

УДК 621.318.3

СТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕРМЕТИЧНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДИСКОВОГО ТИПА С МАГНИТОСВЯЗАННЫМИ ПОЛЮСАМИ

С.В. Леонов, А.Л. Федянин, О.П. Муравлев

Томский политехнический университет

E-mail: siberia99@mail.ru

Рассмотрены вопросы моделирования синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными полюсами. Алгоритмическая модель выполнена на основе комбинированной схемы, использующей достоинства полевого метода интегральных уравнений и электромагнитного метода расчета с трехмерной сосредоточенной схемой замещения магнитной системы статора.

Современные тенденции развития электромеханических устройств направлены в область разработки и исследования конструкций специальных электрических машин с изучением вопросов эксплуатационной надежности, эффективности преобразования электромагнитной энергии и сферы применений. Например, к таким устройствам можно отнести герметичные электрические машины, предназначенные для работы на ядерно-химических производствах с целью обеспечения безопасности и защиты обслуживающего персонала от вредного воздействия продуктов производства, в условиях аварийных режимов работы.

Опыт эксплуатации герметичных двигателей показал, что они имеют малый срок службы, вызванный проникновением внутрь машины технологических жидкостей разрушающих конструктивные элементы магнитной системы. Решить данную задачу удалось благодаря успехам в разработке и освоении высококоэрцитивных постоянных магнитов, с высокой магнитной энергией и исследованию дисковых электрических машин. В конструкции нового типа двигателя герметизация осуществляется сплошным неподвижным экраном, который располагается в воздушном зазоре между приводным диском ротора и остальной частью двигателя. Таким образом, крутящий момент передается к исполнительному механизму через герметизирующую перегородку, выполненную из материалов стойких к агрессивной среде [1, 2].

Применение электродвигателя дискового типа позволяет максимально упростить конструкцию герметизирующего экрана и выполнить электрическую машину более надежной, так как ее основная часть остается вне зоны технологического аппарата. Внедрение данного двигателя повысит экономическую эффективность за счет уменьшения затрат на ремонт оборудования и увеличения межремонтного периода работ.

Анализ научно-технического состояния данной области техники показал, что разработка такого типа машин требует решения ряда задач, которые в настоящее время недостаточно проработаны и слабо освещены в технической литературе.

Задачей разработки нового электродвигателя является исследование электромагнитных процессов, протекающих в электрической машине с маг-

нитосвязанными полюсами. Теоретическое исследование необходимо выполнить с использованием методов и алгоритмов, позволяющих анализировать параметры трехмерных магнитных полей.

Для решения поставленной задачи предложена конструкция герметичной синхронной электрической машины дискового типа (рис. 1), которая дает возможность практически в 2 раза повысить эффективность преобразования электромагнитной энергии по сравнению с аналогичными электродвигателями, реализованными на базе асинхронной электрической машины. Разработанный нами герметичный двигатель выполнен с аксиальным направлением магнитного потока, образованного постоянными магнитами. Статор машины содержит трехфазную обмотку, выводы которой могут быть подключены к автономному инвертору тока [3, 4].

В предлагаемой конструкции двигатель состоит из статора и двух дисков ротора, на которых расположены высококоэрцитивные постоянные магниты.

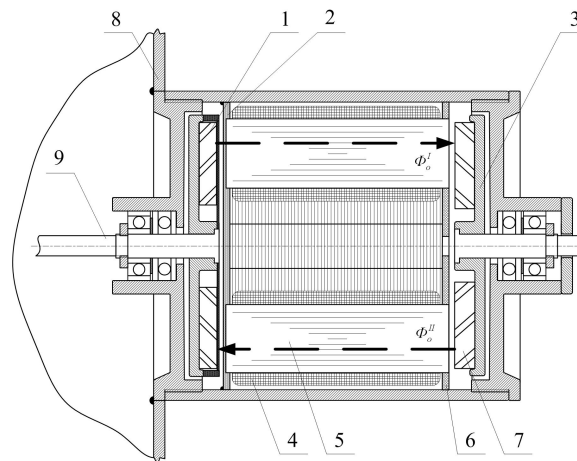


Рис. 1. Конструкция герметичной синхронной машины дискового типа: 1) приводной диск; 2) герметизирующая перегородка; 3) подмагничивающий диск ротора; 6) статор; 7) полюс ротора; 8) часть технологического аппарата; 9) приводной вал

Статор машины содержит кратное трем количество стержней с уложенной на них обмоткой. Стержни статора закреплены между герметичной перегородкой и каркасом, выполненные из немагнитного материала. Момент на валу исполнительного механизма создается приводным диском ро-

тора, который устанавливается внутри технологического аппарата и удерживается подшипниковым щитом. Подмагничивающий диск ротора вращается синхронно с приводным диском и служит для усиления величины магнитного потока в 1,5...2 раза по сравнению с торцевой конструкцией машины имеющей один диск. Высококоэрцитивные постоянные магниты приводного диска закрыты снаружи обечайкой из немагнитного материала [5].

После схематической проработки конструкции электродвигателя был выполнен ряд оценочных электромагнитных расчетов направленных на изучение энергетических характеристик, которые определяются не только геометрией и соотношением числа пазов и пар полюсов, а также и особенностью взаимодействия приводного и подмагничивающего дисков ротора. Однако, используя электромагнитные методы расчета, невозможно оценить магнитное взаимодействие дисков и возникающие их взаимные колебания, что неизбежно влияет на приводной момент машины и устойчивость работы на резонансных частотах. Последнее требует тщательного исследования с применением методик расчета дисковых машин, основанных на трехмерном представлении расчетной области с целью учета неоднородности магнитного поля по длине и радиусу машины.

В результате анализа методов расчета и моделирования электромеханических устройств была разработана алгоритмическая модель синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными полюсами, выполненная на основе комбинированной схемы, использующей достоинства полевого метода интегральных уравнений и электромагнитного метода расчета с трехмерной сосредоточенной схемой замещения магнитной цепи статора. Это позволяет получить приемлемые по точности результаты при значительном сокращении математических вычислений.

На первом этапе расчета производится разбиение магнитной системы электродвигателя на конечные элементарные объемы с описанием свойств и исходного состояния материала в пределах каждого элементарного объема. Далее выполняется расчет магнитного поля создаваемого полюсной системой из двух магнитосвязанных дисков ротора. При этом рассчитываются характеристики трехмерного магнитного поля непосредственно в воздушном зазоре в пределах полюсного деления. Расчет выполняется с помощью широко известного выражения для вычисления напряженности магнитного поля через намагниченность элементов магнитной системы:

$$\vec{H}_q = -\frac{1}{4\pi} \operatorname{grad}_q \int_V \frac{\vec{M}_p \vec{r}_{pq}}{r_{pq}^3} dV_p,$$

где $\vec{H}_q$ — вектор напряженности магнитного поля в точке наблюдения q , А/м; $\vec{M}_p$ — намагниченность объема dV_p ; $\vec{r}_{pq}$ — радиус-вектор, проведенный из элемента объема dV_p в точку наблюдения q ; r_{pq} — модуль радиус-вектора.

После преобразований исходное уравнение в матрично-векторной форме принимает вид:

$$\vec{H}_q = -A \cdot \vec{M},$$

$$\vec{H}_q = [H_x, H_y, H_z]^T, \quad \vec{M} = [M_{x_1}, M_{y_1}, M_{z_1}, \dots, M_{z_n}]^T,$$

где

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(r_{pq_x}^2 + r_{pq_z}^2 - 2r_{pq_x}^2)M_{x_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & -\frac{3r_{pq_x} r_{pq_y} M_{y_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & \dots & -\frac{3r_{pq_x} r_{pq_z} M_{z_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} \\ \frac{(r_{pq_x}^2 + r_{pq_z}^2 - 2r_{pq_y}^2)M_{y_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & -\frac{3r_{pq_y} r_{pq_x} M_{x_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & \dots & -\frac{3r_{pq_y} r_{pq_z} M_{z_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} \\ \frac{(r_{pq_x}^2 + r_{pq_z}^2 - 2r_{pq_z}^2)M_{z_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & -\frac{3r_{pq_z} r_{pq_x} M_{x_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & \dots & -\frac{3r_{pq_z} r_{pq_y} M_{y_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} \end{bmatrix},$$

где A — матрица коэффициентов, в которой первый индекс переменной обозначает номер точки и показывает, по какой оси рассматривается влияние намагниченности, а второй — точку оси, на которую это воздействие создается; $\vec{M}$ — вектор компонент намагниченности, модуль которого определяется по кривой намагничивания материала; r_{pq_x} , r_{pq_y} , r_{pq_z} — проекции радиус-векторов $\vec{r}_{pq}$ на оси декартовой системы координат.

Выбор именно этого способа расчета поля обусловлен возможностью определить индукцию в воздушном зазоре на поверхности стержней статора с учетом потоков рассеяния полюсной системы. Высококоэрцитивные магниты обладают магнитным сопротивлением соизмеримым с магнитным сопротивлением воздуха, поэтому правомерно сделать вывод, что влияние поля реакции якоря в данной конструкции машины на полюсную систему будит минимально. Таким образом, можно получить трехмерное распределение магнитного поля в воздушном зазоре с точностью 4 %. При расчете вектор намагниченности высокоэнергетических магнитов принимается постоянным и совпадающим с направлением первоначального намагничивания.

На следующем этапе производится расчет схемы замещения магнитной цепи статора с учетом нелинейности характеристик магнитопровода. В качестве исходных значений для расчета является распределение магнитного поля в воздушном зазоре машины.

Участки статора, описывающие области возможного прохождения основного магнитного потока представлены в виде проводимостей магнитной цепи. В результате магнитную систему статора можно представить в виде трехмерной схемы замещения, проводимости которой главным образом зависят от магнитной проницаемости среды. На рис. 2 приведена трехмерная схема замещения статора синхронного двигателя.

Исходными данными при расчете машины по данной схеме замещения является распределение магнитного поля полюсной системы ротора. При переходе к сосредоточенным параметрам определяются магнитные потоки, входящие в стержни статора. Для расчета машины составляется система нелинейных алгебраических уравнений, описывающих электромагнитные процессы в статоре

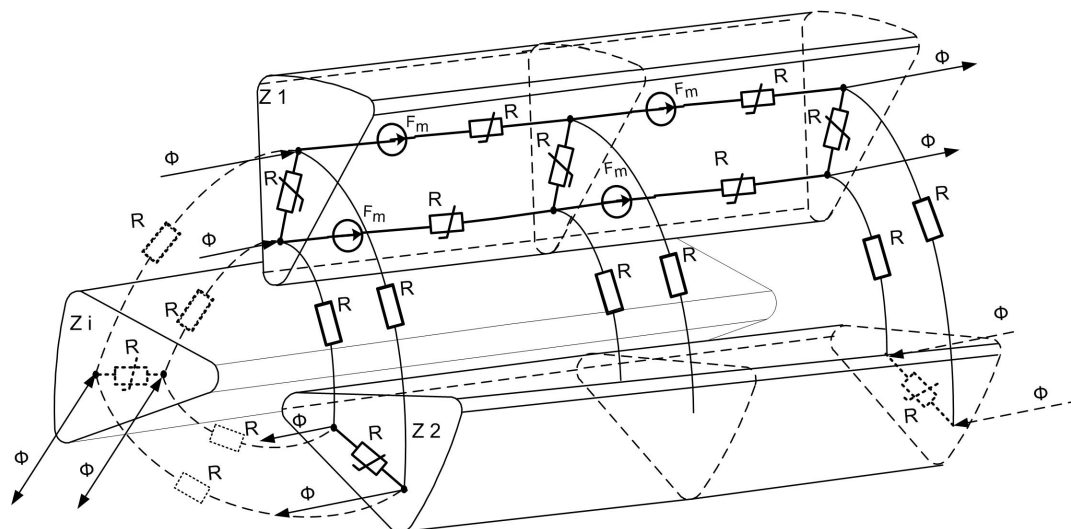


Рис. 2. Трехмерная схема замещения статора синхронного двигателя

двигателя. Из примера (рис. 2) видно, что даже при таком количестве разбиений магнитной системы составление уравнений без привлечения дополнительного математического аппарата носит весьма сложный характер, а при числе разбиений более пяти принципиально не возможно. С целью автоматизации расчета, учитывая сложность задачи, нами предложено использовать матрично-топологический метод графов, способствующий записи расчетных уравнений методом контурных токов для магнитных цепей с большим количеством узлов и объемной конфигурации ветвей.

Приведенная математическая модель синхронного двигателя позволяет рассчитывать характеристики в статических режимах работы, выполнить анализ полученных характеристик, исследовать дисковые электрические машины с большим воздушным зазором, проводить поиск наилучших геометрических соотношений магнитной системы.

Для дальнейших исследований и оценки адекватности методики расчета и моделирования был сконструирован и испытан макетный образец (рис. 3) герметичного синхронного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Полученные в результате экспериментальных исследований зависимости подтвердили правильность выбранных методов и адекватность создан-

ной математической модели. В результате сравнения расчетных характеристик с экспериментальными полученными данными определена максимальная погрешность результатов теоретических исследований дискового двигателя, не превышающая 15 %.

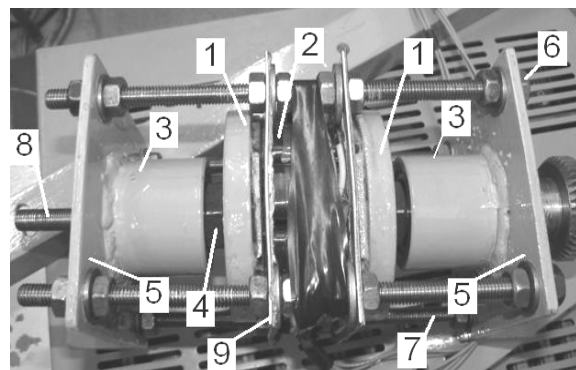


Рис. 3. Конструкция макетного образца дискового двигателя: 1) ротор; 2) стержень статора двигателя; 3) подшипниковый узел; 4) контргайка; 5) опора с подшипниковым узлом; 6) гайка прижимного щита; 7) шпилька; 8) вал; 9) прижимной щит

Разработанная нами статическая модель дает возможность исследовать внешние характеристики машины, определить пусковой момент и определить угол сдвига дисков ротора относительно друг друга в зависимости от нагрузки на валу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федянин А.Л., Муравлев О.П., Леонов С.В., Калаев В.Е., Лялин А.В. Исследование герметичной синхронной машины дискового типа // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 23–25.
2. Федянин А.Л., Леонов С.В., Муравлев О.П. Анализ применения дисковой машины с магнитной связью двух роторов в составе оборудования ядерно-химической отрасли // Современные техника и технологии: Матер. XIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (СТТ–2007). – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 346–347.
3. Леонов С.В., Каранкевич А.Г., Муравлев О.П. и др. Вопросы исследования трехмерного магнитного поля электрических машин с аксиальным магнитным потоком // Известия вузов. Электромеханика. – 2004. – № 5. – С. 8–12.
4. Leonov S.V., Kalayev V.E., Grasmik W., Shipkov A.A. Ways of Rotating Motion Driving Gears Closure // European Journal of Natural History. – 2006. – № 6. – P. 81–86.
5. Леонов С.В., Муравлев О.П., Каранкевич А.Г. Опыт разработки герметичных электромашинных источников питания инклинометрических устройств // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 162–165.

Поступила 30.04.2008 г.