые на основе формулы

$$U_m = \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l}. \quad (9)$$

Данные табл.3 свидетельствуют, что при номинальном возбуждении ДПТ в варианте V1 происходит перенасыщение станины и на нее приходится чрезмерно завышенная часть МДС возбуждения. В варианте V2, где учтены реальные длины станины и других участков магнитопровода, все становится на свои места и результаты расчета оказываются достаточно близки к экспериментальным данным (табл.2).

Таким образом, программа FEMM при расчете магнитных полей ЭМ с неоднородной аксиальной длиной магнитопровода нуждается в обязательном усовершенствовании. В рассмотренном здесь случае в поперечном сечении ЭМ были выделены зоны и аксиальные длины соответствующих элементов были приближенно приняты по конструктивным длинам сердечников, входящих в эти зоны. Это можно рассматривать как первое приближение, которое уже дало достаточное для практических расчетов уточнение.

Таблица 3

Участок	Линия сечения	B_{ns} , Тл		Линия контура	U_m , А	
		V1	V2		V1	V2
Ярмо СЯ	λ - λ	0,99	1,20	ab	240	406
Зубец	ξ - ξ	2,17	2,19	bc	2072	5318
Зазор	δ - δ	0,81	0,95	cd	6550	7501
СГП	ζ - ζ	1,33	1,57	de	93	244
Станина	η - η	1,78	1,36	ef	7105	2559

Дальнейшим развитием предложенного усовершенствования может явиться использование, так называемых, функций приведения - вместо коэффициентов приведения (4) аксиальных длин. Такие функции введены и использованы в [10] и других работах. Пример определения функции приведения для станины, как одного из наиболее отличающихся по аксиальной длине участков магнитопровода (табл.1), дан в [11], где показано, что эту, наиболее влияющую на результаты часть магнитопровода, недостаточно представлять одним участком.

Следует отметить еще один недостаток программы FEMM, выявляющийся после расчета магнитного поля при выдаче результатов. Так, вычисляемые значения падения магнитного напряжения (9) недостаточно точны. Так, например, если взять замкнутый контур, сцепленный с катушками двух соседних полюсов, то сумма падений магнитных напряжений должна составлять суммарную МДС этих катушек, например, при номинальном возбуждении 34600 А. А программа FEMM выдает в варианте V1: 31539 А и в варианте V2: 32119 А. Эта весьма заметная погрешность может быть вызвана либо вообще неточностью расчета магнитного поля, либо неточностью в реализации процедуры вычисления магнитных напряжений, в частности. Скорее всего, из-за последнего и возникает погрешность невыполнения закона полного тока в (7,2..8,8)%. Ведь при расчете магнитного поля по программе FEMM задавалась относительная допустимая расчетная погрешность 10^{-9} .

Область расчета на рис.2 является минимальной для расчета магнитного поля возбуждения данного ДПТ. В режиме нагрузки, когда вместе с обмоткой возбуждения будут действовать еще и обмотки якоря и добавочных полюсов, необходимо рассчитывать магнитное поле в пределах двух полюсных делений. Такая область представлена на рис.6 и здесь уже на осях симметрии двух крайних полюсов устанавливается граничное условие периодичности

$$A_z(r, \varphi) = A_z(r, \varphi + \pi). \quad (10)$$

Расчеты поля возбуждения в такой постановке также были проведены. При этом в области расчета по рис.6 была нанесена конечно-элементная структура, содержащая 12579 узлов и 24870 треугольников. Расчет поля длился примерно 70 с и дал в итоге практически такие же результаты, как и в области на рис.2.

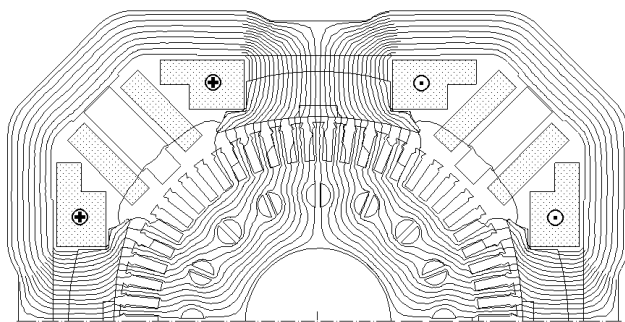


Рис.6. Область расчета с граничными условиями периодичности.

ВЫВОДЫ

1. Программа FEMM при расчете магнитного поля в поперечном сечении электрических машин не позволяет учитывать разнородные аксиальные длины участков магнитопровода. Это может приводить к погрешностям, которые существенно превышают даже погрешности расчета магнитного поля ЭМ традиционным методом неоднородной магнитной цепи.

2. Предложенное усовершенствование в компоновке с программой FEMM дает возможность получения результатов, адекватных реальным конструкциям ЭМ с неоднородной торцевой структурой.

3. В целом программа FEMM является весьма эффективным и удобным для пользователя программным продуктом. При определенных в данной работе условиях эта программа может послужить для дальнейшего совершенствования методов проектирования электрических машин на основе использования численных расчетов магнитных полей. Задача, которую при этом следует решить, заключается в необходимости разработки методик, позволяющих результаты численных расчетов магнитных полей эффективно трансформировать в конкретные параметры разрабатываемых электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Erdelyi E.A., Fuchs E.F. Nonlinear Magnetic Field Analysis of dc Machines. Part I: Theoretical Fundamentals. Part II: Application of the improved treatment // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1970. PAS-89, N7, p.1546-1564.
- [2] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. Пер. с англ.-М.: Мир, 1986.-318 с.
- [3] Демирчан К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей.- М.: Высш.школа, 1986.-240 с.
- [4] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
- [5] Клименко Б.В., Байда Е.И. О проектировании броневых электромагнитов постоянного тока на базе расчета магнитного поля методом конечных элементов // Электротехника і електромеханіка, 2003.-№1.- С.38-40.
- [6] Рымша В.В. Математическое моделирование линейных вентиляно-реактивных двигателей // Электротехніка і електромеханіка.-2003.-№4.-С.72-76.
- [7] Милых В.И., Климов Ю.А., Штангеев Е.И. Сравнительный анализ электромагнитных и тепловых параметров сердечника якоря тягового электродвигателя с различными аксиальными вентиляционными каналами // Электротехника.-1990.-№5.-С.36-42.
- [8] Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
- [9] Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника.- 1982.-№12. -С.46-49.
- [10] Милых В.И. Синтез магнитного поля электрических машин на основе плоско-ортогональных расчетных моделей // Электричество.-1986.- N5.- С.27-32.
- [11] Милых В.И., Кирпилева Э.Т. Магнитное поле в станине машины постоянного тока // Вестник ХГПУ. Серия «Новые решения в современных технологиях». Выпуск №79, Харьков. 2000.-С.61-62.

Поступила 4.04.2004

АННОТАЦИЯ СТАТЬИ

*Milykh V.I., Polyakov I.V., Polyakova N.V.,
Shtangeev Ye.I.*

Analytical-Experimental Testing of FEMM Program and Overcoming of Problems of its Application to Electrical Machine Magnetic Field Computations

General capabilities and problems of application of FEMM (Finite Element Method Magnetics) program located at <http://femm.berlios.de> are analyzed. The program testing is conducted using an electrical machine of elaborate design by means of analytical and experimental data comparison. A practical way of overcoming of one of the magnetic field computation problems revealed is suggested, which consists in taking into consideration dissimilar axial lengths of electrical machine core sections.

Key words – FEMM program, magnetic field, electrical machine, testing, problem overcoming

СПИСОК АВТОРОВ

*Мильх Владимир Иванович
Поляков Игорь Владимирович
Полякова Наталья Владимировна
Штангеев Евгений Иванович*