

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Дудник М.З., Демченко Г.В., Шендриков В.Н.
Донецкий государственный технический университет
R504A@FCITA.DN.UA

The article considers calculations of magnetic system of the reluctance traction motor in order to determine parameters of electromechanical converter, which provide production of the specified characteristics in overall dimensions of the base machine. For the computer-aided calculations of magnetic field considered magnetic circuit saturation the finite element method is used. The results received can be used in designing traction drive of a mine electric locomotive.

Вентильный двигатель может стать успешной альтернативой коллекторному двигателю в тяговом электроприводе - по регулировочным свойствам и реализуемым характеристикам они весьма близки [1]. Вентильный двигатель представляет собой электромеханический преобразователь, снабженный электронной системой управления. Конструкция электромеханического преобразователя и схемное решение системы управления отличаются разнообразием и привязываются к конкретным условиям эксплуатации.

Для привода рудничного электровоза рациональным является вариант электромеханического преобразователя реактивного типа (без обмотки на роторе) [2]. Электромеханический преобразователь вентильного реактивного двигателя (ВРД) с целью унификации предложено выполнить в корпусе базового взрывозащищенного коллекторного двигателя. Поэтому при разработке такого тягового двигателя важным является максимальное использование активного объема машины. Устранение коллектора позволяет увеличить длину ротора, а выбор рациональных геометрических параметров электромеханического преобразователя ВРД даст возможность получения заданных электромеханических характеристик.

В основе решения поставленной задачи лежит расчет магнитного поля машины с учетом непостоянства магнитной проводимости воздушного зазора, обусловленного явно выраженной двусторонней поллюсностью ее статора и ротора.

Для достижения максимального значения электромагнитного момента ВРД в заданных габаритах необходимо принимать электромагнитные нагрузки, обеспечивающие определенное насыщение его зубцовой зоны. Это обстоятельство еще более усложняет задачу расчета магнитного поля в исследуемом двигателе, обуславливая необходимость учета нелинейных свойств ферромагнитных участков магнитной цепи машины.

Существующие аналитические методы не могут обеспечить точного решения поставленной задачи, так как они основываются на таких допущениях, которые исключают из рассмотрения детали и конкретную конфигурацию элементов устройства. Поэтому здесь целесообразно применение общих численных алгоритмов, позволяющих с необходимой точностью производить расчет электромагнитных полей в неоднородных и нелинейных средах при любых формах поверхностей раздела сред.

В последнее время для решения задач электромагнитного поля в электрических машинах получили распространение численные методы, позволяющие достаточно точно рассчитывать магнитные поля в нелинейных средах. Такая тенденция объясняется растущими требованиями к расчетной оценке параметров и характеристик электрических машин на стадии их проектирования.

Одним из наиболее эффективных и универсальных численных методов расчета электромагнитных полей является метод конечных элементов.

Использование метода конечных элементов позволяет более точно учесть геометрическую конфигурацию кусочных сред, а также уменьшить порядок системы решаемых уравнений и использовать эффективные методы решения. В основе метода конечных элементов лежит вариационная формулировка задачи расчета магнитного поля в сочетании с наперед заданными функциями формы (координатными функциями). Этот метод в значительной степени избавлен от недостатков, свойственных методам сеток и интегральных уравнений [3].

Метод конечных элементов представляется весьма удобным для решения полевых задач с учетом насыщения, особенно в случае сложной геометрической конфигурации поверхности раздела кусочных сред [4]. Кроме того, размеры элементов могут быть выбраны с учетом изменения искомой функции, что позволяет использовать физические представления при дискретизации области.

В практике расчетов наибольшее распространение получили треугольные элементы, применение которых дает ряд преимуществ [5]. Используя треугольные элементы, можно удовлетворительно представить любую двумерную область, границы которой могут быть аппроксимированы рядом прямолинейных отрезков. Также сетка из треугольных элементов, с помощью которой моделируется внутренняя область машины, не является регулярной ни геометрически, ни топологически. Это значит, что размеры и формы треугольников могут изменяться произвольно, а их взаимные соединения не обязательно должны следовать какой-либо регулярной структуре. Треугольные элементы первого порядка благодаря простоте алгоритма формирования

системы уравнений позволяют наиболее просто рассчитывать картину магнитного поля с учетом нелинейности среды.

Основной идеей метода конечных элементов является минимизация функционала, связанная с разбиением исследуемой области на элементы конечной величины, в которых неизвестная функция представляется полиномиальной аппроксимацией.

Метод конечных элементов можно трактовать как систематический способ аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, представляющей собой множество значений заданной функции в некотором конечном числе подобластей - конечных элементах. Аппроксимация функции на каждом элементе единственным образом определяется значениями этой функции в конечном числе предварительно выбранных точек области ее определения.

Построение конечно - элементной модели выполнено следующим образом:

1. В области определения функции выбрано конечное число точек, которые являются узловыми точками (узлами).

2. Область поля приближенно представлена в виде совокупности конечного числа непересекающихся подобластей - конечных элементов. Таким образом, моделью области поля является совокупность конечных элементов, связанных между собой в узлах и на их границах.

3. Заданная функция локально аппроксимирована на каждом конечном элементе непрерывными функциями, однозначно определяемыми значениями функции в узловых точках, принадлежащих этим элементам.

Важной особенностью метода конечных элементов является то, что первоначально при локальной аппроксимации функции на конечных элементах их можно рассматривать независимо друг от друга. Это значит, что каждый элемент можно считать совершенно изолированным от всей совокупности и аппроксимировать функцию на этом элементе с помощью ее значений в узлах независимо от того, какое место займет рассматриваемый элемент в связанной модели области, и от поведения функции на других конечных элементах.

Согласно рекомендациям [3,5] область электрической машины разбивается следующим образом. На области выделяются концентрические слои, ограниченные окружностями заданных радиусов. Разбивка на элементы, нумерация узлов и элементов производится послойно, последовательно переходя от внешних к внутренним радиусам. В данной машине самым необходимым является знание распределения индукции в зубцовой зоне - в полюсах пассивного ротора, в полюсных выступах возбужденной фазы статора, а также в возбужденном зазоре между ними. Поэтому в этих местах производится более мелкое разбиение - размеры элементов должны быть минимальными. Благодаря геометрической и магнитной симметрии в поперечном сечении достаточно, чтобы модель воспроизводила только половину области определения решения. Остальная часть имеет аналогичные условия возбуждения и форму, поэтому распределение магнитного поля в ней точно такое же.

Электромагнитное поле в каждой точке пространства определяется векторами магнитной индукции B и напряженности H магнитного поля. Система уравнений электромагнитного поля в дифференциальной форме имеет вид:

$$\operatorname{div} B = 0, \quad B = (\mu) H, \quad (1)$$

где μ - магнитная проницаемость среды.

Так как электротехнические материалы обладают нелинейными свойствами, то материальное уравнение $B = (\mu) H$ является нелинейным и, следовательно, вся система дифференциальных уравнений также нелинейная.

Задачи о стационарных магнитных полях обычно описываются на языке векторного потенциала A , ротор которого дает величину магнитной индукции

$$B = \operatorname{rot} A. \quad (2)$$

Векторный потенциал определяется из уравнения

$$\operatorname{rot} (\nu \operatorname{rot} A) = j, \quad (3)$$

где ν - удельное магнитное сопротивление материала; j - плотность тока источников, находящихся в области определения решения. При этом j может представлять как плотность токов, задаваемых условием задачи, так и плотность токов, наведенных в данной среде.

Удельное магнитное сопротивление материала $\nu = 1/\mu$ здесь зависит от величины поля, следовательно, уравнение (3) нелинейное.

Уравнение (3) справедливо для общего трехмерного случая. Однако в нашем случае его можно свести к двумерной модели, т.е. в предположении бесконечной длины машины.

Если в уравнении (3) принять, что векторные величины направлены только вдоль оси Z , то оно сводится к двумерному

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j. \quad (4)$$

Красная задача для уравнения (4) при заданных граничных условиях на границе области R может быть заменена отысканием минимума построенного соответствующим образом функционала $I(A)$.

Вариационные приемы решения, такие как метод конечных элементов, позволяют решить задачу путем минимизации энергетического функционала, представляющего собой разность между энергией, подведенной к объему, и запасенной в нем. Таким образом для плоскопараллельного поля

$$I(A) = \int_R \left(\int_0^B \frac{1}{\mu} B dB - \int_0^A j dA \right) \cdot dx dy. \quad (5)$$

При расчете использовались граничные условия Дирихле. Было принято, что внешней границе рассматриваемой области соответствует магнитная силовая линия, и на этой поверхности $A = 0$. Возбуждение обеспечивается за счет тока обмоток статора и в этом случае осевая линия полюсных выступов статора возбужденной фазы является линией симметрии. Идея метода конечных элементов заключается в том, что рассматриваемая область R представляется совокупностью конечного числа элементов, для каждого из которых обеспечивается условие минимума функционала $I(A)$.

Для расчета магнитного поля с учетом характеристики намагничивания применяемой марки стали разработана программа на алгоритмическом языке программирования Turbo-PASCAL v. 7.0, ориентированная на работу в персональных компьютерах, совместимых с IBM PC. Алгоритм реализован для расчета магнитного поля в поперечном сечении рабочей зоны электромеханического преобразователя вентильного реактивного двигателя. Результатом расчета поля является пространственный анализ радиальной составляющей индукции в исследуемой области, а также использование этих результатов для дальнейшего расчета электромагнитного вращающего момента двигателя. Анализ осуществляется последовательным просчетом магнитного поля для ряда взаимных положений ротора относительно полюсов статора возбужденной фазы (рис. 1).

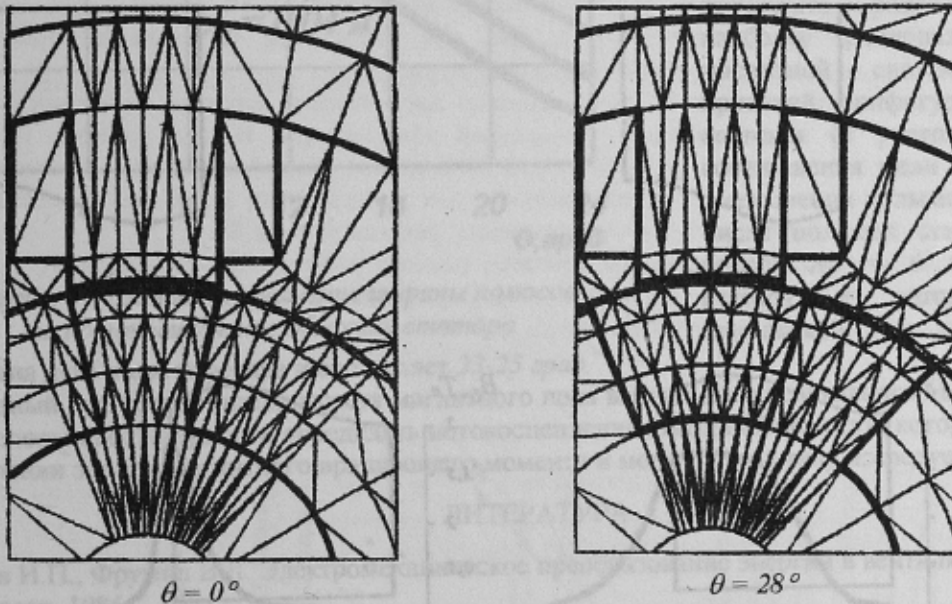


Рисунок 1 - Фрагменты области моделирования зубцовой зоны двигателя

Область задается в виде набора исходных данных: характеристика узловых точек (их координаты); характеристики элементов (их номера, принадлежность слою, тип среды: воздух, железо, токонесущий элемент - обмотка); параметры среды каждого из элементов (немагнитная или вид ферромагнетика - его кривая намагничивания).

Пренебрегая выпучиваниями магнитного потока в вал и за внешнюю границу рассматриваемой области, считаем внутреннюю поверхность пакета ротора и наружную границу области эквипотенциальными, на которых потенциал равен нулю ($A=0$). На области выделяются концентрические слои, ограниченные окружностями заданных радиусов. Слои и радиусы пронумерованы сверху вниз. Разбивка области на элементы производится послойно, т. е. элементы не должны выходить за пределы слоя, а все узлы элементов должны лежать на окружностях (радиусах), разделяющих слои. Мелкое разбиение производится только на одном зубцовом делении, относящемся к возбужденной фазе статора, так как в различные моменты времени поочередно включаются фазы двигателя и процессы будут повторяться с аналогичными картинками распределения электромагнитного поля, сдвинутыми в пространстве только лишь на определенный угол, кратный зубцовому делению статора.

При расчетах с использованием данной программы исходными параметрами служат диаметр расточки станины базового двигателя $D_{PAC,CT}$ и диаметр вала D_O , а варьируемыми являются: высота ярма статора $h_{ЯС}$, м; высота полюса статора $h_{ПС}$, м; воздушный зазор δ_a , м; высота полюса ротора $h_{ПР}$, м; высота ярма ротора $h_{ЯР}$, м;

ширина полюса статора $b_{ПС}$, м; ширина полюса ротора $b_{ПР}$, м; длина набора пакета стали магнитопровода статора и ротора l , м; количество витков обмотки w , вит.; ток обмотки фазы статора I , А.

Для различных сочетаний геометрических размеров статора, ротора, величины воздушного зазора и параметров обмотки двигателя определяются распределения магнитного поля, величины значений индукции в зубцовой зоне электрохимического преобразователя, которые используются для уточнения электромагнитных расчетов. Разработанная модель позволила исследовать магнитное поле при различной форме полюсов машины: исследовались полюса с параллельными стенками, с полюсными наконечниками и со срезами - с трапециидальными стенками полюсов вблизи воздушного зазора. В результате проведения поисковых расчетов установлено, что с целью получения большего электромагнитного момента при уменьшении его пульсаций полюса целесообразно выполнять с параллельными стенками.

На рис.2 показано графическое представление расчетных значений индукции в воздушном зазоре зубцовой зоны (при различных углах поворота ротора - различных взаимных положениях полюсов статора и ротора) электрохимического преобразователя со следующими конструктивными размерами: диаметр якоря $D_a = 0,286$ м; длина полюсов статора и ротора $l_{П} = 0,16$ м; ширина полюсов статора и ротора $b_{П} = 0,06$ м; высота полюса статора $h_{ПС} = 0,074$ м; высота полюса ротора $h_{ПР} = 0,06$ м; воздушный зазор $\delta_d = 0,0015$ м.

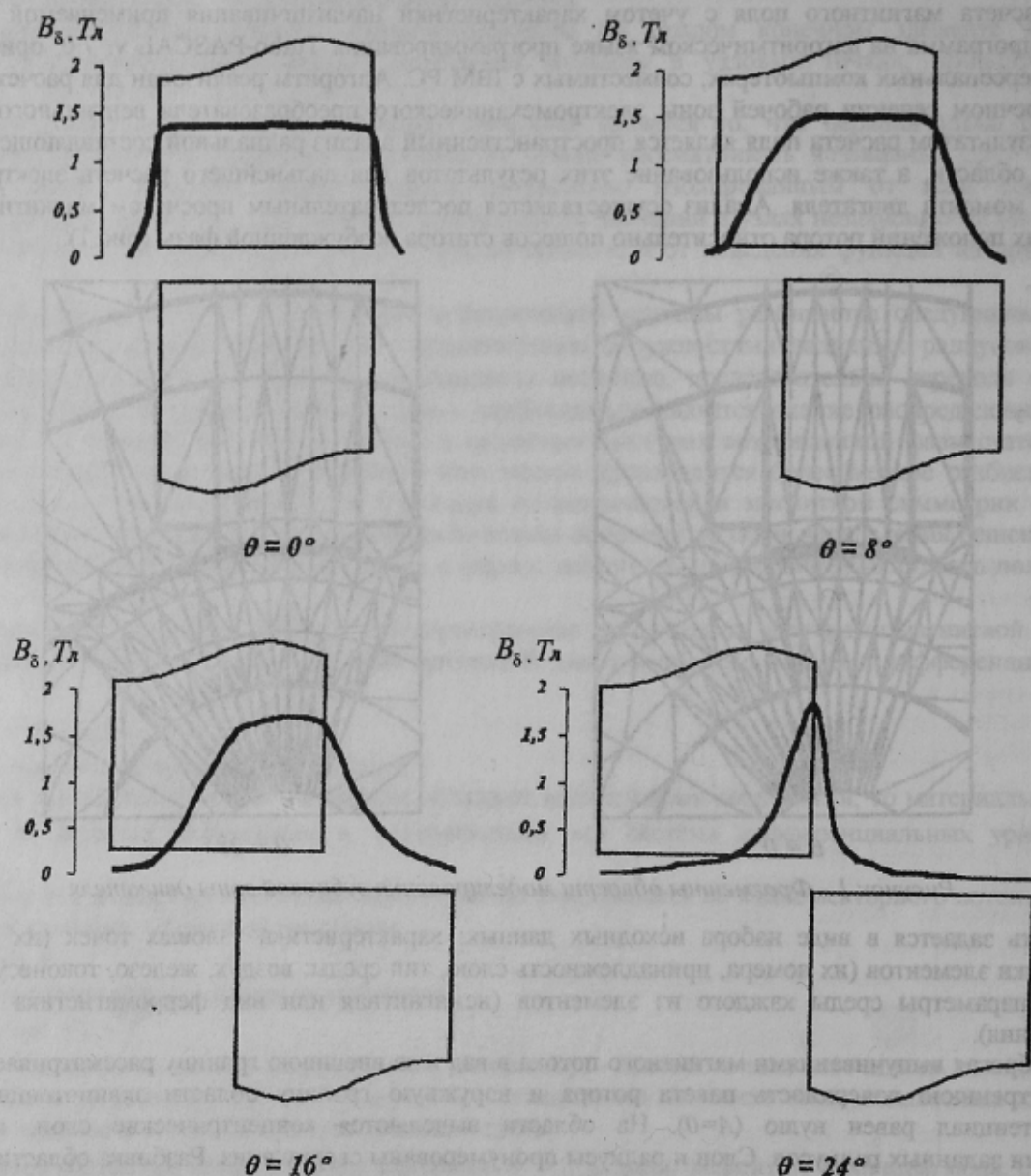


Рисунок 2 - Графическое представление расчетных значений индукции в воздушном зазоре зубцовой зоны электрохимического преобразователя ВРД

С целью проверки достоверности полученных результатов расчета магнитного поля были проведены экспериментальные измерения магнитной индукции в воздушном зазоре зубцовой зоны на полномасштабном макетном образце исследуемого двигателя. Измерения были произведены при различных угловых положениях ротора при питании обмотки статора током расчетной силы. Сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментов показал следующее. При согласованном положении полюсов статора и ротора ($\theta = 0^\circ$)

наблюдается лучшая сходимость результатов (расчетные значения превышают данные эксперимента не более чем на 5%). По мере увеличения угла рассогласования между осями полюсов статора и ротора погрешность расчета увеличивается. При угле рассогласования, который соответствует наилучшим условиям для создания начального момента при включении соответствующей фазы ($\theta = 24^\circ$) (см. рис.2), наибольшее расхождение между расчетными и измеренными величинами магнитной индукции в воздушном зазоре в расчетных точках не превышает 14%.

Исходя из полученных значений индукции определяются потокоцепления статорной обмотки при различных углах рассогласования и изменении ширины полюсов.

Влияние изменения ширины полюса на величину потокоцепления представлено на рис.3.

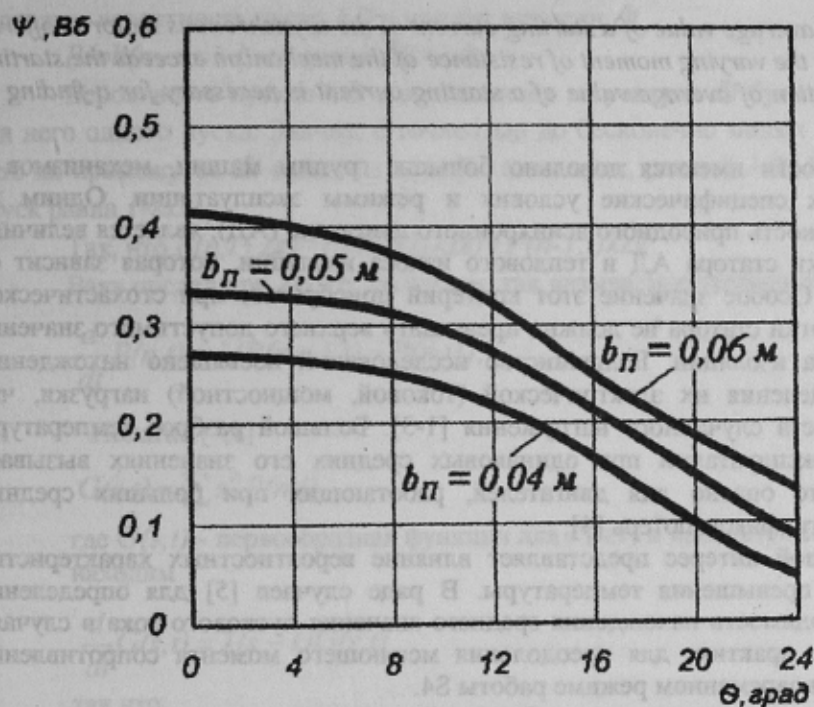


Рисунок 3 - Влияние уменьшения ширины полюсов на потокоцепление обмотки статора

статора почти равна дуге полюса ротора и составляет 23-25 град.

Предложенный численный метод расчета магнитного поля вентильного реактивного двигателя позволяет с достаточной степенью достоверности определять потокоцепления статорной обмотки, которые используются затем при вычислении электромагнитного вращающего момента и мощности на валу исследуемой машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов И.П., Фрумин В.Л. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 166 с.
2. Дудник М.З., Чебаненко К.И., Васильев Л.А., Демченко Г.В. Вентильный двигатель для рудничного электровоза // Сборник трудов горно-электромеханического факультета. - Донецкий государственный технический университет. - 1996. - С. 119-122.
3. Кислицин А.Л. и др. Расчет магнитных полей электрических машин методом конечных элементов. Изд. - во Саратовского ун - та, 1980. - 173 с.
4. Матвейчук П.А., Рубинраут А.М. Магнитное поле турбогенератора с насыщенным явнополюсным ротором // Электротехника. - 1992. - № 8 - 9. - С. 2 - 4.
5. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров - электриков: Пер. с англ. - М.: Мир, 1986 - 229 с.