



УДК 621.313.17

ГРЕБЕНИКОВ В. В., канд. техн. наук,
ГАМАЛЕЯ Р. Р., аспирант,
ПРЬЙМАК М. В., аспирант,
 Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев
ШЫМЧАК П. П., канд. техн. наук,
 Заходнопоморский технологический университет
 в Щецине, Польша



ГРЕБЕНИКОВ В. В.



ГАМАЛЕЯ Р. Р.



ПРЬЙМАК М. В.



ШЫМЧАК П. П.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТОВЫХ И НИОДИМОВЫХ МАГНИТОВ

Приведены результаты расчета и сравнительный анализ дисковых электрогенераторов для малой энергетики на основе ферритовых и ниодимовых постоянных магнитов. Также приводятся результаты расчета динамических характеристик электрогенератора.

Как известно, страны Евросоюза интенсивно внедряют автономные источники электроэнергии. С каждым годом доля электроэнергии, получаемой электростанциями из экологически чистой среды, в европейских странах возрастает. Использование таких источников энергии (ветра, воды, солнца, биоэнергии) дает ряд преимуществ:

- экологическая безопасность, отсутствие загрязнения окружающей среды отходами переработки нефти;
- экономичность, возможность получать электроэнергию по более низким ценам, не зависит от цен на нефть на мировом рынке [1–2].

Современные ветрогенераторы позволяют эффективно использовать энергию ветра. С их помощью сегодня можно решать задачи электроснабжения любых объектов. Однако ветряные генераторы находят свое применение и в быту — для обслуживания объектов небольшой мощности. В настоящее время подобные ветряные электростанции достаточно часто применяются для энергоснабжения загородных объектов, домов, дач, вагончиков, расположенных далеко от электросетей. При этом достаточно мощности $P = 4 \div 5$ кВт для электроснабжения большинства потребителей.

Другими словами, ветряной генератор отлично решает проблему энергоснабжения в автономных условиях. Учитывая, что он не оказывает отрицательного воздействия на окружающую среду и является экологически чистым, ветрогенератор

отлично вписывается в концепцию "экологичного жилья". Ветряной генератор бытового назначения не занимает много места и органично подходит к дизайну загородного дома. [3]. К минусам ветряных генераторов можно отнести шумность их работы. Однако, ветроустановки с вертикальной осью вращения и механизмом управления положением лопастями обладают малой шумностью и существенно большим КПД преобразования энергии ветра [5].

Следует также отметить, что автономные генерирующие установки могут использовать энергию потока рек. Для этих целей также можно использовать гидротурбины с вертикальной осью вращения (типа ротора Дарье) [6]. Частота вращения как ветроротора с вертикальной осью вращения так и гидроротора зависит от скорости ветра и соответственно течения воды и диаметра ротора Дарье и составляет для мощности $P = 4 \div 5$ кВт, как правило, около 100 об/мин.

Для ветро и гидроэнергетических установок малой мощности используются синхронные электрогенераторы, как правило, на основе редкоземельных постоянных магнитов (ПМ) [4, 7, 8]. Стоимость электрогенераторов, которые предлагаются сегодня на рынке, весьма значительна в основном из-за высокой стоимости редкоземельных (ПМ) на основе соединения NdFeB. Стоимость ПМ на основе ферритов ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) на два порядка меньше по сравнению с ниодимовыми ПМ. Поэтому целью данной работы является моделирование дисковых электрогенераторов мощностью $P = 4$ кВт и частотой вращения $n = 100$ об/мин с возбуждением ферритовыми и ниодимовыми (ПМ) и сравнение их массогабаритных и стоимостных показателей.

На Рис. 1 показан внешний вид магнитной системы электрогенератора дискового типа. На этом рисунке обозначено: внешний диаметр генератора — D_e , толщина генератора — H_g . Ротор рас-



смагнетируемого электрогенератора состоит из p_r пар ПМ (ниодимовых либо ферритовых) с чередующимся направлением намагниченности, толщина постоянных магнитов — h_{PM} , внешний радиус ротора — R_{se} , внутренний радиус ротора — R_{si} , средний радиус — R_{av} . Обмотка статора укладывается в два слоя — по обоим сторонам от ротора, что позволяет максимально использовать поле магнитов, толщина обмоток — h_{Cu} . Обмотка статора представляет собой набор катушек, соединенных в трехфазную систему звездой, и образует p_s пар полюсов на статоре. Катушки закреплены на стальных замыкателях из шихтованной стали и имеют форму шайбы.

Предложенная конструкция с одной стороны обладает хорошими массогабаритными показателями, с другой — является довольно простой в изготовлении, а дискообразная форма позволяет размещать ее в устройствах с ограниченным аксиальным пространством.

Остаточная индукция ПМ, изготовленных на основании сплава NdFeB в 3.5 раза выше ферритовых ПМ, однако их стоимость составляет порядка 200 \$/кг, тогда как стоимость ферритовых магнитов не превосходит 10 \$/кг, что даже меньше стоимости медной обмотки. В то же время удельный вес ниодимовых магнитов в 1.5 раза выше ферритовых. Приведенные соотношения означают, что две рассматриваемые конструкции электрогенератора будут иметь различные оптимальные габариты для обеспечения указанной мощности.

Итак, ставится задача разработать электрогенератор с двумя указанными способами возбуждения, имеющими максимальный тормозной момент, равный $M_{max} = 430$ Нм, что соответствует мощности на валу $P_{max} = 4,5$ кВт при скорости вращения ротора $n = 100$ об/мин, что с учетом тепловых потерь должно обеспечить выходную мощность порядка 4 кВт. Как уже было отмечено, целевым результатом является обеспечение минимальной массы, а также минимальной стоимости магнитной системы при заданном значении тормозного момента.

Поскольку поставленная задача требует расчета большого количества моделей электрогенераторов для нахождения их оптимальных размеров, то для этих целей применяется аналитический метод моделирования, основанный на использовании конечно-непрерывных функций для обеспечения выполнения граничных условий при решении уравнения магнитостатики [8]. Данный

метод позволяет находить распределение магнитной индукции не только в воздушном зазоре электрической машины, но и во всем ее объеме, включая области с ПМ, а также области медных обмоток. Далее, по заданному распределению магнитной индукции определяется тормозной момент электрогенератора и потокосцепление с витками обмоток.

Применительно к поставленной задаче использовалась собственная программа DTE Optimization, реализующая описанную методику для нахождения размеров дисковой электрической машины, имеющей заданный электромагнитный момент.

Программа DTE Optimization работает по следующему алгоритму: имеется допустимый диапазон изменения внешнего диаметра магнитной системы и высоты ПМ. Для каждого значения внешнего диаметра электрической машины методом градиентного спуска находится внутренний диаметр и число пар полюсов ротора и статора, обеспечивающие максимальный электромагнитный момент электрической машины. Для каждого значения внешнего диаметра выбирается технологически допустимый воздушный зазор. В данном случае использовалось соотношение: $\delta_0 = 0.004 \cdot D_e$, что обеспечивает приемлемые значения воздушного зазора для всех рассматриваемых диаметров магнитной системы.

Далее, для каждого значения толщины постоянных магнитов h_{PM} из указанного диапазона итерационным методом Ньютона находится значение высоты токового слоя (толщины обмоток) h_{Cu} , для которого обеспечивается заданный электромагнитный момент. При этом высота стального замыкателя выбирается из соображений его не насыщения и принимается равной $h_{ST} = 0.5 \cdot h_{Cu}$. Для придания механической прочности дискового генератора к замыкателям должны крепиться ребра жесткости.

В результате, для каждого наперед заданного значения внешнего диаметра и высоты ПМ, рассчитывается масса и стоимость магнитной системы, обеспечивающая заданный электромагнитный момент. Данный алгоритм расчета применялся для электрогенераторов с возбуждением, как от ферритовых так и от ниодимовых ПМ.

Допустимые значения внешнего диаметра находились в диапазоне $D_e = 600 \div 1200$ мм, а допустимая высота ПМ в диапазоне $h_{PM} = 3 \div 35$ мм. Значения удельного веса и стоимости материалов, согласно которым определялась масса и стоимость магнитной системы, приведены в Табл. 1.

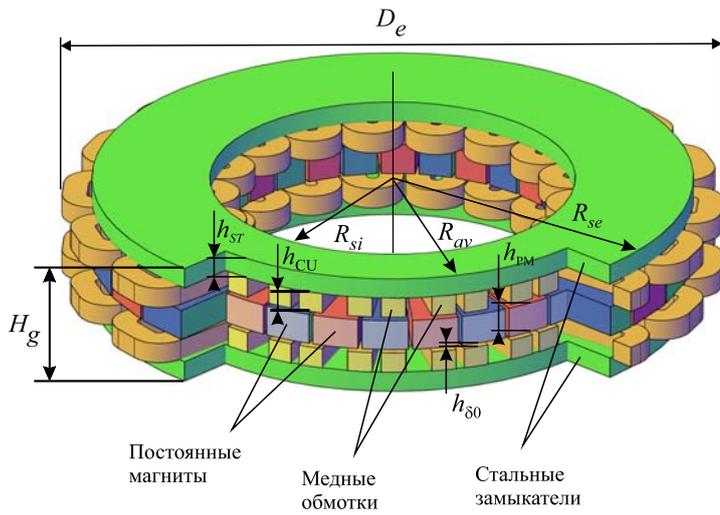


Рис. 1. Внешний вид магнитной системы дискового электрогенератора с ПМ.

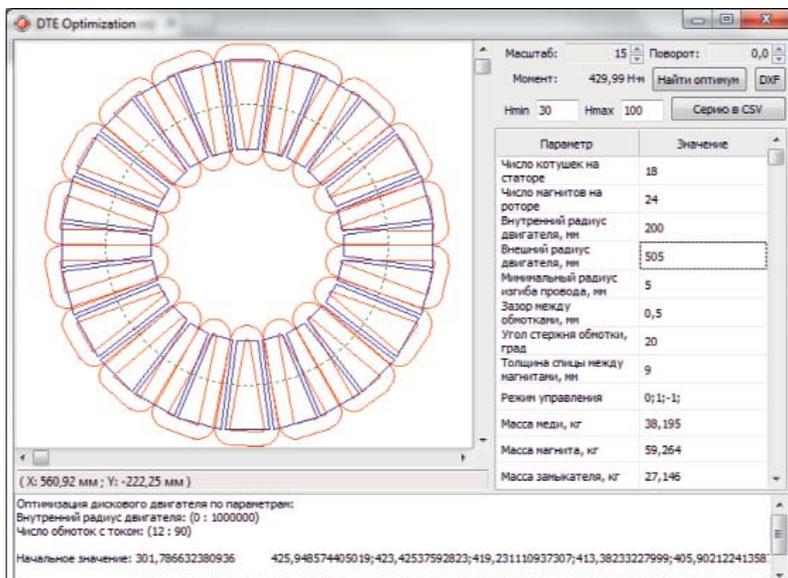


Рис. 2. Основное окно программы DTE Optimization.

На Рис. 3 приведены зависимости массы и стоимости магнитной системы дискового генератора с возбуждением ферритовыми ПМ от высоты магнитов для двух значений внешнего диаметра.

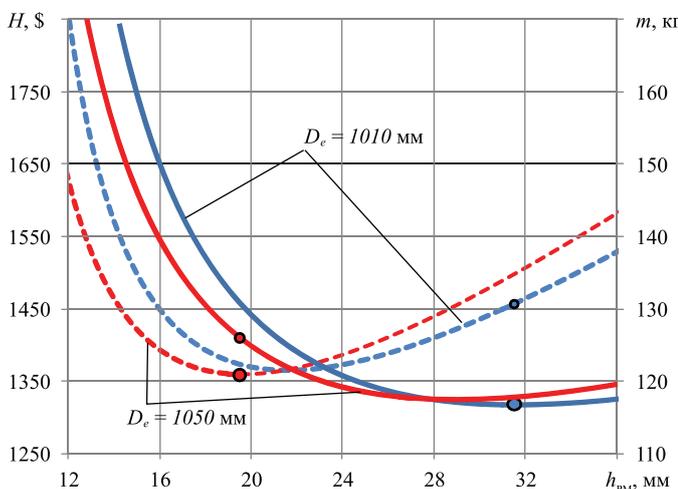


Рис. 3. Графики зависимостей массы и стоимости магнитной системы дискового генератора с возбуждением ферритовыми ПМ от высоты магнитов для двух значений внешнего диаметра.

ты магнитов для двух значений внешнего диаметра магнитной системы. Одно значение внешнего диаметра соответствует минимуму массы магнитной системы (кривые выделены красным цветом), а второе – минимуму стоимости (кривые выделены синим цветом). Пунктиром обозначены кривые зависимости массы от высоты магнита, а сплошной линией – стоимости. Следует отметить, что минимальная стоимость магнитной системы дискового генератора с возбуждением ферритовыми ПМ, полученная в результате работы указанного алгоритма равна $C_{\Sigma} = \$ 1317.46$ при высоте магнитов $h_{PM} = 31.5$ мм. Минимальная масса магнитной системы равна $m = 121$ кг при высоте магнитов $h_{PM} = 19.5$ мм. При этом масса магнитной системы для оптимума по стоимости составила $m = 131$ кг, а стоимость магнитной системы для оптимума по массе составила $C_{\Sigma} = \$ 1459.24$.

Аналогичные зависимости, но для дискового генератора с возбуждением от неодимовых ПМ приведены на Рис. 4. В результате, минимальная стоимость магнитной системы дискового генератора с возбуждением неодимовыми ПМ, полученная в результате работы указанного алгоритма равна $C_{\Sigma} = \$ 3658,50$ при высоте магнитов $h_{PM} = 4$ мм. Минимальная масса магнитной системы равна $m = 56$ кг при высоте магнитов $h_{PM} = 11.6$ мм. При этом масса магнитной системы для оптимума по стоимости составила $m = 88$ кг, а стоимость магнитной системы для оптимума по массе составила $C_{\Sigma} = \$ 5400,85$.

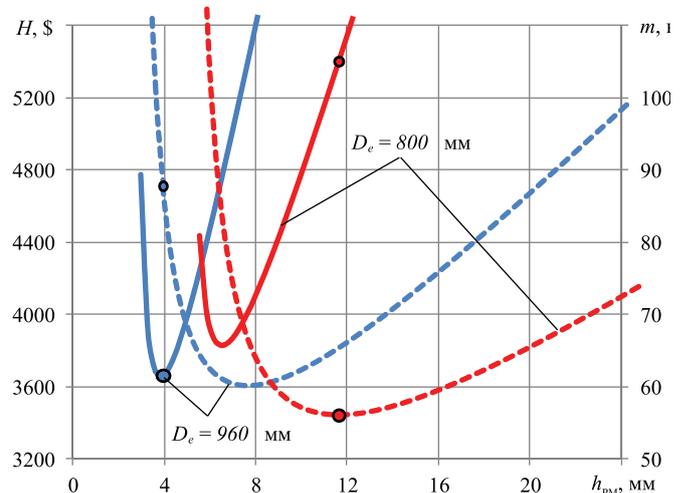


Рис. 4. Графики зависимостей массы и стоимости магнитной системы дискового генератора с возбуждением неодимовыми ПМ от высоты магнитов для двух значений внешнего диаметра.



Поскольку для тихоходного генератора основным критерием является стоимость, а масса не является критическим параметром, то для дальнейших исследований были выбраны модели, геометрия которых соответствуют минимальной стоимости магнитной системы, как для генератора с возбуждением от ферритовых ПМ так и для генератора с возбуждением от неодимовых ПМ.

Таблица 1. Удельный вес и стоимость элементов магнитной системы

	Шихтованная сталь	Медная обмотка	Ферритовые ПМ	Неодимовые ПМ
Удельный вес, кг/м ³	7800	8930	4800	7500
Стоимость, \$	10,00	25,00	10,00	200,00

Основные характеристики оптимальных конструкций электрогенератора приведены в Табл. 2.

На величину момента электрогенератора существенным образом влияет не только соотноше-

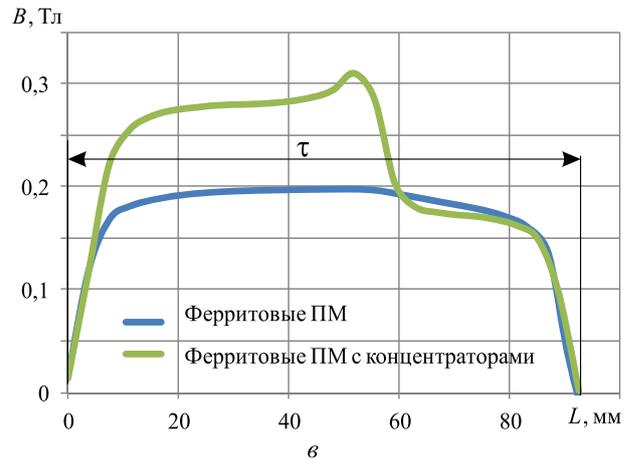
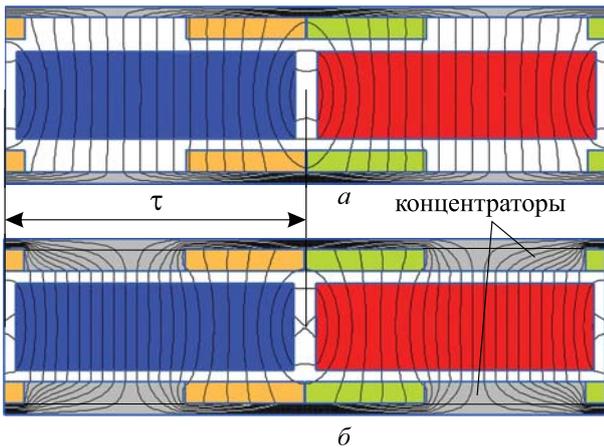


Рис. 5. Картина магнитного поля в пределах двух полюсных делений (а, б) и график индукции посередине рабочего зазора для генератора с ферритовыми магнитами в пределах одного полюсного деления (в).

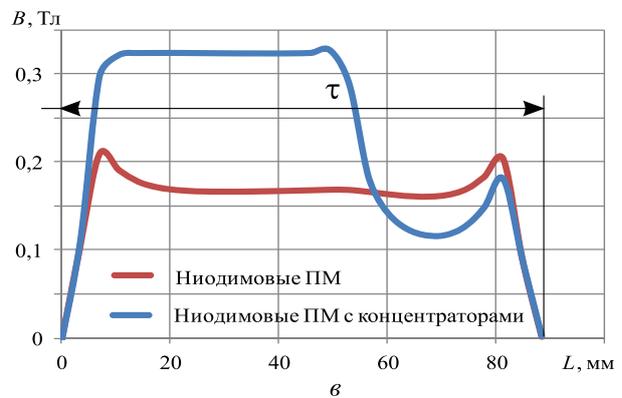
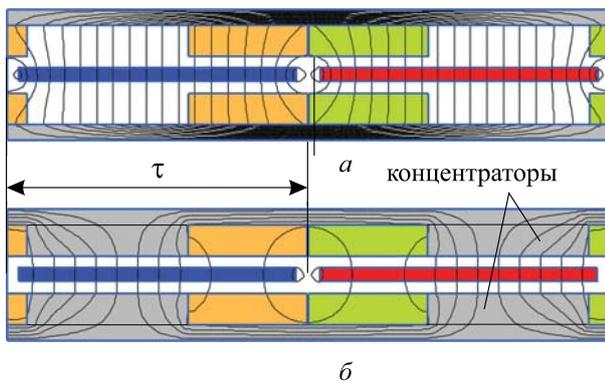


Рис. 6. Картина магнитного поля в пределах двух полюсных делений (а) и график индукции посередине рабочего зазора для генератора с неодимовыми магнитами в пределах одного полюсного деления (б).

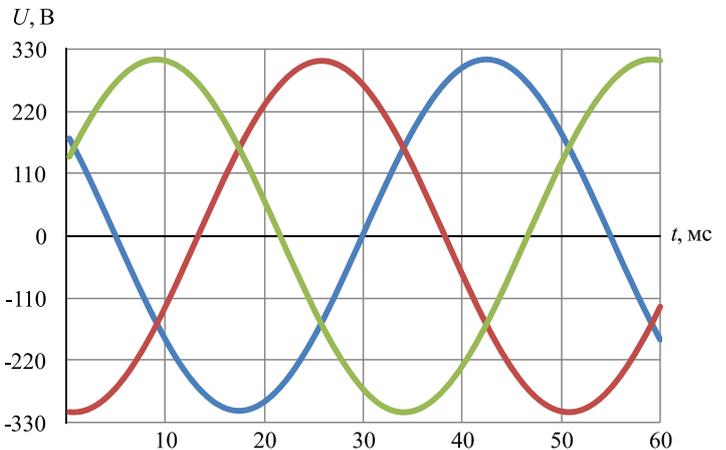
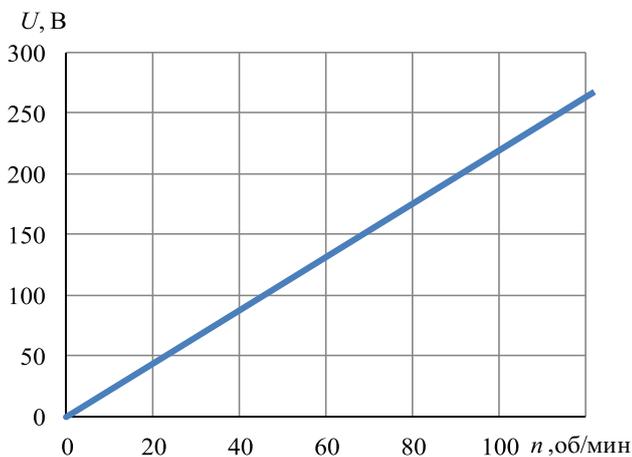


Рис. 7. Характеристика холостого хода исследуемых генераторов (а) и график зависимости напряжения в фазах от времени при частоте вращения $n = 100$ об/мин (б)



Таблица 2. Основные характеристики оптимальных конструкций электрогенератора

	Ферритовые ПМ	Ниодимовые ПМ
Максимальный тормозной момент (M_{max}), Нм	430	430
Максимальная мощность на валу (P_{max}), Вт (при $n=100$ об/мин)	4503	4503
Высота магнитной системы генератора (H_G), мм	55.0	38.8
Внешний диаметр магнитной системы генератора (D_e), мм	1010	960
Масса постоянных магнитов (m_{PM}), кг	69.9	12.4
Масса медной обмотки (m_{Cu}), кг	36.1	42.3
Масса стали (m_S), кг	24.6	32.9
Общая масса (m_{Σ}), кг	129.6	87.6
Общая стоимость (C_{Σ}), \$	1317.46	3658.50

ние размеров магнитной системы и свойства магнитов, но и наличие ферромагнитных концентраторов, размещаемых внутри катушек. На Рис. 5 приведены две картины магнитного поля в сечении по средней линии электрогенератора (по радиусу R_{av}) для оптимальных по стоимости геометрических размеров моделей и две зависимости магнитной индукции посередине воздушного зазора на одном полюсном делении τ .

На Рис. 5, а представлены картины магнитного поля в сечении по средней линии модели с ферритовыми постоянными магнитами и без концентраторов внутри катушек, а на Рис. 5, б – с ферромагнитными вставками (концентраторами) внутри катушек. Из Рис. 5, в хорошо видно, что наличие ферромагнитных концентраторов внутри катушек приводит к повышению величины магнитной индукции в воздушном зазоре электрогенератора, а, следовательно, его момента и мощности.

На Рис. 6, а и б показаны картины магнитного поля в сечении оптимальных по стоимости моделей с ниодимовыми ПМ. Рис. 6, а соответствует картина магнитного поля без концентраторов внутри катушек, а Рис. 6, б – соответственно с концентраторами. На Рис. 6, в представлены зависимости магнитной индукции посередине воздушного зазора электрогенератора на одном полюсном делении. Как и для предыдущего случая, наличие ферромагнитных концентраторов повышает значение магнитной индукции.

Как показали расчеты, применение ферромагнитных концентраторов повышает момент, а значит и мощность электрогенератора примерно на 75 % как для ферритовых, так и для ниодимовых ПМ. Однако наличие ферромагнитных концентраторов приводит к увеличению "клеящего" момента электрогенератора, что негативно сказывается на скорости трогания ветрогенератора, т.е. ветроротор начинает вращаться при большей скорости ветра. Таким образом, необходимо искать компромисс между снижением стоимости активных материалов электрогенератора и скоростью трогания ветроротора. При высокой стоимости ниодимовых ПМ есть смысл искать компромисс

между уменьшением массы использованных редкоземельных ПМ и повышением скорости трогания ветроротора, однако, для модели электрогенератора с ферритовыми ПМ нет острой необходимости снижать вес ПМ из-за их низкой стоимости. Для более корректного сравнения моделей электрогенераторов необходимо проводить расчеты динамических процессов с учетом КПД, поскольку величина активного сопротивления обмоток электрогенератора имеет существенное влияние на его эффективность.

Для каждой из исследуемых моделей были проведены расчеты режимов холостого хода и работы генератора на трехфазную активную нагрузку. Расчеты переходных процессов в генераторном режиме на основе уравнений Кирхгофа производились методом Рунге–Кутты 4 порядка точности, а напряжение на обмотках генератора на каждом шаге рассчитывалось аналитическим методом [8]. Число витков в обмотке генераторов подбиралось таким образом, чтобы обеспечить выходное фазное напряжение 220 В при частоте вращения 100 об/мин (Рис. 7). Трехфазная нагрузка подбиралась таким образом, чтобы мощность на валу генератора составляла 4.5 кВт. При этом рассчитанная полезная мощность составила порядка $P = 3.7$ кВт, то есть КПД исследуемых тихоходных генераторов составил порядка 80 %. При этом плотность тока в обмотках не превысила $J = 5$ А/мм².

Таким образом, приведены расчеты и выполнен сравнительный анализ дисковых электрогенераторов на основе ферритовых и ниодимовых ПМ и показано, что по стоимости магнитной системы оптимальным для малой энергетики является электрогенератор с ферритовыми ПМ.

Выводы.

1. В работе приведены результаты поиска оптимальных геометрических размеров магнитной системы электрогенератора при использовании двух типов магнитов: ферритовых и ниодимовых. Определены размеры, которые соответствуют минимальной стоимости магнитной системы, как



для генератора с возбуждением от ферритовых ПМ так и для генератора с возбуждением от ниодимовых ПМ.

2. Показан способ увеличения мощности электрогенератора путем вставки между обмотками ферромагнитных концентраторов. Такие концентраторы повышают значение магнитной индукции в воздушном зазоре, а значит электромагнитный момент и мощность электрогенератора, однако увеличивается и значение зубцового (клеющего) момента. "Клеющий" момент ухудшает пусковые характеристики электрогенератора, т. е. ветроротор начинает вращаться при большей скорости ветра.

3. Произведен расчет характеристики холостого хода электрогенератора с ПМ, а также расчет режима работы под нагрузкой, соответствующей мощности на валу $P = 4.5$ кВт. Также приведена зависимость фазного напряжения от времени при равномерном вращении ротора со скоростью $n = 100$ об/мин.

4. Определено значение КПД для режима работы под максимальной нагрузкой, оно составляет более 80 % как для генератора с ферритовыми, так и для генератора с ниодимовыми ПМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзензерский В. А., Тарасов С. В., Костюков И. Ю. Ветроустановки малой мощности. — Киев: Наук. думка, 2011. — 590 с.
2. <http://www.energostar.com.ua/article/24/>
3. <http://analytic.ub.ua>
4. Гребеников В.В. Электрогенераторы с постоянными магнитами для ветроустановок и микро-ГЭС. // Гідроенергетика України. — 2011. — № 1. — С. 43–48.
5. Каян В.П., Довгий С.О., Кочин В.А., Лебедь А.Г. Исследование влияния активного управления прямыми лопастями на рабочие характеристики ветроротора Дарье. // Прикладна гідромеханіка. — 2010. — т. 12. — № 3. — С. 12–23.
6. Каян В.П., Лебедь А.Г. Оптимизация работы модели водной турбины типа ротора Дарье с активным управлением лопастями. // Відновлювальна енергетика. — 2011. — № 4. — С. 46–54.
7. Szymczak P. Innovative designs of permanent magnet synchronous machines// Elektrizestvo. — 2009. — п. 9; — S. 37–44.
8. Гребеников В.В., Гамалея Р.Р. Моделирование магнитостатического поля и переходных процессов электрогенератора дискового типа с постоянными магнитами. // Праці ІЕД НАНУ: Зб. наук. пр., 2012. — Вип. 33. — С. 30–38.

© Гребеников В. В., Гамалея Р. Р., Прыймак М. В., Шымчак П. П., 2012

