

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ В БЫСТРОХОДНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Герасин А. А.¹, Исмагилов Ф. Р.², Хайруллин И. Х.², Вавилов В. Е.²

¹ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», Москва, Россия (Россия, 125319, г. Москва, ул. Викторенко, 7). ² ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» Уфа, Россия, (Россия, 45000, г. Уфа, ул. К.Маркса,12)

Одним из возможных путей увеличения энергетических показателей и КПД быстроходной магнитоэлектрической машины (БММ) является снижение потерь энергии на трение в механических подшипниках, которые, по оценкам экспертов, составляют 20–25 %. Решением проблемы трения в БММ является применение бесконтактных подшипниковых опор, а в частности, гибридных магнитных подшипников (ГМП). Целью данной работы является исследование способов экранирования ГМП, определение материала экрана ГМП и влияния экранирования на электромеханические и электромагнитные процессы в БММ. Для выполнения данной цели проведены исследования методами численного компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys сил взаимодействия между ротором БММ и ГМП. В результате исследований установлено, что данные силы являются паразитными и являются инициаторами аварийных ситуаций БММ на ГМП. В связи с этим рассмотрены возможные методы минимизации величины данных сил, представлено оптимальное конструктивное решение, позволяющее минимизировать данные силы, и разработаны практические рекомендации по снижению данных взаимодействий.

Ключевые слова: быстроходная магнитоэлектрическая машина, гибридный магнитный подшипник, магнитомягкие экранирующие сплавы.

CHARACTERISTICS OF HYBRID MAGNETIC BEARING IN SPEED MACHINES MAGNETOELECTRIC

Gerasin A. A.¹, Ismagilov F. R.², Khairullin I. H.², Vavilov V. E.²

¹Federal State Unitary Enterprise "State Scientific-Research Institute of Aviation Systems", Moscow, Russia (Russia, 125319, Moscow, ul. Viktorenko, 7). ²FGBOU VPO "Ufa State Aviation Technical University," Ufa, Russia, (Russia, 45000, Ufa, ul. Karl Marx 12)

One possible way to increase energy performance and efficiency of high-speed magneto-electric machines (BMM) is to reduce energy losses due to mechanical friction in the bearings, which according to experts, are 20-25%. Solution to the problem of friction in the BMM is the use of non-contact bearings, and in particular the hybrid magnetic bearing (GMF). The purpose of this paper is to study ways to escape the GMF, the definition of screen material GMF and the effect of shielding on the electromechanical and electromagnetic processes in the BMM. To fulfill this goal, the study carried out by methods of numerical simulation in Ansys software complex interaction forces between the rotor and the BMM GMF. As a result, studies show that these forces are parasitic and are the initiators of accidents in the BMM GMF. In connection with this, the possible methods to minimize the amount of these forces presents an optimal design solution that allows you to minimize these forces, and develop practical recommendations to reduce these interactions.

Key words: high-speed magneto machine, a hybrid magnetic bearing, magnetically shielding alloys.

В автономных системах энергетики нашли широкое применение быстроходные магнитоэлектрические машины (БММ) [6]. Это обусловлено рядом их достоинств перед прочими электрическими машинами, такими, как отсутствие контакта между динамически подвижными узлами, высокие энергетические показатели и надежность, минимальные массогабаритные показатели и момент инерции ротора [4]. Одним из возможных путей увеличения энергетических показателей и КПД БММ является снижение потерь энергии на

трение в механических подшипниках, которые, по оценкам экспертов, составляют 20–25 % [1].

Решением проблемы трения в БММ является применение бесконтактных подшипниковых опор, а в частности, гибридных магнитных подшипников (ГМП), представляющих собой магнитный подшипник на постоянных магнитах и электромагнитную систему управления, рисунок 1.

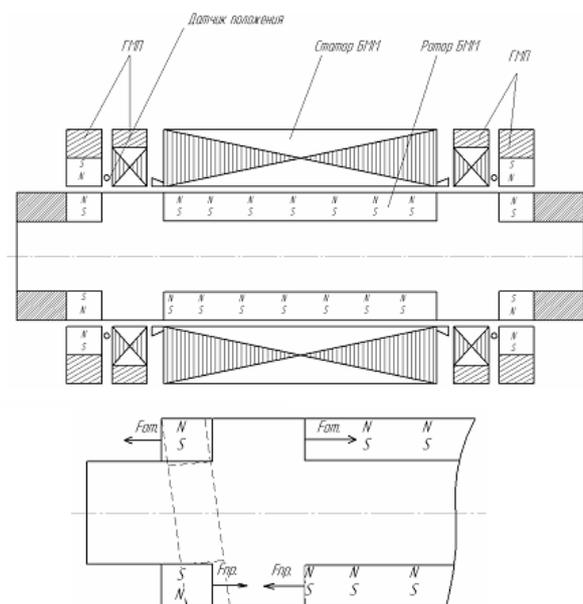


Рисунок 1. БММ на ГМП (сверху) и силы взаимодействия между кольцами ГМП и ротором БММ (снизу)

При проектировании ГМП в качестве опор БММ важной задачей является определение места установки магнитов ГМП на валу БММ. Причем, место установки ГМП на валу зависит не только от динамических процессов БММ (колебания вала, частота вращения), но и от силы взаимодействия постоянных магнитов ротора БММ и постоянных магнитов ГМП. Так как данная сила, с учетом того, что ротор БММ переменного полюсного, а магниты ГМП в торцевой зоне однополюсные, рисунок 1, может привести как к колебаниям ротора БММ в осевом направлении, так и к колебаниям и к перекосам магнитов ГМП. Результатом перекосов и колебаний ГМП являются нарушение эксплуатации и поломка БММ на ГМП, усиление крепежных элементов и упоров ГМП на валу и в корпусе БММ, что, в свою очередь, увеличивает массогабаритные показатели БММ. Таким образом, обозначенные выше результаты данного взаимодействия приводят к экономическим убыткам, связанным с простоем оборудования, увеличением эксплуатационной площади БММ, затратами на ремонт и ликвидацию последствий аварий.

Ввиду этого важно рассмотреть методы уменьшения данного взаимодействия при условии сохранения эксплуатационных параметров ГМП и БММ.

Так как данное взаимодействие обусловлено магнитными полями постоянных магнитов БММ и ГМП, для его снижения необходимо уменьшить уровень магнитных полей в осевом направлении. При этом уровень магнитных полей в радиальном направлении должен оставаться неизменным. Для уменьшения уровня магнитных полей используют два основных мероприятия: увеличение расстояния между источниками поля и экранирование. Увеличение расстояния между источниками поля приведет к увеличению массогабаритных показателей БММ, а также может вызвать колебания вала, так как увеличение длины приводит к гибкости вала, то снижения взаимодействия между магнитами ротора и магнитами ГМП путем увеличения расстояния нецелесообразно.

Таким образом, целью данной работы является исследование способов экранирования ГМП, определение материала экрана ГМП и влияния экранирования на электромеханические процессы ГМП в БММ.

Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

- численное определение силы взаимодействия между магнитами ротора БММ и ГМП;
- исследование силы взаимодействия между магнитами ротора БММ и ГМП и сил на поверхности ротора БММ и на поверхности магнитов ГМП при экранировании магнитов ГМП в осевом направлении магнитомягкими материалами;
- исследование силы взаимодействия между магнитами ротора БММ и ГМП при увеличении воздушного зазора между ними и при увеличении длины вала БММ.

Варианты экранирования магнитов ротора БММ не рассматриваются ввиду того, что это может привести к снижению мощности БММ.

Методом решения поставленных задач является численное компьютерное моделирование трехмерных магнитных полей и электромеханических процессов методом конечных элементов в программном комплексе *Ansys*.

При этом использовались следующие допущения:

- магнитное поле рассматривается в определенный момент времени, при номинальном режиме работы БММ, то есть в статическом режиме;
- конструктивные особенности, в частности, рассматривается только ротор БММ и вращающийся магнит ГМП.

При решении поставленных задач методом компьютерного моделирования применяются уравнения Лапласа. Для того чтобы уравнения Лапласа имели единственное решение для поставленных задач, используются граничные условия на замкнутой границе [3]:

1. Граничные условия Дирихле– $\varphi_M = f_1(x, y, z)$;
2. Граничные условия Неймана– $\frac{\partial \varphi_M}{\partial n} = f_2(x, y, z)$;
3. Граничные условия третьего рода– $\frac{\partial \varphi_M}{\partial n} + f_3(\varphi_M) = f_4(x, y, z)$.

При моделировании принимается, что кольца постоянных магнитов ГМП имеют одинаковый диаметр с ротором БММ. Данное конструкционное решение, принято исходя из условий прочности ротора БММ[5]:

$$D_1 = 60 \frac{v}{\pi n}, \quad (1)$$

где D_1 – внутренний диаметр ротора БММ, м; v - линейная скорость, м/с; n – частота вращения БММ, об./мин.

Ввиду того, что кольца ГМП и ротор БММ вращаются с одинаковой частотой, исходя из условий прочности (1), их диаметры принимаются равными.

В качестве материала постоянных магнитов ротора и колец ГМП применяется сплав $NdFeB N33$ $B_r = 1.13 - 1.17, H_c \geq 955 \text{ кА}$, материал вала – конструкционная сталь, материал экрана – магнитомягкий сплав, свойства представлены в таблице 1[2], толщина экрана 1 мм, окружающая среда – воздух, расстояние между ротором и магнитами ГМП 10 мм.

Таблица 1. Характеристики экранирующих материалов

Материал	$\mu_{нач}$	μ_{max}	B_s , Тл	H_c , А/м
71КНСР	20000	800000	0,5	0,8
АМАГ–172	80000	1500000	0,48	0,4
79НМ	25000	100000	0,7	2
Супермаллой	100000	1500000	0,7	0,5

В результате моделирования была определена сила взаимодействия между магнитами ротора БММ и ГМП, которая составила 20Н.

По результатам анализа данных компьютерного моделирования были построены диаграммы, определяющие зависимость силы взаимодействия магнитов ротора и магнитов ГМП от экранирования магнитомягкими материалами, рисунок 2.

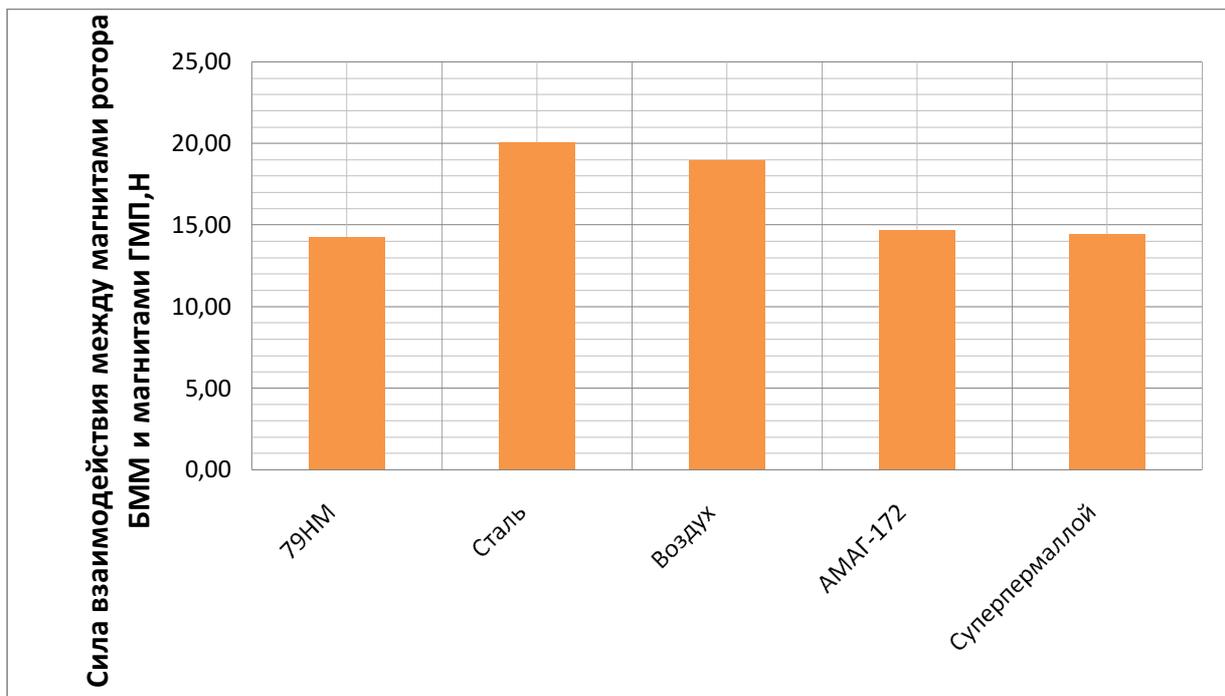


Рисунок 2. Диаграмма зависимости сил взаимодействия магнитов ротора БММ и ГМП от материала экрана

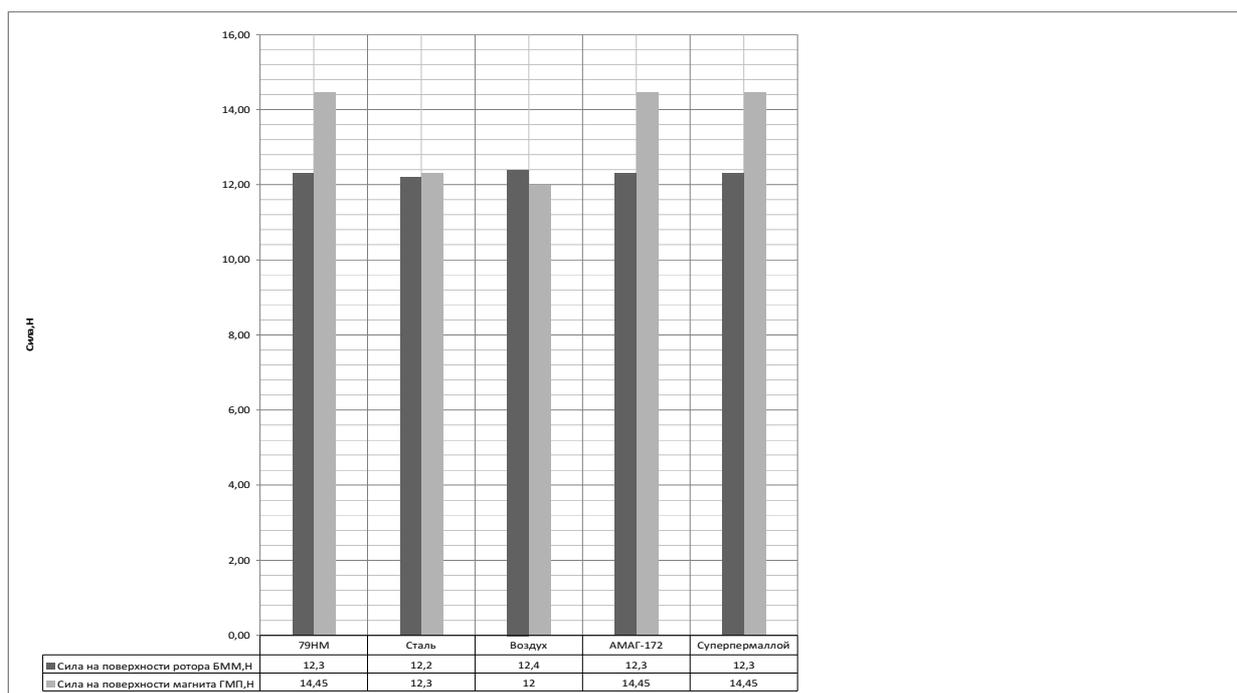


Рисунок 3. Диаграмма зависимости сил на поверхности магнитов ГМП и ротора БММ от материала экрана

В результате анализа полученных численных данных, рисунок 2, рисунок 3, определено, что при применении экранирующих магнитомягких сплавов силы взаимодействия между магнитами ГМП и ротором БММ снижаются на 30 % и составляют

для рассмотренного варианта 14,3–14,6Н. При увеличении расстояния между источниками поля, на величину равную толщине экрана, силы взаимодействия снижаются лишь на 5 %. Наиболее эффективным экранирующим материалом является магнитомягкий сплав 79НМ. Силы взаимодействия между магнитами ротора БММ и магнитами ГМП при экранировании данным материалом, по сравнению с другими рассмотренными магнитомягкими сплавами, меньше на 2–3 %. Кроме того, выявлено увеличение сил на поверхности магнитов ГМП на 16,6 % при экранировании магнитомягкими сплавами, рисунок 2, при этом силы на поверхности ротора БММ остаются практически неизменными.

Величина сил взаимодействия между магнитами ГМП и ротором БММ при данной конструкции экрана (экран прилегает к кольцам ГМП) остается значительной (14,3Н), что указывает на неэффективность данной конструкции экрана.

В связи с этим была рассмотрена конструкция экрана, содержащая дополнительный воздушный зазор между стенками экрана и источником поля (магнитами ГМП).

Результаты численного анализа сведены в диаграммы и представлены на рисунках 4,5. Величина дополнительного воздушного зазора при моделировании составляет 1 мм.

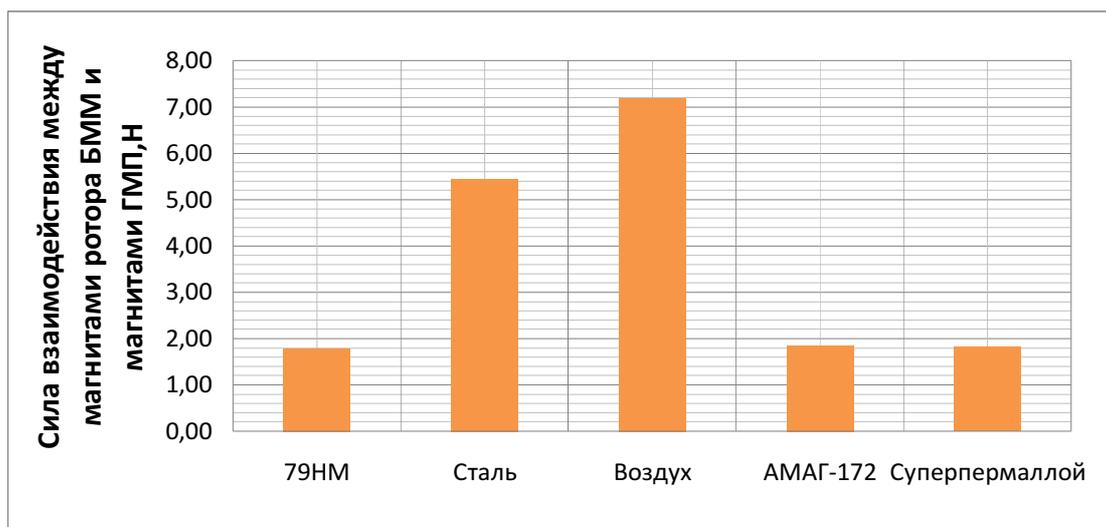


Рисунок 4. Диаграмма зависимости сил взаимодействия магнитов ротора БММ и ГМП от материала экрана при конструкции экрана с дополнительным воздушным зазором

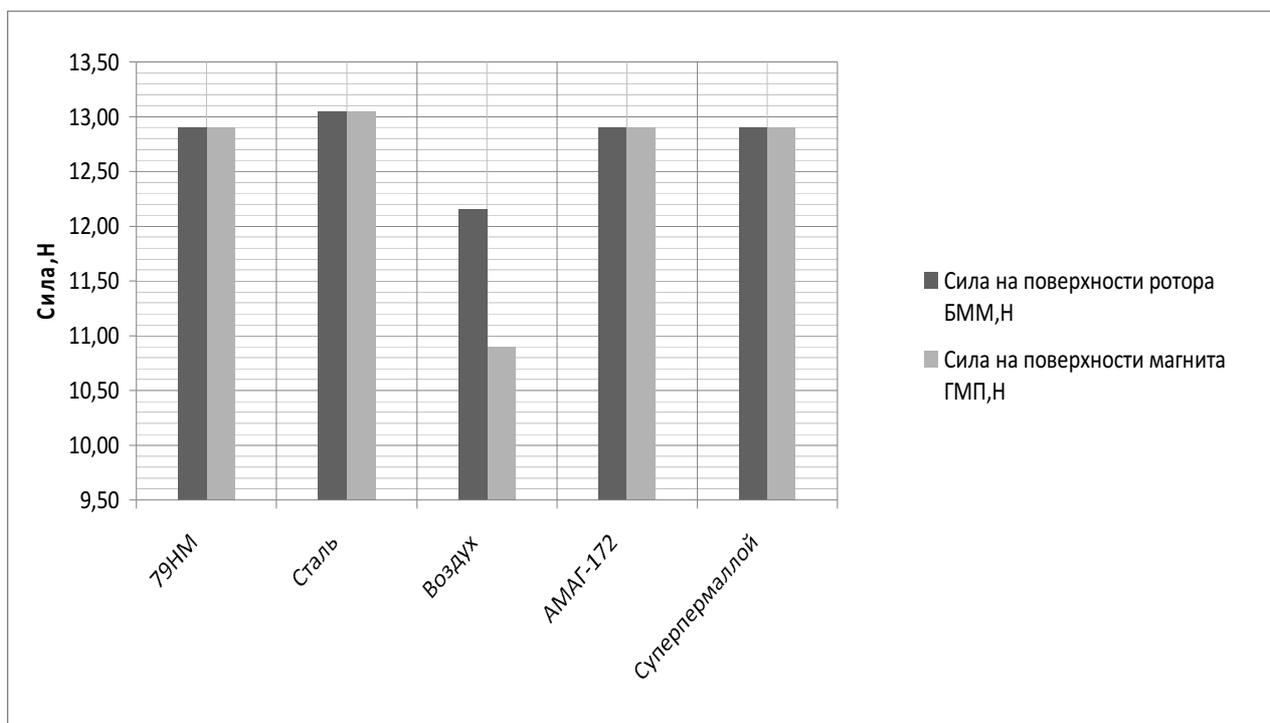


Рисунок 5. Диаграмма зависимости сил на поверхности магнитов ГМП и ротора БММ от материала экрана при конструкции экрана с дополнительным воздушным зазором

Анализ диаграмм (рисунок 4, рисунок 5) показал, что при применении данной конструкции из магнитомягких сплавов силы взаимодействия между магнитами ротора БММ и магнитами ГМП снижаются по сравнению с экранированием торцов магнитов ГМП в 7 раз, и составляют 1,8 Н. При этом силы на поверхности магнитов ГМП увеличиваются на 4,9 %. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность предложенной конструкции и возможность применения ее на практике.

При увеличении расстояния между источниками поля, за счет увеличения воздушного зазора между магнитами ГМП и магнитами ротора БММ в 3 раза силы взаимодействия снижаются на 41,6 %, при этом силы на поверхности магнитов ГМП снижаются на 10 %. Это объясняется тем, что часть силовых линий замыкается по воздуху и рассеивается.

При увеличении расстояния между источниками поля, за счет увеличения длины вала на 3 мм, силы взаимодействия между магнитами ротора БММ и магнитами ГМП снижаются на 70 %, при этом силы на поверхности магнитов ГМП практически неизменны.

Таким образом, наиболее эффективным способом снижения сил взаимодействия между магнитами ротора БММ и магнитами ГМП является экранирование магнитомягкими материалами. Причем определено, что конструкцией экрана, позволяющей минимизировать эти силы, является конструкция из магнитомягкого сплава 79НМ с дополнительным

воздушным зазором. Применение данной конструкции позволяет уменьшить силы взаимодействия, по сравнению с экранированием магнитомягким экраном, вплотную прилегающим к постоянным магнитам ГМП в 7 раз, по сравнению с конструкциями без экранирования ГМП в 11 раз.

Рекомендуется для повышения надежности и экономической выгоды от применения гибридных магнитных подшипников в бесконтактных магнитоэлектрических машинах экранировать постоянные магниты гибридных магнитных подшипников конструкцией из магнитомягкого материала с дополнительным воздушным зазором.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании бесконтактных магнитоэлектрических машин на гибридных магнитных подшипниках.

Список литературы

1. «Инновационное развитие – основы модернизации экономики России: Национальный доклад». – М.: ИМЭМО РАН, ГУ-ВШЭ, 2008. – 168 с.
2. Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Экранирование магнитных полей аморфными магнитомягкими материалами // [Электронный ресурс] URL: http://www.crismprometey.ru/Rus/Commercial/PDF/conf_EMS-2003.pdf, (дата обращения 15.06.2012).
3. Мартыненко Г. Ю. Определение жесткостных характеристик радиальных магнитных подшипников на двух кольцевых постоянных магнитах // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип. «Динаміка і міцність машин». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 38.
4. Ситин Д. А. Магнитные системы синхронных электрических машин с редкоземельными постоянными магнитами и повышенной частотой вращения: автореферат дисс... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2009. – 24 с.
5. Шаров В. С. Высокочастотные и сверхвысокочастотные электрические машины. – М.: Энергия, 1973. – 248 с.
6. Moore M. J. Micro-turbine generators. – Professional Engineering. Printed in the USA, 2002. – 113 с.

Рецензенты:

Ясовеев В. Х., д.т.н., профессор кафедры ИИТ, декан ФАП ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа.

Гизатуллин Ф. А., д.т.н., профессор кафедры ЭМ ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа.