

УДК 621.313.17

В. В. ГРЕБЕНИКОВ, М. В. ПРЬЙМАК

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ПАЗОВ СТАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В статье приведены результаты численного исследования влияния высоты пазов статора на характеристики электрических машин с постоянными магнитами. Показано, что при неизменных размерах ротора путем увеличения высоты пазов статора можно существенно повысить значение электромагнитного момента и мощности в генераторном режиме. Найден оптимум высоты пазов статора, при котором удельный показатель по моменту на единицу активной массы будет максимальным.

Ключевые слова: постоянные магниты, высота паза статора, электромагнитный момент, генераторный режим.

Введение. Электрические машины с постоянными магнитами (ПМ) находят широкое применение в различных областях техники, например, в электромобилях, электрогенераторах для ветроустановок малой и средней мощности. Связано это с тем, что современные ПМ на основе соединения неодим-железо-бор имеют температурную стабильность при нагреве до 160 -200°C и весьма высокие энергетические характеристики, что позволяет получить больший удельный момент по сравнению с электрическими машинами традиционной конструкции. С целью удешевления производства электрических машин с постоянными магнитами можно использовать зубцово-пазовый статор асинхронного двигателя, в котором короткозамкнутый ротор заменяется на ротор с ПМ тангенциальной либо радиальной намагниченности [1-3]. Однако МДС постоянных магнитов существенно превышает МДС обмоток статора, поэтому можно предположить, что пазовое рассеяние будет проявляться в меньшей степени, чем у традиционных электрических машин и высота пазов статора может быть увеличена в несколько раз до определенного значения. Критерием при этом может быть, например, удельный показатель

по среднему электромагнитному моменту на единицу активной массы.

Анализ основных достижений. В научной литературе, посвященной разработке машин с ПМ, исследовано влияние конфигурации магнитной системы на характеристики электрических машин. Наибольшее число публикаций посвящено влиянию конфигурации ротора с ПМ на электромагнитный момент электрической машины [4-5]. Однако исследованию влияния высоты пазов статора на характеристики электрической машины не уделено достаточно внимания. Современные программные пакеты позволяют с достаточной степенью достоверности моделировать и рассчитывать характеристики электрической машин с ПМ любой сколь угодно сложной конфигурации магнитной системы. В данной работе на основе лицензионного программного пакета INFOLYTICA выполнено исследование влияния высоты пазов статора на величину электромагнитного момента и на характеристики электрической машины в генераторном режиме, а также произведена оценка пазового рассеяния в зависимости от высоты паза.

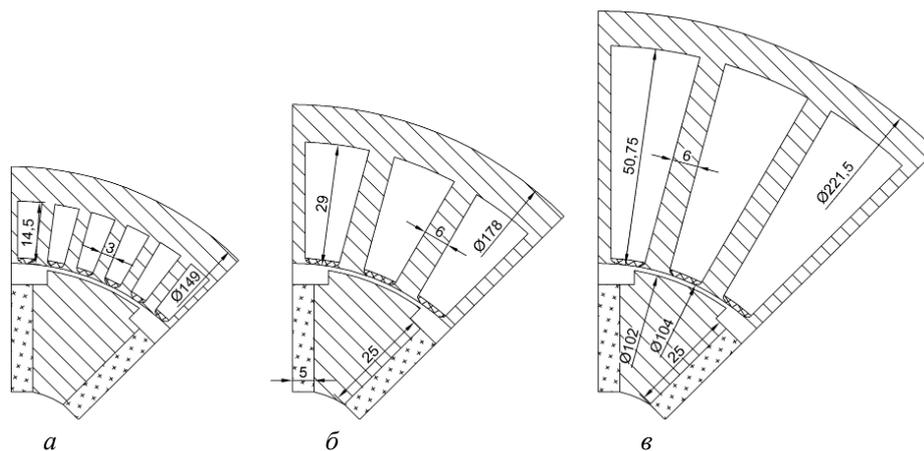


Рис. 1 – Эскизы магнитной системы электрической машины с различной высотой паза:
 а – базовая модель статора; б – высота паза статора в 2 раза больше, чем в базовой модели статора;
 в – высота паза статора в 3,5 раза больше, чем в базовой модели статора.

Цель исследований. Исследование влияния высоты пазов статора на характеристики электрической машины с ПМ и определение оптимальной высоты пазов, при которой достигается максимальное значение

удельного показателя по моменту на единицу массы, а также расчет и сравнение характеристик в генераторном режиме для базового варианта на основе статора асинхронного электродвигателя АИР90L8 и

© В. В. Гребеников, М. В. Прыймак, 2015

статора с оптимальным значение высоты пазов статора.

Материал исследований. Для достижения поставленной цели в работе исследовано несколько моделей электрических машин с ПМ. В базовой модели статор по размерам идентичен со статором асинхронного двигателя АИР90L8 (рис. 1 а), с внешним диаметром – $D_a = 149$ мм, внутренним диаметром статора – $D_i = 104$ мм, числом пазов $Z = 48$ и высотой пазов $h = 14,5$ мм, длиной активной части сердечника – $l_{Fe} = 100$ мм. Величина воздушного зазора между статором и ротором равна $\delta = 1$ мм. Во всех исследуемых моделях ротор имеет неизменную конфигурацию и размеры, количество ПМ в роторе – 8, размеры магнитов – $10 \times 25 \times 100$ мм, масса одного магнита – $m = 187,5$ гр., масса восьми магнитов – $m_{ПМ} = 1,5$ кг.

В данных исследованиях использована конфигурация магнитной системы ротора (рис. 2), в которой ПМ имеют тангенциальную намагниченность и между магнитами 1 располагаются ферромагнитные полюса (концентраторы) 2. Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента в роторе выполнен скос полюсов. Скос полюсов выполняется на величину зубцового деления t_z статора [3].

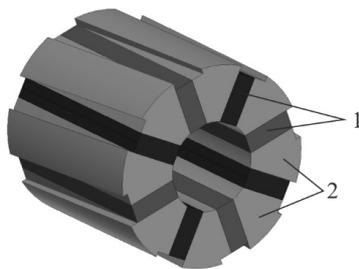


Рис. 2 – Фрагмент ротора

При исследовании влияния конфигурации магнитной системы на величину электромагнитного момента варьировалась высота пазов статора h . В модели, приведенной на рис. 1 б высота паза статора вдвое больше, чем в базовой и составляет $h = 29$ мм, в модели на рис. 1 в, $h = 50,75$ мм, т.е. в 3,5 раза больше, чем в базовой. В моделях с увеличенной высотой пазов количество пазов уменьшено вдвое для обеспечения механической прочности статора и равно $Z = 24$, толщина зубцов при этом вдвое больше, чем у базовой и равна $b_{ds} = 6$ мм. Как показали предыдущие исследования, при моделировании электрических машин со скосом полюсов можно выполнять расчеты в двухмерной постановке по нескольким сечениям, поскольку в трехмерной постановке требуются существенные затраты времени на подготовку исходной модели и затраты машинного времени непосредственно на расчеты, при этом значение электромагнитного момента в трехмерной модели меньше в среднем на 10%, чем в двухмерной [3].

Во всех расчетах остаточная индукция ПМ принята равной $B_r = 1,0$ Тл, магнитопровод статора – сталь СТ2211 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); магнитопровод ротора – конструк-

ционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); вал ротора выполнен из немагнитного материала с магнитной проницаемостью – $\mu_0 = 1$; плотность тока в обмотках при моделировании магнитостатики задана равной $J = 5,0$ А/мм², а коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_3 = 0,5$.

Результаты исследований. На рис. 3 для трех моделей показано распределение магнитного поля в сечении на расстоянии $1/2 \cdot l_{Fe}$ от переднего края активной части электрической машины при ориентации ротора по оси d . В этом положении ротора относительно статора поле, создаваемое ПМ направлено согласно с полем, создаваемым включенными фазами статора, фазы включены следующим образом А(+), В(-), С(0). По результатам моделирования распределения магнитного поля для трех моделей можно отметить следующее: спинка статора для всех трех моделей не насыщается, так как величина воздушного зазора равна $\delta_0 = 1$ мм, существенных потоков рассеивания не наблюдается.

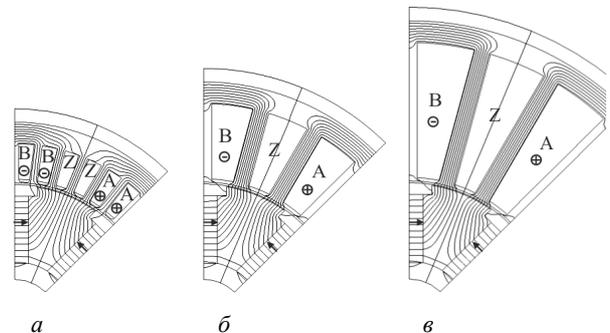


Рис. 3 – Картина магнитного потока в сечении магнитопроводов с различной высотой паза:

а – $h = 14,5$ мм; б – $h = 29$ мм; в – $h = 50,75$ мм.

Для определения пазового рассеяния были проведены дополнительные исследования. На рис. 4 приведены значения потока, проходящего через $1/8$ статора, для двух моделей с высотой паза $h = 14,5$ мм и $h = 50,75$ мм. Для каждой из моделей значение потока рассчитывалось в пяти точках по высоте паза. На рис. 4 на оси абсцисс приведено значение высоты паза в относительных единицах, при этом начало оси (значение 0) соответствует сечению для потока у основания паза, а значение 1 соответствует сечению для полной высоты паза.

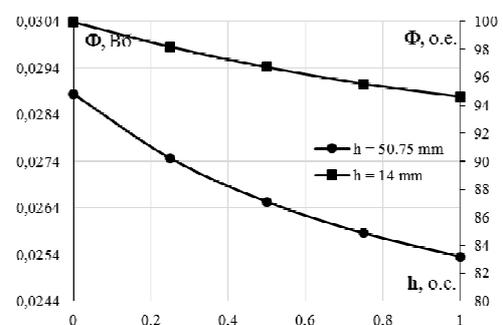


Рис. 4 – Распределение потока по высоте паза

Анализируя результаты, приведенные на рис. 4, следует отметить, что для статора с высотой пазов,

равной $h = 14,5$ мм наблюдается незначительное пазовое рассеяние по его высоте, примерно 5% (на рис. 4 справа приведено значение потока в относительных единицах). Однако и для высоты паза, равной $h = 50,75$ мм величина пазового рассеяния не является значительной и составляет примерно 15%.

Для определения влияния количества пазов статора на величину момента были проведены расчеты зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора. Для всех моделей расчеты проводились в двухмерной постановке следующим образом. Для каждой из исследуемых электрических машин рассчитывались три двухмерных модели со скосом полюсов на роторе: в сечении на расстоянии $1/6 \cdot I_{Fe}$ от переднего края активной части магнитной системы; на расстоянии $1/2 \cdot I_{Fe}$; на расстоянии $5/6 \cdot I_{Fe}$ от переднего края активной части. Аксиальная длина каждой модели равна $1/3$ аксиальной длины расчетной модели. Суммарный электромагнитный момент определяется как сумма моментов трех моделей [3].

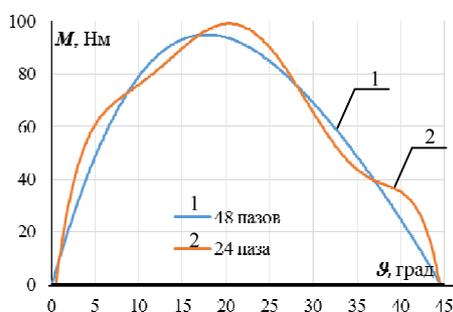


Рис. 5 – Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для высоты паза статора $h = 50,75$ мм

На рис. 5 приведены зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора для моделей с числом пазов равным $Z = 24$ и $Z = 48$ при высоте паза $h = 50,75$ мм. Суммарная площадь поперечного сечения пазов для этих двух моделей одинакова. Электромагнитный момент для 8-ми полюсных электрических машин имеет период 45° и соответственно два нулевых значения: в положении устойчивого магнитного равновесия – ось d (это положение принято за начальное – $\theta = 0^\circ$), второе нулевое значение момента находится в положении неустойчивого магнитного равновесия – ось q ($\theta = 45^\circ$ геометрических градусов).

Сравнивая график момента для моделей с числом пазов $Z = 48$ и $Z = 24$, следует отметить, что расхождения в значении электромагнитного момента не существенны. Значения среднего электромагнитного момента для зоны коммутации отличаются менее, чем на 1%. Поэтому для электрической машины с ПМ и числом полюсов на роторе равном $p_r = 8$ следует рекомендовать зубцово-пазовую конфигурацию статора с числом пазов равном $Z = 24$, что позволяет увеличить ширину зубца и тем самым механическую прочность ротора.

В программном комплексе INFOLYTICA были проведены расчеты для моделей с различной высотой паза, при этом базовая модель имеет число пазов, равное $Z = 48$, все остальные модели имеют число пазов

равное $Z = 24$. На рис. 6 приведены зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора для нескольких значений высоты паза статора.

Результаты численных исследований иллюстрируют, что изменение высоты паза статора при неизменной конфигурации ротора существенно влияют на значение электромагнитного момента. При анализе моментных характеристик определялись значения среднего M_{cp} электромагнитного момента. Эти значения определялись для зоны коммутации, которая для 8-ми полюсного ротора равна 15° геометрических градусов (от 15° до 30° на рис. 6). Для исследуемых электрических машин получены следующие значения среднего электромагнитного момента: $M_{cp(14,5)} = 20,5$ Н·м, $M_{cp(29)} = 47$ Н·м, $M_{cp(43,5)} = 77$ Н·м, $M_{cp(50,75)} = 88$ Н·м, $M_{cp(58)} = 97$ Н·м.

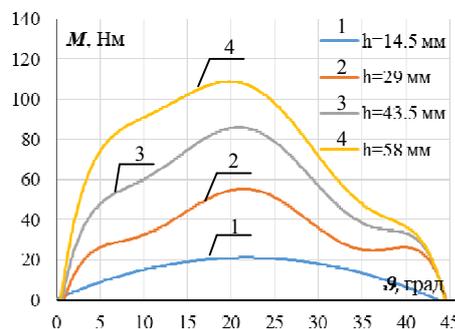


Рис. 6 – Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для различной высоты паза статора

Таким образом, при увеличении высоты паза пропорционально возрастает значение электромагнитного момента. Чтобы оценить электрические машины с различной высотой паза был использован удельный показатель по среднему электромагнитному моменту на единицу активной массы $M_{em} = M_{cp}/m$. Активная масса статора определялась с учетом массы лобовых частей обмоток. На рис. 7 приведена зависимость среднего электромагнитного момента на единицу активной массы от высоты паза исследуемых электрических машин.

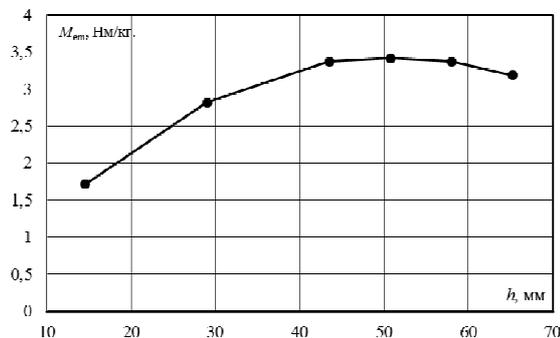


Рис. 7 – Зависимость среднего электромагнитного момента на единицу активной массы от высоты паза.

Анализируя график, приведенный на рис. 7, следует отметить, что при низменной конфигурации и размерах ротора высота паза статора может быть существенно увеличена по сравнению с базовой моделью электрической машины, выполненной на основе

железа статора асинхронного двигателя АИР90L8. Определено существование оптимума, при котором достигается максимум удельного электромагнитного момента на единицу активной массы. Этот оптимум достигается при высоте пазов равной $h = 50,75$ мм, т.е. в 3,5 раза больше, чем у базового варианта.

Следует подчеркнуть, что значение среднего электромагнитного момента для оптимального варианта больше в 4.3 раза по сравнению с базовым вариантом, при этом площадь поперечного сечения пазов для оптимального варианта больше по сравнению с базовым в 5,6 раза.

В работе также проведены исследования электрической машины в режиме генератора. В настоящее время для утилизации ветровой энергии используются ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения ветрогенератора. При этом, если в ветроустановке с вертикальной осью вращения применить механизм управления положением лопастями, то можно получить существенно больший КПД преобразования энергии ветра. Результаты испытаний такого ветрогенератора показали, что в диапазоне скорости ветра (6-12 м/сек), частота вращения ротора составляет 120÷300 об/мин, а генерируемая при этом мощность – $P = 300 \div 1000$ Вт [6]. Для ветрогенератора с вертикальной осью вращения и управляемыми лопастями был разработан и изготовлен электрогенератор, в котором был использован статор асинхронного двигателя АИР90L8, а ротор выполнен со скосом полюсов для уменьшения пульсаций электромагнитного момента (рис. 2). В роторе установлены восемь магнитов, размеры которых следующие: $10 \times 25 \times 100$ мм, т.е. это базовая модель по рис. 1а.

Моделирование динамических характеристик при работе электрогенератора на активную нагрузку произведено с помощью пакета INFOLYTICA. На рис. 8 приведены зависимости мощности электрогенератора, полученные экспериментальным и численным путем при работе генератора на активную нагрузку, равную $R_{н} = 57$ Ом. Обмотки генератора соединены в «звезду». Выводы обмоток подключены к трехфазному выпрямителю (схема Ларионова).

Следует отметить, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 10% как для результатов, приведенных на рис. 8, так и для других значений активной нагрузки, которая варьировалась в диапазоне $R_{н} = 7 \div 100$ Ом.

Моделирование характеристик при работе электрогенератора на активную нагрузку выполнено и для модели с высотой пазов $h = 50,75$ мм. Следует отметить, что в базовой модели число витков в пазах равно $W = 58$, такое же число витков задавалось и в модели с высотой пазов $h = 50,75$ мм.

В расчетах и эксперименте при неизменной нагрузке изменялась частота вращения ротора. Чтобы корректно сравнивать результаты моделирования с различной высотой пазов на рис. 9 приведены зависимости мощности в нагрузке от плотности тока в фазах.

Для базовой модели с высотой паза $h = 14,5$ мм наблюдается хорошее совпадение между расчетными и экспериментальными значениями. Для электрогене-

ратора с оптимальной высотой пазов, равной $h = 50,75$ мм, генерируемая мощность примерно в 4 раза больше по сравнению с базовой моделью, высота пазов у которой равна $h = 14,5$ мм.

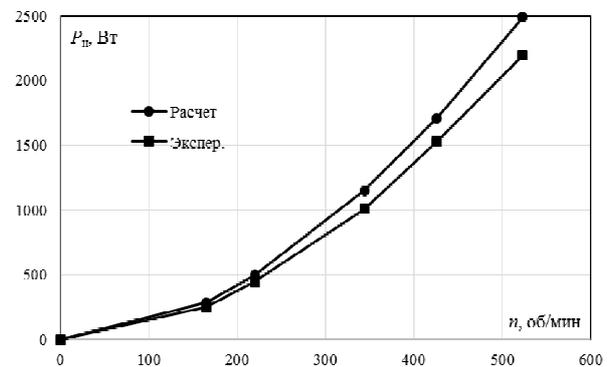


Рис. 8 – Зависимость мощности в нагрузке от частоты вращения

Таким образом разработанные компьютерные модели электрических машин с ПМ и зубчопазовым статором позволяют определять оптимальную геометрию магнитной системы, при которой достигается максимум удельного электромагнитного момента на единицу активной массы и рассчитать характеристики при работе электрогенератора на активную нагрузку.

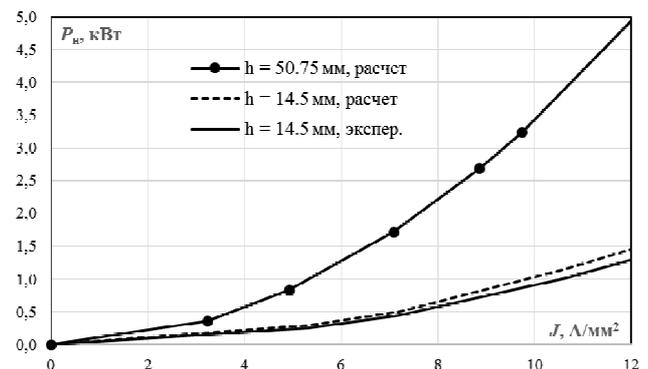


Рис. 9 – Зависимость генерируемой мощности от плотности тока в обмотках

Выводы.

1. Исследовано влияние высоты пазов статора на характеристики электрической машины с постоянными магнитами тангенциальной намагниченности на роторе, а также выполнена оценка пазового рассеяния в зависимости от высоты пазов.

2. Определено оптимальное значение высоты пазов статора, при котором достигается максимум удельного электромагнитного момента на единицу активной массы. Этот оптимум достигается при высоте пазов в 3,5 раза больше по сравнению с базовым вариантом, т.е. при высоте пазов равно $h = 50,75$ мм.

3. Проведены сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей электрогенератора для ветроустановки с вертикальной осью вращения и управляемыми лопастями. Среднее отклонение между экспериментальными и расчетными зависимостями не превышает 10%.

4. Сравнение расчетных зависимостей для электрогенератора с различной высотой пазов и неизменными размерами ротора показало, что для генератора с увеличенной в 3,5 раза высотой пазов наблюдается увеличение генерируемой мощности примерно в 4 раза при работе электрогенератора на активную нагрузку.

Список литературы: 1. Радимов И.Н. Разработка вентильных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины / И.Н. Радимов, В.В. Рымица, М.В. Гульий, З.П. Процына, Чан Тхи Тху Хьонг // *Електротехніка і електромеханіка*. №1 – 2008. – С. 41–44. 2. Гребеников В.В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами радиальной намагниченности / В.В. Гребеников, М.В. Прыймак // *Гідроенергетика України*. – 2014. – № 2-3. – С. 62-67. 3. Гребеников В.В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами тангенциальной намагниченности / В.В. Гребеников, М.В. Прыймак // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*: зб. наук. пр. Вип. 38'2014. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. — 2014. – С. 69 – 78. 4. Gieras J.F. Permanent magnet motor technology / J.F. Gieras, M. Wing // New York: Marcel Dekker Inc., 2002. – 590 p. 5. Bianchi N. High performance PM synchronous motor drive for an electrical scooter / N. Bianchi, S. Bolognani, M. Zigliotto // *IEEE Trans. on Industry Applications*

tions. – 2001. – Vol. 37. – No. 5. – P. 1348–1355. 6. V. Grebenikov. A wind turbine of new type. / V. Grebenikov, V. Kavan, P. Szymczak, M. Pryjmak // *Maszyny elektryczne. – Zeszyty Problemowe*. - 2015. – № 02 – С. 269-274.

Bibliography (transliterated): 1. Radimov, I. N., et al. "Razrabotka ventil'nyh dvigatelej s postojannymi magnitami na baze shtampa statora reaktivnoj mashiny." *Elektrotehnika i elektromehanika* 1 (2008): 41–44. Print. 2. Grebenikov, V. V., and M. V. Pryjmak. "Sposoby umen'shenija pul'sacij jelektromagnitnogo momenta v jelektricheskix mashinah s postojannymi magnitami radial'noj namagnichennosti." *Gidroenergetika Ukraïni* 2–3 (2014): 62–67. Print. 3. Grebenikov, V. V., and M. V. Pryjmak. "Sposoby umen'shenija pul'sacij jelektromagnitnogo momenta v jelektricheskix mashinah s postojannymi magnitami tangencial'noj namagnichennosti." *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser.: *Elektrichni mashini ta elektromehaniczne peretvorennya energii*. No. 38 (1081). Kharkov: NTU "KPI", 2014. 69–78. Print. 4. Gieras, J.F., and M. Wing *Permanent magnet motor technology* New York: Marcel Dekker Inc., 2002. Print. 5. Bianchi, N., Bolognani, S. and M. Zigliotto "High performance PM synchronous motor drive for an electrical scooter." *IEEE Trans. on Industry Applications* Vol. 37. No. 5. 2001. 1348–1355. Print. 6. Grebenikov, V. "A wind turbine of new type." *Maszyny elektryczne. Zeszyty Problemowe* No. 02. 2015. 269–274. Print.

Поступила (received) 01.07.2015

«Сведения об авторах /About the Authors»

Гребеников Виктор Владимирович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт электродинамики национальной академии наук Украины, e-mail: elm1153@gmail.com

Grebenikov Viktor Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: elm1153@gmail.com

Прыймак Максим Васильевич – Инженер 1 категории, Институт электродинамики национальной академии наук Украины, e-mail: maksim.prv@gmail.com

Pryjmak Maxim Vasilevich – engineer 1 category, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: maksim.prv@gmail.com