

УДК 621.313.8

**ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ БЕСКОНТАКТНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ДИСКОВОГО ТИПА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

В.Г.Киреев, канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Рассмотрена конструкция бесконтактного беспазового электрического двигателя дискового типа с постоянными магнитами и трехфазной обмоткой. Проведено моделирование магнитной системы двигателя при вариации геометрических размеров ее элементов и определены оптимальные соотношения между ними, при которых достигается наибольший электромагнитный момент на валу. Сформулированы рекомендации по построению дисковых двигателей с максимальным моментом при минимальном объеме магнитного материала, затраченного на систему возбуждения магнитного потока. Библ. 7, рис. 7.

Ключевые слова: неодимовый магнит, беспазовый двигатель, электромагнитный момент.

Создание в 1984 году специалистами компаний Sumitomo и General Motors неодимового сплава для производства постоянных магнитов стало революционным в электромашиностроении. Сейчас уже трудно представить современную технику без применения неодимовых магнитов. Их можно найти во многих устройствах, окружающих нас: компьютерах, мобильных телефонах, динамиках, автомобилях, самолетах и даже в брелках и миниатюрных магнитных замках. Освоению серийного производства неодимовых магнитов привело к быстрому развитию электромобилестроения и ветроэнергетики. Стремительный рост потребления неодимового сплава привел к его столь же быстрому удорожанию, поскольку запасы этого редкого металла на нашей планете ограничены и сосредоточены, главным образом, в одной стране – Китае. Сейчас Китай добывает около 22000 тонн неодима в год, что составляет по разным оценкам от 80% до 90% мировой добычи [7]. Это не так уж и много, если учесть, что, например, на изготовление одного только ветрогенератора мощностью 1 МВт требуется 700 кг неодимовых магнитов. По оценкам специалистов запасов редких металлов при современных темпах добычи и существующей технологии их обогащения хватит на три–четыре десятилетия.

В связи с этим становится особенно актуальной задача экономного расходования редкоземельных магнитных материалов, которая может быть решена путем оптимизации конструкций электрических машин с целью получения наивысшего КПД. Для каждого типа машин существуют свои критерии построения ее электромагнитного ядра – области, в которой происходит преобразование электрической энергии в механическую (для двигателя), и наоборот (для генератора). В данной статье речь пойдет о бесконтактном двигателе дискового типа с постоянными магнитами и беспазовой конструкцией статора. Целью работы является отыскание такой геометрии электромагнитного ядра двигателя, при которой подводимая электрическая мощность наилучшим образом преобразуется в электромагнитный момент. Вопросу построения оптимальных беспазовых магнитоэлектрических двигателей традиционного цилиндрического исполнения уже было посвящено ряд публикаций [1–4], в которых сформировался подход к поиску оптимальных решений. Аналогичным образом будем решать задачу отыскания оптимальных размеров электромагнитного ядра и в случае дисковой конструкции машины, учитывая ее особенности.

На рис. 1 показана конструкция беспазового магнитоэлектрического дискового двигателя, состоящего из системы трехфазных обмоток 1, магнитов 2, намагниченных аксиально, и двух магнитопроводов 3, где: R_g – габаритный размер электромагнитного ядра, R и r – наружный и внутренний радиусы магнитной системы соответственно, h – длина магнита вдоль оси намагниченности, s – толщина обмотки, b – ширина активной зоны обмотки, l_a – активная длина обмотки, δ – длина воздушного зазора. Задача отыскания оптимума состоит в том, чтобы найти такое соотношение между перечисленными геометрическими параметрами, при котором достигается максимальный электромагнитный момент на единицу затраченной электрической мощности. Опоры вращения не показаны. Решение поставленной задачи в общем виде с таким количеством переменных затруднительно, поэтому

введем некоторые допущения и ограничения, которые создадут базу для сравнения различных вариантов расчета момента при вариации геометрии электромагнитного ядра.

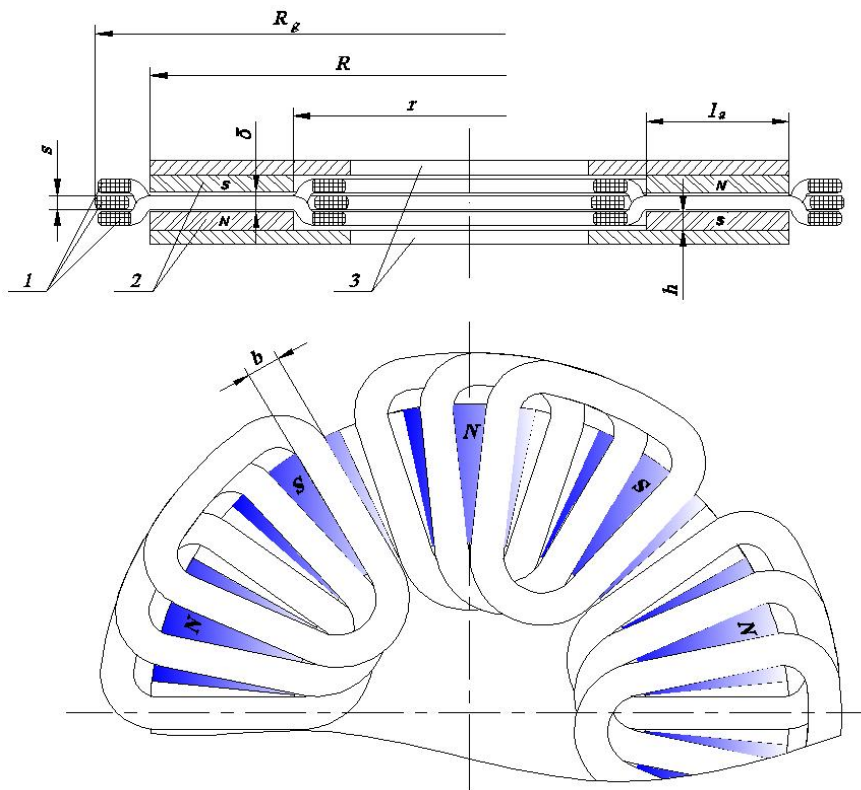


Рис. 1

Примем условие постоянства потребляемой электрической мощности $P = \text{const}$ и зафиксируем габаритный размер электромагнитного ядра $R_g = \text{const}$. Предполагаем также, что рассеиваемая в обмотке активная мощность и напряжение питания U постоянны. Откуда следует, что ток в обмотке $I = \text{const}$ и ее активное сопротивление $R_a = \text{const}$. Скорость вращения ротора не влияет на конфигурацию магнитной системы, поэтому будем рассматривать только пусковой режим, когда ротор не вращается, а значит, отсутствует ЭДС. Беспазовая конструкция дисковой машины предполагает размещение обмотки в зазоре между магнитом и магнитопроводом или между двумя магнитами (рис. 1). Такая компоновка требует применения только высококоэрцитивных магнитных материалов, которые характеризуются низкой магнитной проницаемостью, приближающейся к магнитной проницаемости воздуха. Относительная магнитная проницаемость неодимовых магнитов лежит в пределах 1,04–1,08. Поэтому магнитная цепь для потока магнитной индукции, вызванного протеканием тока в обмотке, обладает большим сопротивлением, что обуславливает малое индуктивное сопротивление обмотки. Эта особенность беспазовых машин позволяет пренебречь реактивными потерями в обмотке ввиду их малости по сравнению с активными потерями. В рамках данной статьи не рассматривается задача оптимизации машины в ограниченном объеме. Лимитируется только радиальный габарит двигателя. В связи с этим, толщина магнитопроводов может быть неограниченной, что исключает возможность их насыщения.

Для проведения вариантных расчетов двигателя зададимся габаритным размером $R_g = 70$ мм. Исходя из выбранной конструкции двигателя, сократим количество переменных, определив взаимозависимость некоторых геометрических параметров:

$$- \text{активная длина обмотки} - l_a = R - r; \quad (1)$$

$$- \text{наружный радиус магнитной системы} - R = R_g - b - s - 1; \quad (2)$$

$$- \text{ширина активной зоны катушки} - b = 2(r - s) \sin(\pi / 6p); \quad (3)$$

- длина среднего витка катушки -

$$l_{sr} = 2(l_a + b + 1) + (R + s + b/2 + 1)\pi / p + 2(r - s - b/2 - 1)\sin(\pi / 2p), \quad (4)$$

где p – количество пар полюсов. Технологический зазор между обмоткой статора и магнитами ротора примем равным 0,5 мм с каждой стороны, тогда величина суммарного воздушного зазора $\delta = s + 1$. Длину магнитов, установленных на нижнем и верхнем магнитопроводах, считаем одинаковой и равной h .

Общее выражение для электромагнитного момента от токов в трехфазной обмотке имеет вид

$$M = 4B_\delta I w l_a p R_{sr}, \quad (5)$$

где $R_{sr} = (R - r)/2$ – среднее плечо приложения силы, w – количество витков в одной катушке, B_δ –

средняя величина индукции в объеме зазора, заключенном между полюсами магнитов. Выразим количество витков в обмотке через геометрические размеры катушки

$$w = k_s b s / S_{np}, \quad (6)$$

где k_s – коэффициент заполнения паза медью, S_{np} – сечение провода по меди. Количество витков w может быть также определено через активное сопротивление обмотки R_a , которое, в соответствии с принятыми условиями постоянства рассеиваемой мощности и отсутствия вращения, может быть выражено через ток в обмотке и мощность двигателя $R_a = P / I^2 = 2 p \rho l_{sr} w / S_{np}$, откуда

$$S_{np} = 2 I^2 p \rho l_{sr} w / P, \quad (7)$$

где ρ – удельное сопротивление меди. Подставив выражение (7) в (6), находим

$$w = I^{-1} \sqrt{P k_s b s / 2 p \rho l_{sr}}. \quad (8)$$

Значение электромагнитного момента (5) после подстановки в него выражений (1), (8) принимает вид

$$M = B_\delta (R^2 - r^2) \sqrt{2 P k_s b s p / \rho l_{sr}}. \quad (9)$$

Анализ формулы (9) с учетом выражений (2) и (3) показывает, что момент является функцией четырех переменных: индукции в воздушном зазоре B_δ , количества пар полюсов p , внутреннего радиуса магнитной системы r и толщины обмотки s . Причем, индукция B_δ , помимо того, что она зависит от p , r и s , зависит от длины магнита h . Процесс расчета электромагнитного момента для каждого фиксированного значения p , r , h и s разобьем на два этапа. На первом с помощью пакета программ Comsol 3.5a для дискретных значений p , r , h вычисляем значение индукции в зазоре при переменной толщине обмотки s , и в среде MATLAB 7.0 производим аппроксимацию функции $B_\delta(s)$. На втором этапе для заданных значений p , r и s находим по формуле (10) величину пускового электромагнитного момента с учетом полученных выражений для $B_\delta(s)$.

На рис. 2 показана геометрия магнитной системы дискового двигателя (рис. 1), реализованная средствами пакета Comsol 3.5a.

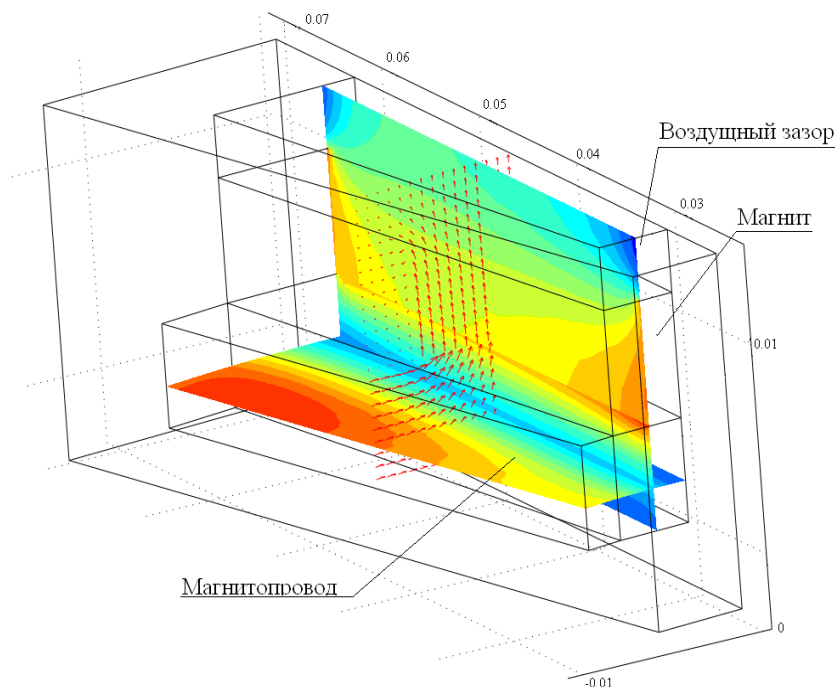


Рис. 2

Так как магнитная система имеет несколько плоскостей симметрии, то рассматривается только половина полюсного деления нижней ее части, а использование в двигателе высококоэрцитивных постоянных магнитов и беспазовой конструкции позволяет пренебречь реакцией якоря и рассчитывать магнитное поле в магнитоэстатическом приближении без учета тока в обмотке. На границе, проходящей через ось симметрии магнита, принималось условие отсутствия нормальной составляющей индукции $\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = 0$. Для остальных границ – равенство нулю скалярного магнитного потенциала $V_m = 0$. Магниты, входящие в состав магнитной системы, имели относительное значение магнитной проницаемости магнитов $\mu_r = 1,04$ и остаточ-

ную индукцию $B_r = 1,2$ Тл. Вследствие отсутствия насыщения магнитопроводов их относительная величина магнитной проницаемости принималась постоянной и равной 1000. При моделировании магнитной системы и расчете электромагнитного момента потребляемая мощность принималась равной 100 Вт и коэффициент заполнения катушки медью $k_s = 0,5$.

Как уже отмечалось, на первом этапе расчета задавался ряд значений p , h и соответствующая величина внутреннего радиуса r . Рассматривались двигатели с $p=(3; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 20)$ и длиной магнитов $h=(2,5; 3; 4; 5; 6; 8)$ мм. В результате расчетов определялось интегральное и среднее значения z -компоненты магнитной индукции $B_{\delta z}$ в воздушном зазоре, так как направление оси z совпадает с направлением намагниченности магнитов, и именно эта компонента индукции участвует в создании искомого электромагнитного момента. После обработки массива полученных значений индукции и аппроксимации зависимости $B_{\delta z}(s)$ дальнейший расчет момента и обработка результатов вычислений проводился с помощью пакета MATLAB 7.0. Для выбранных значений p и h при вариации величин внутреннего радиуса r и толщины обмотки s по формуле (9) определялся пусковой момент M двигателя и находилось его максимальное значение M_{\max} .

Предварительные расчеты двигателя показали, что значение средней индукции в зазоре слабо зависит от внутреннего радиуса магнитной системы. Изменение радиуса на величину $\pm 10\%$ приводит к изменению индукции на величину от $\pm 0,2\%$ при $p=16$ до $\pm 0,8\%$ при $p=4$, поэтому диапазон изменения r выбирался таким, чтобы погрешность вычисления индукции не превышала 1%. Полученное значение внутреннего радиуса, при котором достигался максимальный момент M_{\max} , сравнивалось с начальной его величиной, принятой при моделировании магнитной системы, и если оно не выходило за рамки допустимого диапазона, то расчет считался окончательным, в противном случае, производилась корректировка r , и расчет повторялся.

В соответствии с теоремой подобия [5] картина поля в геометрически подобных магнитных системах, т.е., отличающихся только масштабом, одинакова при условии использования одинаковых магнитных материалов. Поэтому для того, чтобы результаты, полученные для конкретного двигателя с заданными геометрическими размерами, можно было бы распространить на геометрически подобные машины, удобно оперировать относительными единицами. На рис. 3 в графическом виде показан один

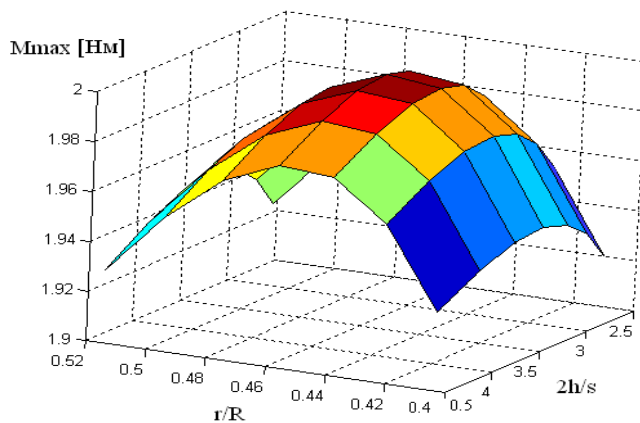


Рис. 3

из вариантов расчета функции $M(r/R, h/s)$, отчетливо демонстрирующий наличие единственного экстремума функции, который наступает при однозначном соотношении внутреннего r и наружного R радиусов двигателя, а также отношении суммарной длины магнита $2h$ к толщине обмотки s .

По результатам расчета всех вариантов была построена зависимость максимального момента от количества пар полюсов p и суммарной длины магнитов $2h$, показанная на рис. 4. Анализ графика показывает, что для наилучшего преобразования потребляемой электрической мощности в электромагнитный момент на валу необходимо строить двигатель с количеством пар полюсов от 10 до 12 в зависимости от длины магнита.

Проведенные исследования позволяют решить наиболее сложную задачу, стоящую перед разработчиком магнитоэлектрических двигателей дискового типа, а именно, выбор оптимальных соотношений между длиной магнита и толщиной обмотки, а также между внутренним и наружным радиусом магнитной системы. На рис. 5,

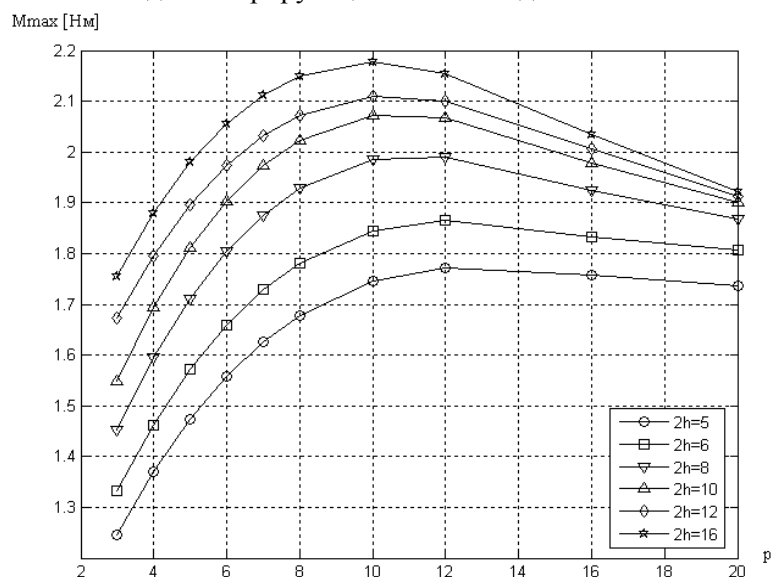


Рис. 4

a показана зависимость толщины обмотки от длины магнита и p , где $Ln=s/2h$ – относительная толщина обмотки, $Hm = 2h/R_g$ – относительная суммарная длина нижнего и верхнего магнитов. Значения Ln соответствуют варианту расчета двигателя, обладающего максимальным моментом на единицу затраченной мощности. Из графика следует, что при увеличении числа пар полюсов и длины магнита относительная толщина обмотки уменьшается, причем зависимость носит нелинейный характер. На рис. 5, б очевиден также нелинейный характер изменения относительного внутреннего радиуса магнитной системы и отношения внутреннего радиуса к наружному в оптимальной машине.

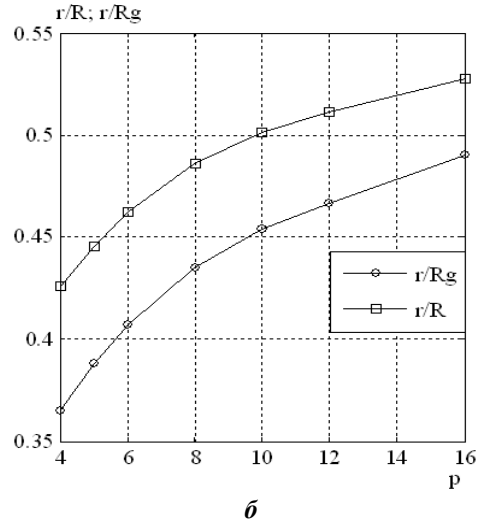
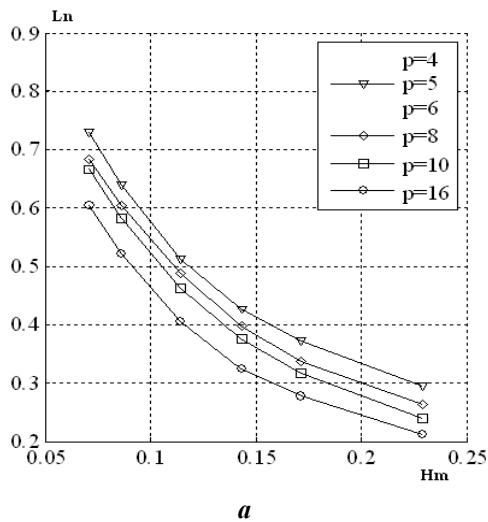


Рис. 5

Благодаря полученным зависимостям существенно упрощается процесс выбора размеров электромагнитного ядра дискового двигателя и проведение предварительного расчета электромагнитного момента, который проводится в следующей последовательности. По габаритному радиальному размеру электромагнитного ядра

машины R_g , выбранным значениям количества пар полюсов p и длины магнита h из графика на рис. 5, б находим внутренний r и наружный R радиусы магнитной системы, а из графика на рис. 5, а определяем относительное Ln и абсолютное s значения толщины обмотки. Для расчета средней величины магнитной индукции в воздушном зазоре используем зависимости, показанные на рис. 6. На заключительном этапе по формулам (1), (3) и (4) определяем l_a, b и l_{sr} соответственно, и по формуле (9) находим величину электромагнитного момента двигателя на единицу затраченной мощности.

Проведенные исследования позволили также установить зависимость момента, приходящегося на единицу объема использованного магнитного материала V_m , от относительной длины магнита Hm и количества пар полюсов двигателя (рис. 7). Анализ зависимости показывает, что увеличение длины магнита приводит к его худшему использованию. Это объясняется увеличением потоков рассеяния с боковых граней магнитов и, как следствие, необходимостью уменьшения относительной длины воздушного зазора (рис. 5, а). Это, в свою очередь, приводит к уменьшению объема активной зоны электромагнитного ядра. Для количественной оценки степени влияния длины магнита на момент были проведены расчеты оптимальных дисковых двигателей с $p=10$ и длинами магнитов $h=2,5$ мм и $h=5$ мм.

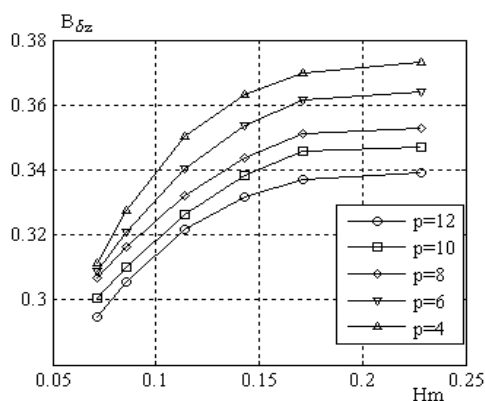


Рис. 6

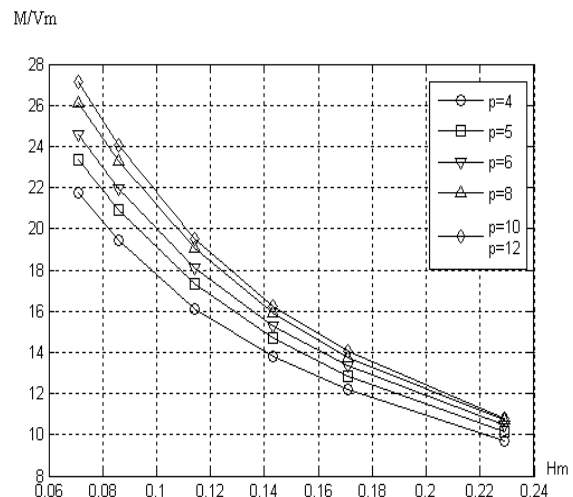


Рис. 7

Оказалось, что увеличение объема магнитов в два раза дает прирост электромагнитного момента всего на 15%. Поэтому при построении электромагнитного ядра машины для достижения необходимого момента желательно идти по пути уменьшения длины магнита за счет увеличения наружного радиуса магнитной системы или путем разбиения магнитной системы на несколько частей [6].

Заключение. Выработанные рекомендации по выбору размеров электромагнитного ядра и количества пар полюсов магнитоэлектрической машины дискового типа позволяют построить такой электромеханический преобразователь, который наилучшим образом преобразует затраченную электрическую мощность в электромагнитный момент на валу.

1. Антонов А.Е., Киреев В.Г. Построение оптимальных безпазовых магнитоэлектрических двигателей // Техн. электродинамика. – 2003. – №4. – С. 38–40.

2. Антонов А.Е., Киреев В.Г. Моделирование многополюсных магнитных систем магнитоэлектрических двигателей с учетом межполюсных полей рассеяния // Техн. электродинамика. – 2008. – №4. – С. 47–50.

3. Антонов А.Е., Киреев В.Г. К вопросу проектирования магнитных систем безпазовых магнитоэлектрических двигателей // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Енергоефективність: Зб. наук. пр. – Київ, ІЕД НАН України, 2001. – С. 172–176.

4. Антонов А.Е., Филоменко А.А. Оптимизация геометрии безпазовых двигателей магнитоэлектрического типа с цилиндрическим ротором // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 25. – С. 54–58.

5. *Постоянные магниты.* Справочник / Под ред. Ю.М.Пятина. – М.: Энергия, 1980. – 487 с.

6. Афонин А.А., Гребеников В.В., Цежневски П. Особенности топологии магнитоэлектрических дисковых двигателей // Техн. электродинамика. – 1999. – №1. – С. 50–58.

7. <http://neodim.if.ua/helpers.htm>

УДК 621.313.8

ПОБУДОВА ОПТИМАЛЬНИХ БЕЗКОНТАКТНИХ ДВИГУНІВ ДИСКОВОГО ТИПУ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

В.Г.Кіреєв, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

Розглянуто конструкцію безконтактного безпазового електричного двигуна дискового типу з постійними магнітами та трифазною обмоткою. Проведено моделювання магнітної системи двигуна при варіації геометричних розмірів її елементів, і визначено оптимальні співвідношення між ними, при яких досягається найбільший електромагнітний момент на валу. Зформульовано рекомендації з побудови дискових двигунів з максимальним моментом при мінімальному об'ємі магнітного матеріалу, витраченого на систему збудження магнітного потоку. Бібл. 7, рис. 7.

Ключові слова: неодимовий магніт, безпазовий двигун, електромагнітний момент.

CONSTRUCTION OF THE OPTIMAL BRUSHLESS MOTOR OF DISK TYPE WITH PERMANENT MAGNETS

V.G.Kireyev

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine.**

The design of the brushless slotless electric motor of disc type with permanent magnet and three-phase winding has been considered. The modeling of the motor magnetic system with varying of the geometrical dimensions of its elements has been concluded and defined the optimal correlation between them, which reached the highest electromagnetic torque on the shaft. Recommendations on the construction of the disk motors with the maximum torque with a minimum amount of magnetic material expended on the excitation system of magnetic flux have been stated. References 7, figures 7.

Key words: neodymium magnet, slotless motor, electromagnetic torque.

1. Antonov A., Kireyev V. Construction of optimal slotless magnetoelectrical motors // Tekhnichna elektrodynamika. – 2003. – №4. – Pp. 38–40. (Rus)

2. Antonov A., Kireyev V. Modelling of multipolar magnetic systems of magnetoelectrical motors, taking into account the inter-polar leakage fields // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – №4. – Pp. 47–50. (Rus)

3. Antonov A., Kireyev V. On the design of magnetic systems slotless magnetoelectrical motors // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Energoefektyvnist: Zbirnyk naykovykh prats. – Kyiv, IED NAN Ukrainy, 2001. – Pp. 172–176. (Rus)

4. Antonov A., Filomenko A. Optimization of the geometry of slotless motors of magnetoelectrical type with a cylindrical rotor // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – №25. – Pp. 54–58. (Rus)

5. *Permanent magnet.* Spravochnik / Pod redaktsiei Yu.Piatina. – Moskva: Energiia, 1980. – 487 p. (Rus)

6. Afonin A., Grebenikov V., Tsezhnevski P. Features of the magnet-electric disk motors topology // Tekhnichna elektrodynamika. – 1999. – №1. – Pp. 50–58. (Rus)

7. <http://neodim.if.ua/helpers.htm>

Надійшла 06.03.2012

Received 06.03.2012