

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА МУЛЬТИМОДУЛЬНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Павленко И.М.¹

¹ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия (410054, г. Саратов, Политехническая, д. 77), e-mail: irinkapavlenko@yandex.ru

В статье предложена конструкция ветроэлектростанции для применения в городской среде, представляющая систему однотипных транспортабельных модулей небольшой мощности. Для питания систем антиобледенения крыш зданий предложена упрощенная конструкция модуля мультимодульной ветроэлектростанции без преобразователя частоты. Приведены результаты моделирования магнитных полей ветрогенератора, выполненного в программе Elcut. Рассмотрены варианты выполнения сердечников ротора и статора из немагнитных материалов, а также выполнения сердечника статора беспазовой конструкции. Приведены графики изменения магнитной индукции в воздушном зазоре при изменении толщины магнитного сердечника ротора и высоты постоянных магнитов. Статья содержит кривые распределения магнитной индукции в воздушном зазоре при использовании постоянных магнитов трапециевидной формы, а также изменения кривых распределения индукции в воздушном зазоре ветрогенератора при изменении угла наклона боковых граней постоянных магнитов.

Ключевые слова: городская ветроэнергетика, мультимодульная ветроэлектростанция, синхронный генератор на постоянных магнитах, конфигурация магнитной системы, магнитная индукция.

FEATURES OF FORMATION WIND GENERATOR MAGNETIC SYSTEM MULTI-MODULAR WIND POWER PLANT

Pavlenko I.M.¹

¹Saratov State Technical University n.a. Gagarin U.A., Saratov, Russia (410054, Saratov, street Polytechnicheskaya, 77), e-mail: irinkapavlenko@yandex.ru

The paper proposed the construction of wind power plants for use in an urban environment, which represents a system of transportable modules of the same type of small capacity. Frost protection for the supply of building roofs proposed simplified design module multi-modular wind power without the drive. The results of modeling of magnetic fields wind turbine, made in the program Elcut. The variants of the rotor and stator cores of the magnetic materials and the implementation of the stator core bespazovoy structure. The graphs of changes in the magnetic induction in the air gap in the thickness of the magnetic core of the rotor and the height of the permanent magnets. The article contains the distribution curves of the magnetic induction in the air gap of the permanent magnets using the trapezoidal shape, and changes the distribution curves induction in the air gap when the wind turbine the angle the side faces of the permanent magnets.

Keywords: urban wind energy, multi-modular wind power plant, permanent magnets synchronous generator, configuration of the magnetic system, the magnetic induction.

Развитие городской ветроэнергетики в последние годы пошло заметными темпами. Муниципальные власти во многих странах, а также домовладельцы в городах переходят на небольшие ветрогенераторы индивидуального пользования, чтобы сократить расходы на электроэнергию. Новые ветроустановки городского типа должны быть бесшумными, не иметь вибрации, эстетично вписываться в архитектуру строений. Главное – они должны быть недорогими и технологичными в производстве, а также простыми и долговечными в эксплуатации.

Одним из наиболее эффективных направлений по созданию ветроустановок городского типа является создание многомодульных ветроэнергетических установок, состоящих из одного-двух десятков небольших ветроколес диаметром до 2 м [4].

Мультимодульная ветроэлектростанция (МВЭС) – это ветроэлектростанция, представляющая собой систему однотипных транспортабельных модулей небольшой мощности, конструктивно и функционально совместимых между собой, которыми управляет единая система управления [2]. Каждый из съемных модулей мультимодульной ветроэлектростанции включает в себя ветрогенератор, преобразователь частоты на основе инвертора тока и систему аккумуляторных батарей [1]. Ветрогенератор представляет собой совмещенную систему «ветроколесо – электрический генератор», причем установленное на валу ветроколесо расположено в роторе многополюсного синхронного генератора на постоянных магнитах (СГПМ). Применение мультимодульной ветроэлектростанции без преобразователя частоты возможно в качестве источника электроэнергии специальных кабельных систем антиобледенения и обогрева кровли и водостоков для защиты крыш административных и жилых зданий от снега, наледи и сосулек (рис. 1).

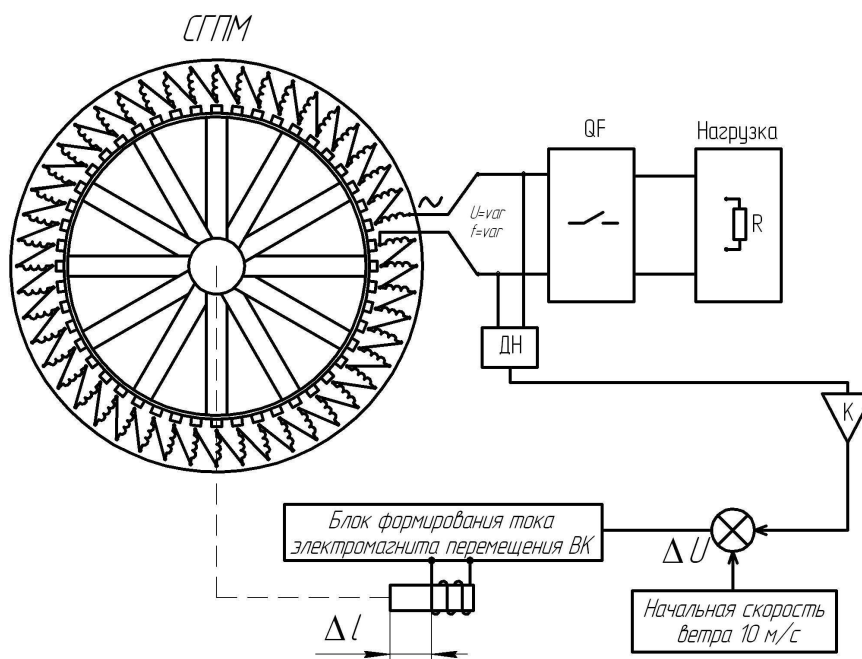


Рис. 1. Блок-схема модуля мультимодульной ветроэлектростанции для электроснабжения специальных кабельных систем антиобледенения: ДН – датчик напряжения, QF – автоматический выключатель, К – коэффициент усиления сигнала, ВК – ветроколесо.

Особенностью тихоходных синхронных генераторов магнитоэлектрического возбуждения, применяемых в ветроустановках, является малое отношение длины машины к ее диаметру $\lambda = l_i / D_i$, вызванное увеличенными размерами расточки статора из-за большого количества пар полюсов генератора. Для СГПМ мультимодульной ветроэлектростанции с магнитоэлектрическим возбуждением от постоянных магнитов важной задачей является определение площади или длины постоянного магнита ротора, находящегося под обмоткой статора.

Конфигурация магнитной системы магнитоэлектрических синхронных генераторов существенным образом влияет на их характеристики. При проектировании электрических машин с магнитоэлектрическим возбуждением нетрадиционного конструктивного исполнения появляется необходимость в расчете и анализе их магнитных полей. Однако использование для этих целей закона Ома для магнитной цепи неприемлемо, так как немагнитный зазор у таких машин сравнительно большой, а распределение магнитного поля в нем имеет крайне неоднородный характер. Поэтому единственно верный подход к электромагнитным расчетам в рассматриваемом случае это полевая постановка задач с учетом реальной геометрии магнитной системы машины, а также нелинейных свойств материалов магнитной системы [3].

Расчет магнитных полей в настоящее время эффективно вести с использованием современных программных комплексов, одним из которых является ELCUT, представляющий собой интегрированную диалоговую систему программ, позволяющую решать плоские и осесимметричные задачи методом конечных элементов [5].

Для расчета синхронного генератора на постоянных магнитах, входящего в состав электрогенерирующего комплекса МВЭС, с учетом реальной геометрии магнитной системы и нелинейности характеристик материалов магнитной цепи использовалась часть программного пакета, отвечающего за расчет магнитных полей, - магнитостатика.

Исследование магнитных полей ветрогенератора проводилось при различных сочетаниях немагнитных и ферромагнитных материалов статора и ротора. Сложность изготовления, высокая масса и стоимость сердечников роторов и статоров диаметром более 1 метра, содержащих распределенные по их поверхностям постоянные магниты и сосредоточенные обмотки, число которых колеблется от 30 до 80, вызывает необходимость включения в расчет магнитных полей генераторов, сердечники которых могут быть выполнены из немагнитных материалов. При немагнитном сердечнике статора момент сопротивления в режиме холостого хода будет близок к нулю при любом положении ротора.

Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре существенно зависит от конфигурации магнитной системы ротора и статора. Для статоров с беспазовой обмоткой наблюдается большая разница между максимальным и минимальным значениями магнитной индукции в воздушном зазоре независимо от формы постоянных магнитов (рис. 2).

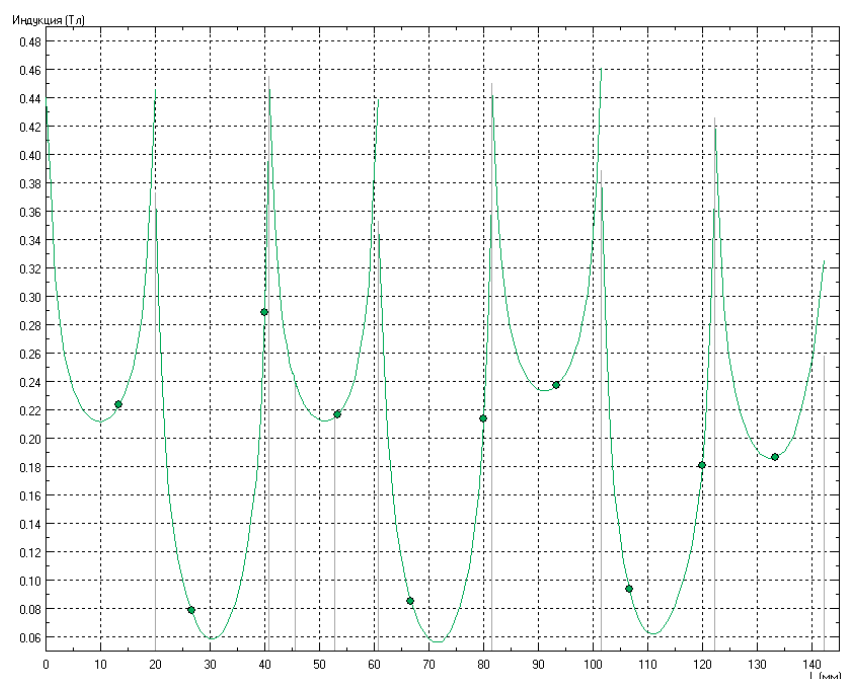


Рис. 2. Кривая индукции магнитного поля в воздушном зазоре для магнитной системы СГПМ с беспазовым статором и ротором с постоянными магнитами прямоугольного сечения

Синхронный генератор, статор которого выполнен с п-образными выступами и сосредоточенными обмотками на них, имеет трапецеидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Значения магнитной индукции в воздушном зазоре синхронного генератора на постоянных магнитах для магнитных систем различной конфигурации представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчета магнитного поля синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов с помощью программного комплекса ELCUT

Конфигурация магнитной системы	B_{max} , Тл	B_{min} , Тл
1 Статор с п-образными полюсами, ротор с постоянными магнитами прямоугольного сечения		
1.1 Материал сердечника ротора – сталь Ст3, материал сердечника статора – сталь 2211	0,49	-
1.2 Материал сердечника ротора – сталь Ст3, материал сердечника статора – сталь 2211, между магнитами ротора вставки – сталь Ст3	0,48	-
1.3 Материал сердечника ротора с п-образными выступами – сталь Ст3, материал сердечника статора – сталь 2211	0,49	-
2 Беспазовый статор, ротор с постоянными магнитами прямоугольного сечения		
2.1 Материал сердечника ротора – сталь Ст3, материал сердечника статора – сталь 2211	0,44	0,2
2.2 Материал сердечника ротора – сталь Ст3, материал сердечника статора – немагнитный (метка «Воздух»)	0,43	0,19
2.3 Материал сердечника ротора – немагнитный (метка «Воздух»), материал сердечника статора – сталь 2211	0,34	0,12

2.4 Материал сердечника ротора – немагнитный (метка «Воздух»), материал сердечника статора – немагнитный (метка «Воздух»)	0,31	0,12
3 Статор с п-образными полюсами, ротор с постоянными магнитами трапецевидного сечения		
3.1 Материал сердечника ротора – сталь Ст3, материал сердечника статора – сталь 2211	0,54	-
4 Беспазовый статор, ротор с постоянными магнитами трапецевидного сечения		
4.1 Материал сердечника ротора – сталь Ст3, материал сердечника статора – сталь 2211	0,48	0,24
4.2 Материал сердечника ротора – сталь Ст3, материал сердечника статора – немагнитный (метка «Воздух»)	0,46	0,22
4.3 Материал сердечника ротора – немагнитный (метка «Воздух»), материал сердечника статора – сталь 2211	0,36	0,14
4.3 Материал сердечника ротора – немагнитный (метка «Воздух»), материал сердечника статора – сталь 2211	0,36	0,13

Для достижения максимальной эффективности синхронного генератора на постоянных магнитах, выбора его геометрии в целом, включая высоту сердечника ротора и постоянных магнитов, угол скоса боковых граней у магнитов трапецевидной формы, необходимо провести расчет генератора с различным соотношением высоты активных материалов.

На первом этапе был произведен анализ изменения распределения магнитной индукции в воздушном зазоре B_0 синхронного генератора в зависимости от высоты стального сердечника ротора. Исследования проводились для варианта конфигурации магнитной системы с постоянными магнитами прямоугольной формы. Высота сердечника ротора изменялась от 1 до 8 мм. На рис. 3 представлена зависимость индукции в воздушном зазоре от высоты ротора. Можно заметить, что при изменении высоты сердечника ротора h_p от 1 до 3 мм индукция B_0 увеличивается на 37%. При дальнейшем увеличении h_p до 6 мм максимальное значение B_0 увеличивается на 5%, а при увеличении высоты до значений 7 мм и 8 мм значение индукции в воздушном зазоре не изменяется и составляет 0,577 Тл.

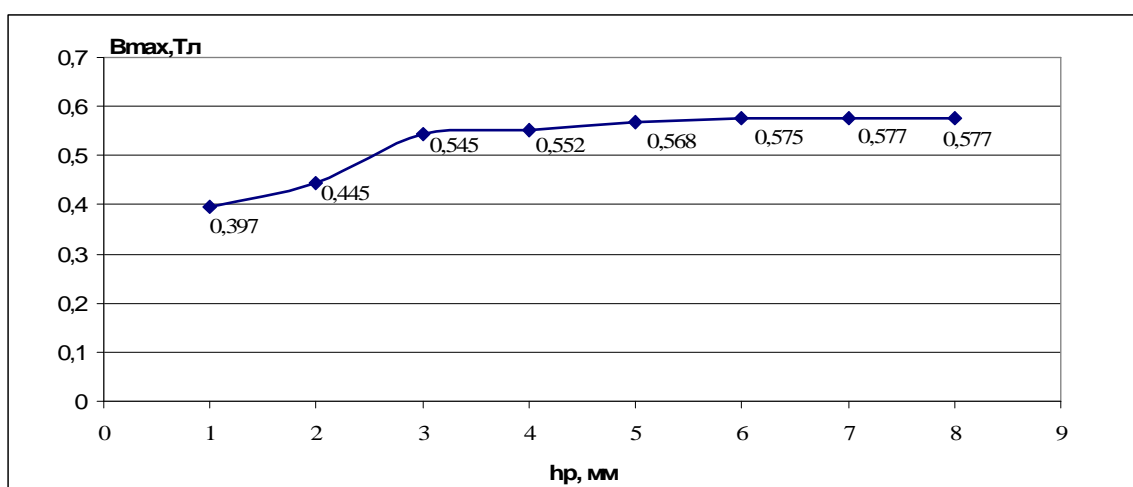


Рис. 3. Зависимость индукции в воздушном зазоре от высоты сердечника ротора

Далее был произведен расчет магнитных полей при изменяющейся толщине постоянных магнитов; сердечники ротора и статора генератора выполнены из конструкционной и электротехнической стали соответственно. На внутренней п-образной поверхности статора располагаются сосредоточенные обмотки якоря. На роторе расположены магниты прямоугольной формы. Изменение высоты магнита производилось при его неизменной ширине и длине. В результате анализа расчета магнитных полей можно заметить, что значение индукции в воздушном зазоре в значительной степени зависит от толщины постоянного магнита рис. 4. Увеличение магнитной индукции при увеличении высоты постоянных магнитов от 1,5 до 5,5 мм составляет 62%. При дальнейшем увеличении значения h_m индукция практически не изменяется.

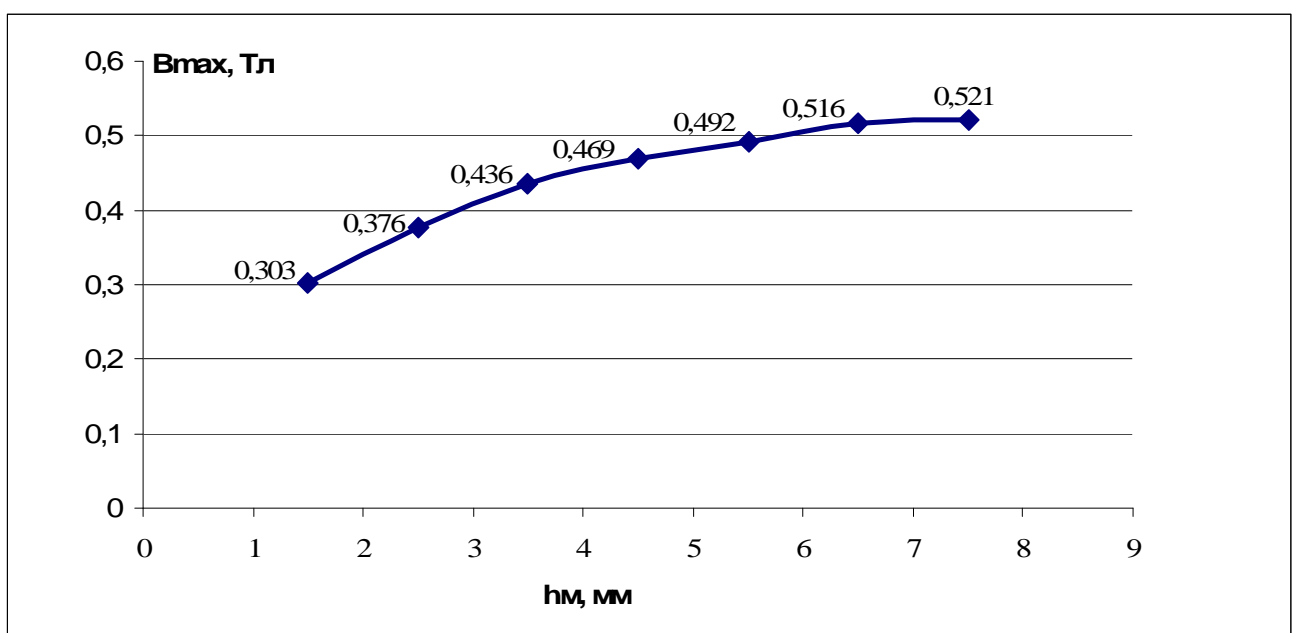


Рис. 4. Зависимость индукции в воздушном зазоре от высоты постоянного магнита

На третьем этапе был произведен анализ изменения распределения магнитной индукции в воздушном зазоре B_0 в зависимости от величины угла наклона боковых граней постоянных магнитов трапециевидной формы. Рассмотрены 3 вида магнитов трапециевидной формы, одинаковой высоты, ширины и длины основания, отличающиеся тем, что углы наклона боковых граней составляют 15, 30 и 45°.

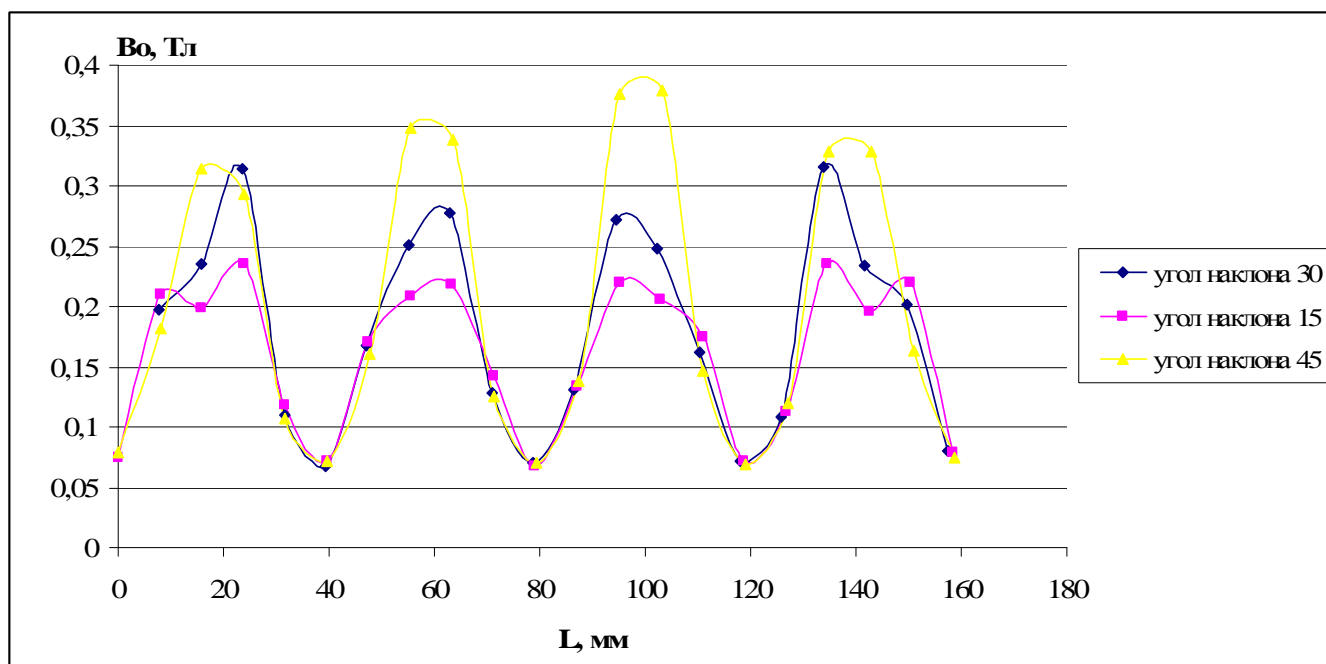


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре при изменении угла наклона боковых граней постоянных магнитов генератора с беспазовым статором из немагнитного материала

Как видно на рис. 5, увеличение угла наклона боковых граней постоянных магнитов трапецеидального сечения приводит к увеличению максимального значения магнитной индукции, при этом с увеличением угла форма кривой V_{\max} в воздушном зазоре становится близкой к синусоидальной. Так как сердечник статора выполнен из немагнитного материала, индукция в воздушном зазоре значительно уменьшается и составляет 50% от индукции, создаваемой такими же постоянными магнитами, но в магнитной системе со стальными сердечниками статора и ротора. Однако из кривых распределения магнитной индукции можно сделать вывод о применении магнитов с углами наклона боковых граней, равными 45° в случае немагнитного сердечника статора. Для усиления магнитного потока в воздушном зазоре в случае немагнитного статора необходимо увеличить геометрические размеры постоянных магнитов на роторе.

При изготовлении синхронного генератора на постоянных магнитах необходимо учитывать, что при числе обмоток, равном числу магнитов при нахождении сердечника обмотки напротив магнита за счет сил притяжения возникает большой момент сопротивления, для преодоления которого требуется значительное усилие. Поэтому в генераторе, обмотка ферромагнитного статора которого уложена в п-образные пазы, необходимо принять число витков на 1 больше или меньше количества постоянных магнитов. При немагнитном сердечнике статора момент сопротивления в режиме холостого хода будет близок к нулю при любом положении ротора.

Список литературы

1. Павленко И.М. Способ регулирования напряжения мультимодульной ВЭС / И.М. Павленко, С.Ф. Степанов // Новые технологии и технические средства в АПК : матер. Междунар. конф. / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2013. – С. 137-139.
2. Соломенкова О.Б. Математическая модель электротехнического комплекса модуля мультимодульной ветроэлектростанции // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2.
3. Суханов В.В. Расчет магнитных полей в электрических машинах нетрадиционной конструкции // elcut.ru: Новый подход к моделированию полей. - URL: <http://elcut.ru/articles/sukhanov/motors.htm> (дата обращения: 01. 01. 2013).
4. Хаскин Л. Башня из ветроэнергетических модулей // Наука и жизнь. – 2003. – № 9. – С. 28–33.
5. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/SOFT/OTHERS/elcut/Manual.pdf> (дата обращения: 10.06.2013).

Рецензенты:

Архангельский Ю.С., д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г. Саратов.

Томашевский Ю.Б., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г.Саратов.