

Ways to Reduce the Resistance Torque During the Disk Rotor Spinning and to Increase the Electromotive Force in the Transverse Magnetic Flux Generator in No-Load Mode

Yehorov A.V.¹, Duniev O.O.¹, Masliennikov A.M.¹, Stamann M.²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Kharkiv, Ukraine

²Otto von Guericke University Magdeburg
Magdeburg, Germany

Abstract. The article reviews the transverse magnetic flux machine designs. The work aim was the analysis of the transverse magnetic flux generator with a disk rotor, the stator poles optimal number selection and the resistance torque reducing. This resistance torque was created by one-sided magnetic attraction force from the permanent magnets on the rotor and it hasn't been considered previously, which is a novelty of this work. The ways to increase the electromotive force in the generator are also considered. The main work goal was obtained by magnetic system analysis of generator using Ansys Maxwell software and disk rotor strength analysis using ASCON Компас-3D software. It is concluded that the magnetic reversal frequency of the stator cores depends on the number of permanent magnets on the rotor. The dependence of the magnetic induction average value in the U-shaped stator core on their number was obtained during the magnetic analysis. The disk rotor strength simulation allowed getting the maximum possible bend of the disk rotor under the influence of the one-sided magnetic attraction force. The neodymium permanent magnets help to improve generator efficiency and to decrease its mass-dimensional indicators. It was proposed to use an uneven permanent magnets distribution on the rotor in the transverse magnetic flux generator to reduce the resistance torque of the disk rotor. The permanent magnets attraction force that interacts with stator steel poles was considered. The dependence of magnetic attraction force of the permanent magnets on the air gap size of the generator has been obtained.

Keywords: resistance torque, electromotive force, transverse magnetic flux generator, disk rotor, permanent magnet, force of one-sided magnetic attraction.

DOI: 10.5281/zenodo.3239164

Modalități de reducere a momentului de rezistență în timpul rotirii rotorului disc și de creștere a forței electromotoare într-un generator cu flux magnetic transversal la mers în gol

Egorov A.V.¹, Dunev A.A.¹, Maslennikov A.M.¹, Shtamann M.²

¹Universitatea Tehnică Națională "Institutul Politehnic din Kharkov"

Kharkov, Ucraina

²Universitatea din Magdeburg Otto-von-Guericke

Magdeburg, Germania

Rezumat. Articolul prezintă o privire de ansamblu asupra principalelor modele de mașini electrice cu flux magnetic transversal, subliniază simplitatea relativă a designului acestora și indicatorii de putere specifici. Scopul lucrării este de a analiza un generator de flux magnetic transversal cu un rotor disc, de a selecta numărul optim de poli ai miezului statorului și de a reduce momentul rezistenței la acțiunea unei forțe magnetice unilaterale, care nu a fost considerată mai devreme și este o noutate a acestei lucrări. De asemenea, au fost luate în considerare modalitățile de creștere a forței electromotoare din generator, fiind unul dintre cei mai importanți indicatori ai eficienței mașinii. Obiectivul principal al lucrării a fost atins prin analiza sistemului magnetic al generatorului folosind software-ul Ansys Maxwell și calculul rezistenței rotorului disc folosind software-ul ASCON Compass-3D. În timpul analizei sistemului magnetic al generatorului cu un număr diferit de poli pe stator pentru regimul de mers în gol, dependența valorii medii a inducției magnetice în miezul statorului în formă de Π de numărul lor a fost obținută. Accentul este pus pe utilizarea mai multor magneți permanenți neodimi care consumă mai multă energie, ceea ce permite crearea unui design al generatorului cu indicatori de putere mai înalți. Se propune utilizarea unei distribuții inegale a magneților permanenți pe rotorul generatorului cu flux magnetic transversal pentru a reduce momentul rezistenței rotorului disc de forța atracției magnetice unilaterale a magneților permanenți. Se ia în considerare problema influenței forței de atragere a magneților permanenți asupra miezurilor stator laminate din tablă de oțel electric.

Cuvinte-cheie: generator cu flux magnetic transversal, forță electromotoare, moment de rezistență, rotor disc, magnet permanent, forță de atracție magnetică unilaterală.

Пути уменьшения момента сопротивления при вращении дискового ротора и увеличение электродвижущей силы в генераторе с поперечным магнитным потоком в режиме холостого хода
Егоров А.В.¹, Дунев А.А.¹, Масленников А.М.¹, Штаманн М.²

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

г. Харьков, Украина

²Магдебургский университет Отто-фон-Герике

г. Магдебург, Германия

Аннотация. В статье представлен обзор основных конструктивных исполнений электрических машин с поперечным магнитным потоком, подчеркивается относительная простота их конструкции и высокие удельные показатели мощности. Целью работы является анализ генератора с поперечным магнитным потоком с дисковым ротором, выбор оптимального числа полюсов сердечника статора и уменьшение момента сопротивления от действия силы одностороннего магнитного притяжения, что не было рассмотрено ранее и является новизной данной работы. Также рассмотрены способы увеличения электродвижущей силы в генераторе, как одного из важнейших показателей эффективности работы машины. Основная цель работы была получена путем анализа магнитной системы генератора с использованием программного обеспечения Ansys Maxwell и прочностного расчета дискового ротора с использованием программного обеспечения ASCON Компас-3D. В ходе анализа магнитной системы генератора с различным числом полюсов статора для режима холостого хода были получены зависимости среднего значения магнитной индукции в П-образном сердечнике статора от их количества. Делается акцент на использовании более энергоёмких неодимовых постоянных магнитов, которые позволяют создать конструкцию генератора с более высокими удельными показателями мощности. Предлагается использовать неравномерное распределение постоянных магнитов на роторе в генераторе с поперечным магнитным потоком для уменьшения момента сопротивления дискового ротора от силы одностороннего магнитного притяжения постоянных магнитов. Рассмотрен вопрос влияния силы притяжения постоянных магнитов к шихтованным сердечникам статора из листов электротехнической стали. Получена зависимость силы магнитного притяжения постоянного магнита от величины воздушного зазора между статором и ротором. В программе АСКОН Компас-3D проведено твердотельное моделирование, которое позволило рассчитать максимально возможный прогиб дискового ротора под влиянием силы одностороннего магнитного притяжения. Делается вывод о достаточной жесткости дискового ротора для обеспечения равномерного воздушного зазора при работе генератора в режиме холостого хода.

Ключевые слова: генератор с поперечным магнитным потоком, электродвижущая сила, момент сопротивления, дисковый ротор, постоянный магнит, сила одностороннего магнитного притяжения.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире наблюдается тенденция производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии, в частности от малой энергетики, что демонстрируется популярностью «зеленого тарифа» среди населения. Разработка и внедрение высокоэффективных и надежных электрических машин, которые способны генерировать электрическую энергию, имеет практический и научный интерес. Одной из таких машин, является электрическая машина с поперечным магнитным потоком (ЭМП), которая в последнее время активно обсуждается и исследуется научной общественностью, как одна из высокоэффективных и достаточно простых по конструкции электрических машин.

Впервые ЭМП предложил В. М. Морди еще в 1895 году. Но, к сожалению, на тот момент отсутствовали возможности современного автоматизированного проектирования, производства и электронные

компоненты управления. Однако, в последние десятилетия в связи с развитием моделирования на основе численных методов, а также современных технологий в силовой электронике и промышленности, ЭМП стали приобретать все больший интерес научной и производственной общественности.

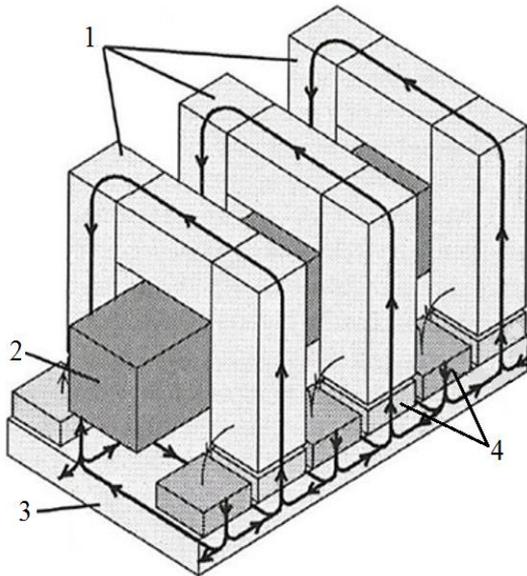
Это связано с тем, что они обладают высокими энергетическими показателями в генераторном режиме работы и высоким значением удельного вращающего момента в двигательном режиме (до 6 Н·м/кг).

Вместе с этим, ЭМП имеют ряд преимуществ по конструктивному исполнению и массогабаритным показателям, в сравнении с классическими электрическими машинами общего назначения [1-4].

Помимо этого, ЭМП позиционируются как многополюсные, высокомоментные, безредукторные машины, применяемые в качестве электрических двигателей или генераторов прямого привода.

Конструктивные особенности ЭМПП позволяют применять простые, экономичные и надежные на сегодня обмотки статора, простой кольцевой формы, без усложнения процесса намотки и схемы соединения выводных концов [5, 6].

Базовая конструкция ЭМПП изображена на рис. 1 с линиями магнитного потока, которые замыкаются через магнитно-мягкие П-образные сердечники статора, диск ротора и постоянные магниты.



1 - сердечник статора, 2 - обмотка статора, 3 - сердечник ротора, 4 - постоянные магниты.

Рис. 1. Конструкция и магнитная цепь ЭМПП.¹

Из-за отсутствия лобовой части обмотки статора электрические потери мощности меньше, чем в электрических машинах классической конструкции.

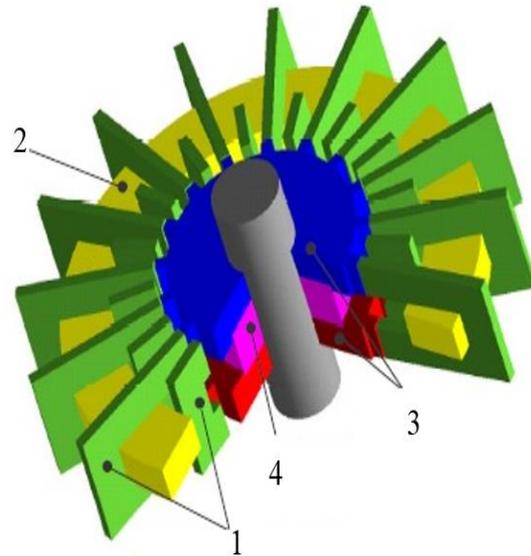
Кроме того, отсутствуют потери мощности, связанные с системой возбуждения из-за использования постоянных магнитов.

В целом, это приводит к гораздо большей эффективности при высокой удельной мощности машины.

За последние 50 лет в этом классе машин было предложено более сотни различных конструктивных исполнений [7–19]. Основными конструктивными исполнениями ЭМПП стали внешнее, внутреннее или дисковое расположения ротора, а обмотка статора выполняется одно-, двух- и трехфазной.

Одним из классических представителей ЭМПП с цилиндрическим ротором является конструкция, приведенная на рис. 2. Ее

исследование выполнено ученым G. Kastinger [8]. По сравнению с классическими концепциями ЭМПП здесь предложены магнитные шунты в межполюсном пространстве статора, для уменьшения потоков рассеяния магнитного поля от действия неактивных постоянных магнитов в межполюсном пространстве статора.



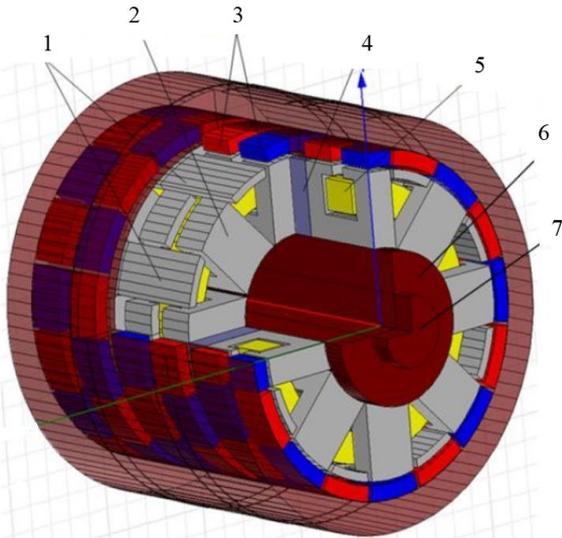
1 - сердечник статора, 2 - обмотка статора, 3 - сердечник ротора, 4 - постоянные магниты.

Рис. 2. Расположение элементов магнитной системы ЭМПП с цилиндрическим ротором.²

Конструкция ЭМПП, предложенная в [7], имеет внешний ротор и когтеобразные полюса статора (рис. 3). Как подчеркивает автор, она похожа на конструкцию ротора гибридного шагового двигателя.

В этой конструкции на внутренней поверхности ротора, в виде стального пустотелого цилиндра, наклеены постоянные магниты с чередующейся полярностью. Машина представляет собой трехфазную ЭМПП со сдвигом каждого следующего ряда П-образных полюсов статора на 1/3 от зубцового деления предыдущего ряда.

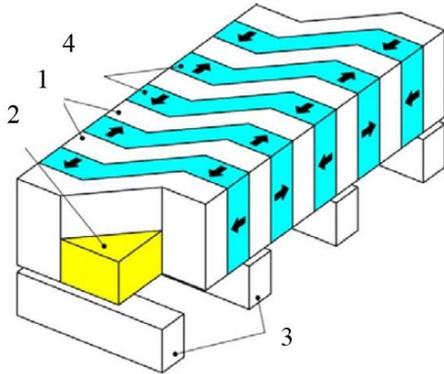
Конструкция с внешним ротором обладает большим плечом действия силы, и как следствие, большим вращающим моментом в двигательном режиме работы, по сравнению с конструкцией ЭМПП с внутренним ротором [21].



1 - шунты, 2 - сердечник статора, 3 - постоянные магниты, 4 - дистанционное кольцо, 5 - обмотка статора, 6 - сердечник ротора, 7 - вал.

Рис. 3. Конструкция ЭМПП с внешним цилиндрическим ротором.³

Интересную конструкцию линейного двигателя предложил Deok je Bang в 2010 году [6]. Она представляет собой одностороннюю, однофазную ЭМПП с П-образными сердечником и пассивным ротором, как показано на рис. 4. Монолитные стальные сегменты были изготовлены из цельного куска металла в силу сложности шихтовки такой формы.



1 - сердечник статора, 2 - обмотка статора, 3 - сердечник ротора, 4 - постоянные магниты.

Рис. 4. Фрагмент линейного ЭМПП.⁴

Данная конструкция обеспечивает жесткое закрепление постоянных магнитов между полюсами статора и строгое соблюдение их полярности с надежной фиксацией без склеивания. Однако, сегменты полюса статора представленной формы достаточно трудоемки в изготовлении, что удорожает стоимость конструкции в целом.

Важным критерием отбора типа конструктивного исполнения ЭМПП для исследования и изготовления является, прежде всего, эффективность и технологичность конструкции. Поэтому в работе будет уделено внимание конструкции ЭМПП с дисковым ротором (рис. 5).

Такая конструкция наименее трудоемка в изготовлении, а поклейка и крепление постоянных магнитов на диск ротора гораздо легче, чем на внутреннюю поверхность цилиндра. Тем не менее, необходимо учитывать и тот факт, что диск с валом должен быть жестко зафиксирован в подшипниках, во избежание перекоса и неравномерности воздушного зазора.

ЭМПП с дисковой конструкцией ротора является относительно новым типом электрической машины и получила «вторую жизнь» благодаря использованию современных постоянных магнитов на основе NdFeB и развитию элементной базы в электронике.

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является анализ генератора с поперечным магнитным потоком с дисковым ротором, а именно выбор оптимального количества полюсов сердечника статора и уменьшение момента сопротивления от действия силы одностороннего магнитного притяжения, что не было рассмотрено ранее и является новизной данной работы. Также рассмотрены способы увеличения электродвижущей силы, как одного из важнейших показателей эффективности работы генератора, в результате чего работа является актуальной.

II. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый генератор с поперечным магнитным потоком (ГПП) представляет собой электрическую машину, состоящую из двух статоров и дискового ротора, на котором расположены в два ряда постоянные магниты с каждой стороны. Каждый статор, в свою очередь, состоит из кольцевой обмотки, на которую равномерно одеты шихтованные П-образные сердечники, изготовленные из листовой электротехнической стали (рис. 5) [22].

В основе принципа действия ГПП, как и любого другого генератора, лежит закон электромагнитной индукции. Для его

^{3,4} Appendix 1

выполнения необходимо, чтобы на роторе постоянные магниты располагались с чередованием полярности в шахматном порядке и количеством одна пара на один П-образный сердечник статора.

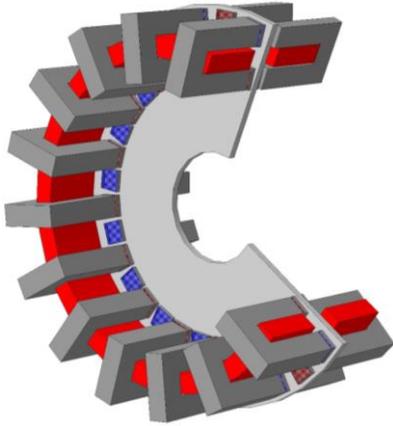


Рис. 5. Трехмерная модель с вырезом 16-ти полюсного ГПП с дисковым ротором.⁵

Для выполнения закона электромагнитной индукции необходимо перемагничивание сердечника статора, поэтому число пар постоянных магнитов должно быть в два раза больше, чем самих П-образных сердечников. Таким образом, общее количество постоянных магнитов превышает количество П-образных сердечников в 4 раза. На рис. 6 приведен эскиз дискового ротора 16-ти полюсного ГПП, на котором штриховой линией показано где будут располагаться полюса статора.

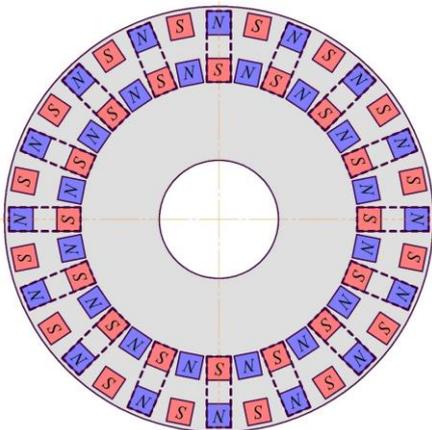


Рис. 6. Эскиз ротора 16-ти полюсного ГПП.⁶

Постоянные магниты, которые расположены не под П-образным сердечником никакой полезной работы не совершают, а создают магнитное поле рассеяния. Известны различные способы борьбы с этим полем рассеяния, в частности –

использование магнитных шунтов между П-образными сердечниками. Это приводит к увеличению ЭДС генератора за счет подмагничивания магнитных шунтов. Однако, стоит отметить, что это так же приводит к созданию дополнительного тормозного момента [23].

Сотрудниками кафедры «Электрические машины» НТУ «ХПИ» совместно с сотрудниками кафедры «Системы электропривода» Магдебургского университета имени Отто-фон-Герике разработан, спроектирован и создан экспериментальный образец низкооборотного ГПП с дисковым ротором ГПП-100/16, внешний вид которого показан на рис. 7, а его технические характеристики приведены в табл. 1.

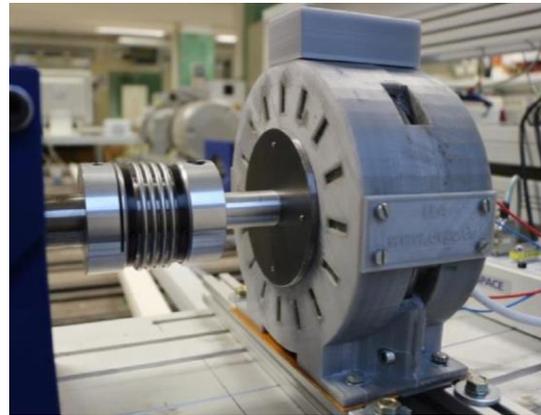


Рис. 7. Экспериментальный образец ГПП-100/16.⁷

Таблица 1²⁰.
Номинальные данные и размеры ГПП-100/16²¹

Параметр Parameter	Значение Value
Номинальное напряжение, В Rated voltage, V	24
Номинальная частота вращения, об/мин Nominal speed, rpm	20
Количество статоров Number of stators	2
Количество полюсов на статоре Number of poles on the stator	16
Внешний диаметр сердечника статора, мм External diameter of the stator core, mm	176
Длина машины, мм Machine length, mm	90
Длина воздушного зазора, мм Air gap length, mm	1

Проведенные экспериментальные исследования ГПП-100/16 подтвердили расчетные значения и показали, что при номинальной частоте вращения в его катушках наводится ЭДС синусоидальной формы с максимальным значением около 33 В.

III. Пути повышения ЭДС в ГПП

Значение ЭДС, которое наводится в катушках ГПП определяется как:

$$E = \sum_0^p 4.44 \cdot \Phi \cdot W \cdot f, \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток в П-образном сердечнике статора;

W – количество витков в катушке статора;

f – частота перемагничивания сердечника статора.

Таким образом, влиять на величину ЭДС, которая наводится, в катушках статора ГПП, можно изменением одного из этих параметров. Величина магнитного потока зависит от запасенной энергии постоянного магнита, то есть от его объема и величины остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы.

Частота перемагничивания сердечника статора, как и в каждой синхронной машине, определяется следующей формулой:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}. \quad (2)$$

Таким образом, возможно два пути влияния на частоту перемагничивания сердечника статора: первый – увеличение частоты вращения ротора и второй – увеличение количества П-образных сердечников. Первый вариант не приемлем, так как одним из условий создания тихоходного генератора является фиксированное значение его частоты вращения. Остается только возможность изменять количество П-образных сердечников.

Для сравнения различных конструктивных исполнений проведем постепенное варьирование каждым из этих параметров, при соблюдении следующих условий:

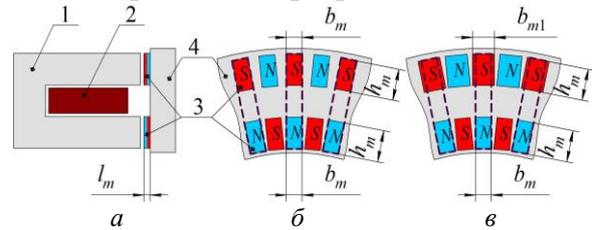
– внешний и внутренний диаметры, а также длина сердечника статора остаются величиной постоянной;

– площадь паза под катушку статора в каждой модели не изменяется;

– используются постоянные магниты с остаточной магнитной индукцией 1,3 Тл;

– длина воздушного зазора в каждой модели одинаковая и составляет 1 мм.

Исходя из принципа действия ГПП необходимо соблюдение чередования полярности постоянных магнитов на роторе (рис. 9, а) и количества пар постоянных магнитов, которое должно быть в два раза больше, чем П-образных сердечников магнитопровода статора (рис. 9, б).



1 - П-образный сердечник статора;
2 - катушка статора; 3 - постоянные магниты;
4 - сердечник ротора.

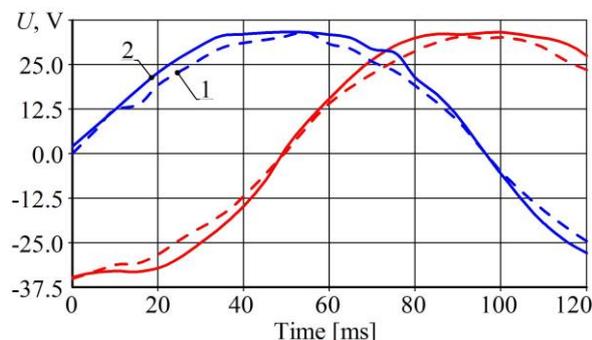
а - поперечное сечение; б - продольный разрез с одинаковыми по размерам постоянными магнитами; в - продольный разрез с различными по размерам постоянными магнитами.

Рис. 8. Эскизы магнитной системы ГПП.⁸

Так как ГПП выполняется с дисковым ротором, то постоянные магниты будут расположены на дисковом роторе по внешнему и внутреннему диаметрам, размеры которых заданы размерами П-образного сердечника. Поэтому исходя из условий, когда на длине окружности внутреннего диаметра необходимо расположить стандартные по размерам (b_m – ширина, h_m – высота, l_m – длина) постоянные магниты в количестве $2p$ таким образом, чтобы промежуток между ними был минимален и составлял $\delta_m = 0.1-0.2$ мм. Поэтому размеры поперечного сечения П-образного сердечника магнитопровода статора будут равняться размеру постоянного магнита на роторе. Поскольку эта площадь по всей длине пути следования магнитного потока не изменяется, то размер постоянного магнита на внешнем диаметре должен быть таким же. Это приводит к тому, что расстояние между постоянными магнитами не удовлетворяет условию $\delta_m = 0.1-0.2$ мм. Для выполнения этого условия выберем ближайший стандартизированный постоянный магнит, в котором высота и длина будут такими же, а ширина чуть больше и равна b_{m1} .

⁸ Appendix 1

Влияние увеличения ширины постоянного магнита внешнего диаметра на величину ЭДС ГПП рассчитано на трехмерных моделях в программной среде Ansys Maxwell [25] и показано на рис. 10.



1 - модель с одинаковыми по размерам постоянными магнитами;
2 - модель с различными по размерам постоянными магнитами.

Рис. 9. График ЭДС, наводимый в катушке статора.⁹

Исходя из результатов моделирования видно, что увеличение ширины постоянного магнита на внешнем диаметре привело к незначительному увеличению площади под графиком ЭДС, т.е. большей отдаче энергии постоянным магнитом за одинаковый период времени, однако амплитуда ЭДС не изменилась. Полученный результат считается целесообразным, поскольку контакт с краем П-образного сердечника статора будет длиннее в конструкции, изображенной на рис.9, в, чем в конструкции изображена на рис.9, б.

В рассматриваемой конструкции ГПП увеличение количества П-образных сердечников возможно только с одновременным уменьшением их ширины. Это связано с тем, что внешний диаметр сердечника статора необходимо оставить величиной постоянной. Для анализа создан ряд трехмерных моделей с количеством П-образных сердечников от 16 до 64 с шагом 8, некоторые эскизы которых показано на рис. 11 [24].

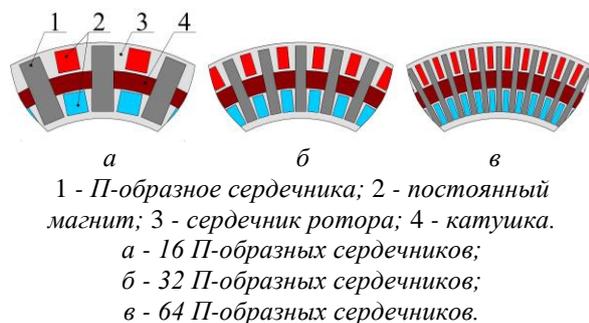


Рис. 10. Эскизы магнитной системы ГПП.¹⁰

После завершения трехмерного моделирования в программе Ansys Maxwell получено графики ЭДС, приводятся в катушках статора. Значение каждой ЭДС меняется по синусоидальному закону, а для 16-ти полюсной конструкции максимальное значение ЭДС составляет 31 В (рис. 12).

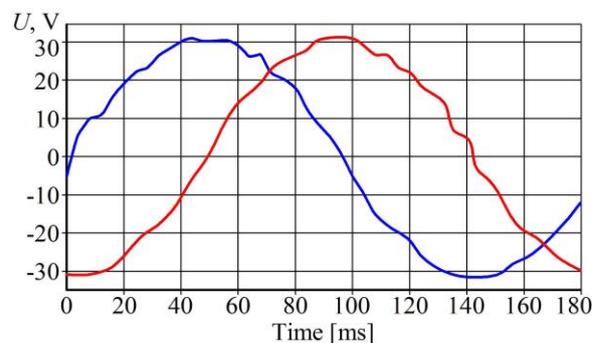


Рис. 11. График ЭДС, наводимый в катушке статора 16-ти полюсного ГПП.¹¹

Моделирование электромагнитных процессов, для каждого из вариантов конструкции также показало, что уменьшение ширины полюса, а соответственно и ширины постоянного магнита, приводит к значительному уменьшению насыщения самого полюса (рис. 13). Это связано с тем, что запасенная энергия в магните уменьшается пропорционально уменьшению объема самого магнита, а величина воздушного зазора и длина пути замыкания силовой линии магнитного потока остается величиной постоянной.

После проведения электромагнитного расчета программа Ansys Maxwell [25] позволяет получить значение магнитной индукции в каждой точке трехмерной модели. Среднее значение насыщения П-образного сердечника статора показано на рис. 14. Моделирование показало, что уменьшение насыщения П-образного сердечника статора происходит по нелинейному закону.

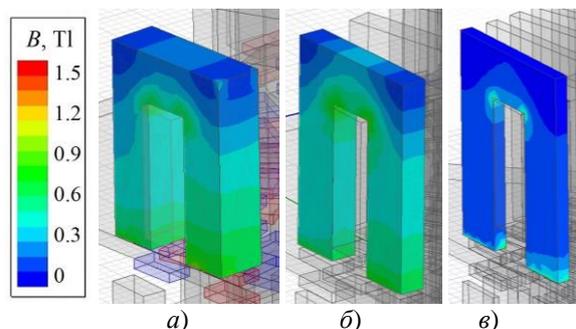


Рис. 12. Картина насыщения полюса статора ГПП с 16 (а), 32 (б) и 64 (в) полюсами.¹²

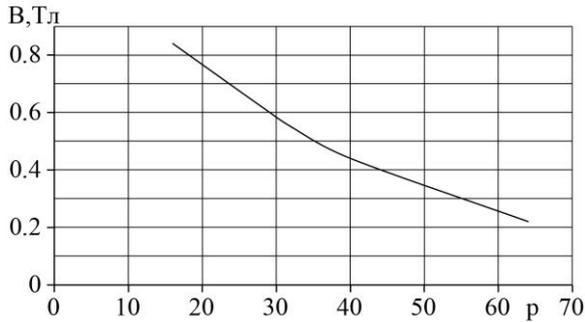


Рис. 13. Зависимость среднего значения магнитной индукции в П-образном сердечнике статора от их количества.¹³

Зная форму кривой зависимости магнитной индукции от количества П-образных сердечников на статоре можно подобрать уравнение для её аппроксимации. Для достижения этой цели можно использовать линейную, экспоненциальную, логарифмическую или полиномиальную аппроксимацию. Из всех перечисленных видов аппроксимации наиболее удачной для данного случая считается экспоненциальная аппроксимация. Таким образом, аппроксимация графика среднего значения магнитной индукции в П-образных сердечниках статора ГПП при их различном количестве имеет следующее выражение:

$$B = 1.34 \cdot e^{-0.028p} . \quad (3)$$

Подставляя найденные ранее выражения (1), (2) и (3) в формулу (4), получим уравнение ЭДС в катушке ГПП

$$E = 0.025 \cdot \pi \cdot k_{pm} \cdot p \cdot n \cdot W \times \left((d_s + b_i)^2 - d_s^2 \right) \cdot e^{-0.028p} . \quad (4)$$

где: k_{pm} – коэффициент заполнения сердечника ротора постоянными магнитами;

d_s – внутренний диаметр сердечника статора;

b_i – высота постоянного магнита.

Как видно из уравнения, зависимость $E(p)$ имеет нелинейный характер. Если подставить в это уравнение геометрические размеры 16-ти полюсного ГПП, можно построить зависимость ЭДС от количества полюсов и найти максимум ЭДС. В то же время можно оперировать двумя величинами: количеством полюсов и числом витков в катушке статора.

Используя программу Ansys Maxwell [25] можно получить зависимость значений ЭДС в катушке в зависимости от количества полюсов статора. Данная зависимость показана на рис. 15 линией из точек ($W = 1000$, Maxwell).

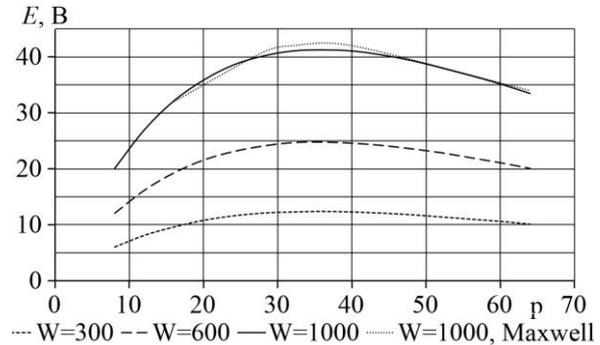


Рис. 14. Зависимость ЭДС от числа полюсов статора.¹⁴

Анализируя рис.15 можно сделать вывод, что:

- аналитический расчет показал достаточно высокую точность полученных результатов по сравнению с расчетом в программе Ansys Maxwell;

- максимальное значение ЭДС приходится на количество полюсов статора ГПП, которое находится в диапазоне от 32 до 38. Причем такая тенденция соблюдается и при других количествах витков обмотки.

Из технологических соображений легче изготовить конструкцию генератора с меньшим количеством полюсов на статоре, поэтому наилучшей примем модель с 32 полюсами на статоре, так как дальнейшее увеличение полюсности не приводит к увеличению ЭДС в катушках статора.

IV. ПУТИ УМЕНЬШЕНИЯ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Постоянные магниты – это элементы, которые позволяют конструировать оригинальные электрические генераторы для альтернативных источников энергии и, неважно, какими способами они будут приводиться в движение: ветром, водой.

В восьмидесятые годы прошлого века ученые разработали новый магнитный материал – неодим-железо-бор (NdFeB) и начиная с 1984 г. началось широкое применение его в промышленности. Магниты NdFeB имеют широкий диапазон рабочих

температур (от -40°C до $+150^{\circ}\text{C}$), некоторые их виды можно использовать до $+200^{\circ}\text{C}$.

Чтобы избежать коррозии, сплав NdFeB покрывают цинком, никелем, медью или комбинацией этих материалов. Кроме этого, во избежание возможных химически нестабильных соединений в структуре сплава процесс изготовления проводится при отсутствии воздуха.

В настоящее время магниты NdFeB очень широко используются в двигателях электроприводов или в конструкциях генераторов малой мощности. Использование более энергоёмких постоянных магнитов позволяет сделать конструкцию ГПП компактной. Однако, следует помнить, что одновременно с увеличением мощности постоянного магнита растёт и сила притяжения постоянного магнита к сердечнику статора, а также момент сопротивления, который необходимо преодолеть, чтобы повернуть ротор ГПП с места.

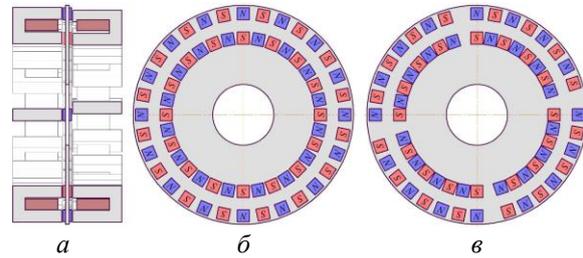
Вопрос уменьшения момента сопротивления от действия постоянных магнитов, которое создается за счет силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП) к П-образным сердечникам на статоре, является актуальным с точки зрения уменьшения потерь мощности. Критерием уменьшения тормозных составляющих момента является сохранение величины ЭДС, которая наводится в кольцевых обмотках статора.

Одним из вариантов уменьшения тормозного момента сопротивления является увеличение величины воздушного зазора. Это является достаточно простым, но не приемлемым решением, поскольку это приведет к существенному уменьшению ЭДС.

Другим вариантом уменьшения тормозного момента сопротивления является изменение расположения постоянных магнитов на диске ротора таким образом, чтобы они находились с неравномерным смещением относительно П-образных сердечников на статоре и друг относительно друга. Сравнение поперечных сечений классического исполнения и неравномерного распределения постоянных магнитов показано на рис. 16.

Анализ магнитной системы и расчет был проведен для 16-полюсной конструкции генератора, однако его результаты и описанные выше способы борьбы с моментом сопротивления дискового ротора в целом

можно считать действенными и эффективными для любого другого числа полюсов генератора с поперечным магнитным потоком.



*а - продольный разрез;
б - поперечное сечение при равномерном распределении постоянных магнитов;
в - поперечное сечение при неравномерном распределении постоянных магнитов.*

Рис. 15. Эскизы магнитной системы ГПП-100/16.¹⁵

Предложенное неравномерное распределение постоянных магнитов значительно влияет на путь замыкания силовой линии магнитного поля, и будет происходить не симметрично, а с определенным смещением. Это приводит к уменьшению составляющих тормозного момента, так как в одновременном сцеплении с П-образными сердечниками на статоре находятся не все постоянные магниты ротора, а только их часть.

В программной среде ANSYS Maxwell [25] выполнено трехмерное моделирование магнитного поля для трех вариантов конструкции, а результаты сведены табл. 2.

Исходя из полученных результатов моделирования видно, что предложенная конструкция ротора с неравномерным распределением постоянных магнитов позволяет снизить влияние момента сопротивления вращению от действия постоянных магнитов, при незначительном уменьшении ЭДС, которое наводится в катушках генератора.

V. ПРОГИБ РОТОРА ГПП ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ОМП

Конструкция ГПП с дисковым ротором не симметрична в магнитном отношении относительно плоскости, проходящей перпендикулярно оси и посередине ротора. Таким образом, когда под П-образными сердечниками одного статора будут расположены постоянные магниты, то под вторым статором – они будут сдвинуты на

половину полюсного деления. Это объясняется принципом действия и на рис. 5, а этот сдвиг видно на осциллограмме ЭДС. Кроме того, во время сборки ГПП, ротор взаимодействует с одним статором без магнитного «противовеса» со стороны второго статора. Данный факт значительно усложняет сборку генератора, поскольку сила ОМП ротора к полюсам статора составляет 200 Н.

Таблица 2²².
Результаты моделирования²³

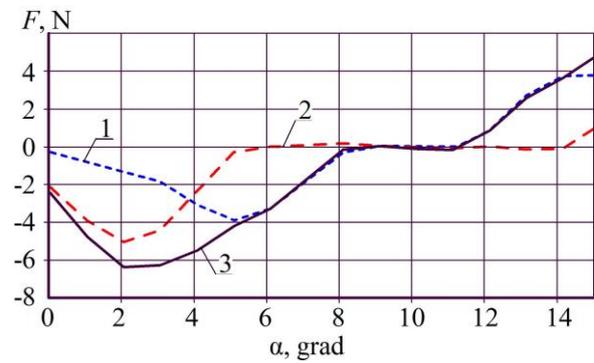
Разновидность конструкции ГПП TFG design variety	ЭДС одной катушки EMF of one coil		Момент сопротивления вращению Resistance torque	
	V	о.е. r.u.	Н·м N·m	о.е. r.u.
1	2	3	4	5
Базовое исполнение Basic design	24	1	5	1
Увеличение длины воздушного зазора 2 раза Increasing the air gap length 2 times	16	0,7	4,2	0,83
Уменьшение длины постоянного магнита на 20% Reducing the permanent magnet length by 20%	19	0,8	3,9	0,78
Неравномерное распределение постоянных магнитов Uneven distribution of permanent magnets	20	0,83	3,1	0,62

VI. ПРОГИБ РОТОРА ГПП ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ОМП

Конструкция ГПП с дисковым ротором не симметрична в магнитном отношении относительно плоскости, проходящей перпендикулярно оси и посередине ротора. Таким образом, когда под П-образными сердечниками одного статора будут расположены постоянные магниты, то под вторым статором – они будут сдвинуты на половину полюсного деления. Это

объясняется принципом действия и на рис. 5, а этот сдвиг видно на осциллограмме ЭДС. Кроме того, во время сборки ГПП, ротор взаимодействует с одним статором без магнитного «противовеса» со стороны второго статора. Данный факт значительно усложняет сборку генератора, поскольку сила ОМП ротора к полюсам статора составляет 200 Н.

При вращении дискового ротора с постоянными магнитами, на него будет действовать переменная сила ОМП, которая может привести к изгибу диска ротора на внешнем диаметре. Значение данной силы рассчитано в программной среде ANSYS Maxwell [25] и показано на рис. 17.



1 - внутренний круг; 2 - внешний круг;
3 - суммарная сила

Рис. 16. График действия силы ОМП на один магнит при повороте ротора.¹⁶

Согласно результатам расчета видно, что сила, действующая на постоянные магниты, и соответственно на диск ротора, не равномерна: ближе к краю диска, т.е. на внешнем диаметре, сила больше и ее максимум составляет 5 Н, а на внутреннем круге – меньше и составляет 1,3 Н от каждого постоянного магнита. На рис. 18 схематично стрелками показано направление действия силы ОМП.

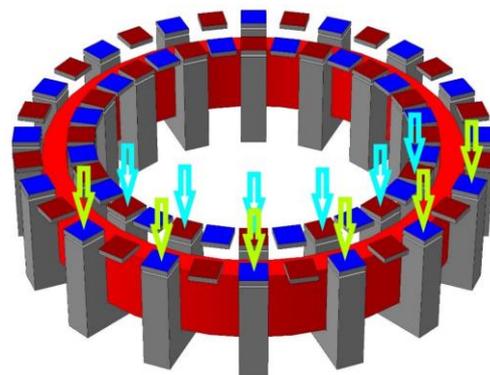


Рис. 17. Силы ОМП, действующие через один магнит.¹⁷

При работе ГПП такой прогиб недопустим, так как при уменьшении воздушного зазора постоянные магниты могут механически повредить себя и полюса статора в случае недостаточной жесткости конструкции диска ротора (рис. 19).

В программе АСКОН Компас-3D проведено твердотельное моделирование с помощью приложения АРМ FEM. Для этого, по существующей трехмерной модели ротора ГПП-100/16 задано распределенную силу на поверхности каждого постоянного магнита, значение которой получено из расчета в программной среде ANSYS Maxwell [25]. Так же заданы совпадающие поверхности и выбраны неподвижные поверхности – внутренний диаметр диска ротора, который через посадку с натягом сопрягается с валом. В качестве материала вала ГПП выбран алюминиевый сплав марки Д16, сердечник ротора Сталь 10, постоянные магниты NdFeB марки N48.

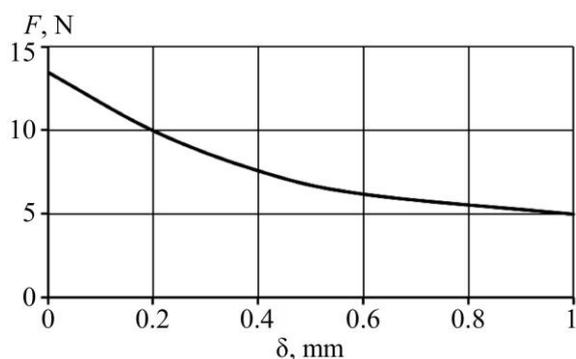
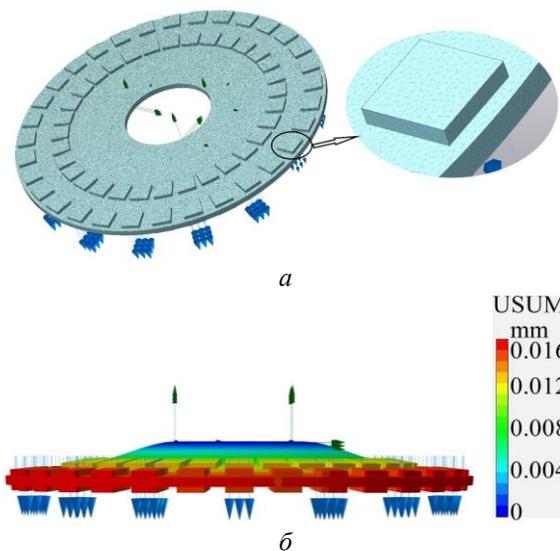


Рис. 18. Зависимость силы магнитного притяжения постоянного магнита от величины воздушного зазора.¹⁸

Генерация сетки конечных элементов выполнена в ручном режиме, с указанием наибольшей длины ребра тетраэдра в половину толщины постоянного магнита, и составляет 1 мм. Трехмерная модель со сгенерированной сеткой показана на рис.20, а. В результате расчета получены значения деформации, а картина перемещений, показана на рис. 20, б.

Значения деформации не превышают максимально допустимое значение для пластической деформации материала и имеет коэффициент запаса для максимально напряженного места на уровне 8 единиц.

Из расчета ротора на прогиб от действия силы ОМП общий прогиб диска составил – 0.016 мм, что составляет 1,5 % от длины воздушного зазора, что является достаточным для надежной работы генератора.



а - подготовленная модель к расчету;
б - деформированный ротор.

Рис. 19. Расчет ротора ГПП-100/16 на прогиб от действия силы ОМП.¹⁹

Для сравнения, как изменится сила ОМП при увеличении длины воздушного зазора и при неравномерном распределении постоянных магнитов, в программной среде ANSYS Maxwell выполнено трехмерное моделирование этих моделей, а результаты сведены табл. 3.

Как видно из табл.3, максимальное значение силы ОМП приходится на базовую конструкцию, таким образом нет смысла проводить механические расчеты для двух других конструктивных исполнений, поскольку сила ОМП снизилась, а значит запас по деформации и перемещению вырос.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования и экспериментального исследования показали, что:

1. Увеличение ширины постоянного магнита на внешнем диаметре приводит к незначительному увеличению площади под графиком ЭДС и большей отдаче энергии за одинаковый период времени, однако амплитуда ЭДС не изменяется.

2. Уменьшение ширины полюса, а соответственно и ширины постоянного магнита, приводит к значительному уменьшению насыщения самого полюса.

3. Уменьшение количества П-образных сердечников с 64 до 32 и 16 не приводит к повышению частоты ЭДС в катушках, и вообще снижает амплитудное значение ЭДС ГПП. В итоге, можно отметить, что частота перемагничивания сердечников статора зависит

только от количества постоянных магнитов на роторе, а амплитудное значение ЭДС от количества П-образных сердечников статора.

Таблица 3²⁴.
Результаты моделирования силы ОМП²⁵

Разновидность конструкции ГПП TFG design variety	Сила ОМП одного магнита, Н One-sided magnetic attraction force of a single magnet, N		
	Внешний диаметр External diameter	Внутренний диаметр Inner diameter	Суммарное значение Total value
Базовое исполнение Basic design	5	1,3	6,3
Увеличение длины воздушного зазора в 2 раза Increasing the air gap length 2 times	2,1	0,5	2,6
Уменьшение длины постоянного магнита на 20% Reducing the permanent magnet length by 20%	4,1	0,9	5
Неравномерное распределение постоянных магнитов Uneven distribution of permanent magnets	3,4	0,9	4,3

4. Максимальное значение ЭДС наводится в катушках ГПП, при наличии на статоре П-образных сердечников в количестве от 32 до 38 штук. Данная тенденция сохраняется при разном количестве витков в самих катушках статора.

5. Предложенная конструкция дискового ротора ГПП с неравномерным распределением постоянных магнитов на нем является лучшим результатом среди

рассмотренных конструктивных исполнений, поскольку приводит к уменьшению момента сопротивления при вращении на 38%.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Design and magnetic circuit of TFM (1 - stator core, 2 - stator winding, 3 - rotor core, 4 - permanent magnets).

²Fig. 2. The location of the TFM magnetic system elements with a cylindrical rotor (1 - stator core, 2 - stator winding, 3 - rotor core, 4 - permanent magnets).

³Fig. 3. TFM design with an external cylindrical rotor (1 - shunts, 2 - stator core, 3 - permanent magnets, 4 - distance ring, 5 - stator winding, 6 - rotor core, 7 - shaft).

⁴Fig. 4. Fragment design of the linear TFM (1 - stator core, 2 - stator winding, 3 - the rotor core, 4 - permanent magnets).

⁵Fig. 5. Three-dimensional TFG 16-poles cutout model with a disk rotor.

⁶Fig. 6. Sketch of the TFG 16-poles rotor.

⁷Fig. 7. TFG-100/16 experimental sample.

⁸Fig. 8. TFG magnetic system sketches (1 - U-shaped stator core, 2 - stator coil, 3 - permanent magnets, 4 - the rotor core, a - cross section; b - longitudinal section with the same size permanent magnets, c - longitudinal section with various sized permanent magnets).

⁹Fig. 9. EMF value that was induced in the stator coil (1 - model with the same size of permanent magnets, 2 - model with various size of permanent magnets).

¹⁰Fig. 10. TFG magnetic system sketches (1 - U-shaped core, 2 - permanent magnet, 3 - the rotor core, 4 - coil, a - 16 U-shaped cores, b - 32 U-shaped cores, c - 64 U-shaped cores).

¹¹Fig. 11. EMF value that was induced in the stator coil calculated by using Ansys Maxwell software.

¹²Fig. 12. The saturation picture of the TFG stator pole with 16 (a), 32 (b) and 64 (c) poles.

¹³Fig. 13. The dependence of the magnetic induction average value in the U-shaped stator core on their quantity.

¹⁴Fig. 14. The dependence of the EMF on the number of stator poles.

¹⁵Fig. 15. TFG-100/16 magnetic system sketches (a - longitudinal section, b - cross section with a even distribution of permanent magnets, c - cross section with uneven distribution of permanent magnets).

¹⁶Fig. 16. The graph of the one-sided magnetic attraction force effect on one magnet during the rotor rotation (1 - inner circle, 2 - outer circle, 3 - total force).

¹⁷Fig. 17. The one-sided magnetic attraction force forces acting through one magnet.

¹⁸Fig. 18. The dependence of the permanent magnet magnetic force on the size of the air gap.

¹⁹Fig. 19. The TFG-100/16 rotor band calculation depending on the one-sided magnetic attraction force (a - prepared model for calculation; b - deformed rotor as a result of calculation).

^{20,21}Table 1. Nominal data and dimensions of the TFM-100/16.

^{22,23}Table 2. Simulation results.

^{24,25}Table 3. Simulation results of the one-sided magnetic attraction force.

Литература (References)

- [1] Weh H. *Transversalflußmaschine. Elektrische Antriebe – Grundlagen.* Springer, 2007.
- [2] Jiang J. *Analytische und dreidimensionale numerische Berechnung von Transversal-flussmaschinen.* Braunschweig, 1988. 192 p.
- [3] Svecharenko D. Transverse flux machines for sustainable development – road transportation and power generation. *PEDS-2007*, 2007, pp. 1108–1114.
- [4] Svecharenko D. *On design analysis of a novel transverse flux generator for direct-driven wind application.* Sweden, 2010, 151 p.
- [5] Werner U. Transverse flux generators with high power density in multi-megawatt wind turbines. *Wissenschaftsforum, Messe HUSUMBTIND*, 2005. 286 p.
- [6] Deokje Bang. *Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines*, 2010 / Deokje Bang. Дата оновлення 26.11.2018.
- [7] Dobzhanskyi O. *Study on permanent magnet transverse flux machine.* Louisiana State, 2012. 149 p.
- [8] Kastinger G. Design of a novel transverse flux machine. *Body Electronics, Engineering Advanced Development*, Bühl, Germany, pp. 1–6.
- [9] Bang D. *Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines.* Delft, 2010. 275 p.
- [10] Lima J. *Transverse Flux Permanent Magnet Generator for Ocean Wave Energy Conversion.* Available at: <https://hal.inria.fr/hal-01566599/document> (accessed 08.12.2018).
- [11] Wan-Tsun Tseng. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu einem permanentmagneterregten Transversalfluß-Synchronearmotor in Sonderbauform. 2008.
- [12] Kang D.H., Bang D.J., Kim J.M., Jeong Y.H., Kim M.H. A Study on the design of PM excited transverse flux linear motor for ropeless elevator. *Trans. KIEE*, 2000, vol. 49b, no. 3, pp. 46-54.
- [13] Hackmann W. *Systemvergleich unterschiedlicher Radnabenantriebe für den Schienennahverkehr: Asynchronmaschine, permanenterregte Synchronmaschine, Transversal-flussmaschine.* Shaker, 2003. 260 p.
- [14] Gräf M. *Einseitige Transversal-flußmaschine mit multifunktionellem, keramischem Tragring.* Shaker, 2001. 183 p.
- [15] Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A. Transverse-flux permanent magnet (TFPM) machine with toothed rotor, *IEEE Transaction on Power Electronics*. 2002, no. 487, pp. 16-28.
- [16] Muljadi E., Drouilhet S., Holz R., Gevorgian V. Analysis of permanent magnet generator for wind power battery charging. *IEEE-IAS Annual Meeting*. 1996, vol. 1, pp. 541-548.
- [17] Polinder H., F.F.A. van der Pijl, Vilder G.J., Tavner P. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Trans. Energy Conversion*. 2006, vol. 21, pp. 725-733.
- [18] Masmoudi A., Elantably A. An approach to sizing high power density TFPM intended for hybrid bus electric propulsion. *Electric machines and power systems*. 2000, no. 28, pp. 341-354.
- [19] Anpalaham P. Design of transverse flux machines using analytical calculations & finite element analysis, *Tech. Royal Institute of Technology, Stockholm*, 2001.
- [20] Lyubarsky, B.G. and etc. Simplified mathematical model of the magnetic field of the motor with a transverse field [Uproschennaya matematicheskaya model magnitnogo polya dvigatelya s poperechnym polem]. *Light engineering and electric power engineering*. 2008, no. 2, pp. 75–78. (In Russian).
- [21] Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user’s guide. *Ansys Inc.* Pittsburgh, 2012, 1006 p.

Сведения об авторах.



Егоров Андрей Владимирович к.т.н., доцент кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина. E-mail: yehorov.andrii@gmail.com



Дунев Алексей Александрович к.т.н., доцент кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина. E-mail: duniev.khpi@gmail.com



Масленников Андрей Михайлович к.т.н., доцент кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина. E-mail: x-maslennikov@yandex.ua



Штамманн Марио к.т.н., научный сотрудник кафедры систем электрического привода Магдебургского университета им. Отто-фон-Герике, Universitätsplatz 2, г. Магдебург, Германия. E-mail: mario.stamann@ovgu.de