

УДК 621.313.1/.3=811.111  
DOI: 10.37890/jwt.vi75.374

## **Исследование нетрадиционного возбуждителя зубчатого статора с помощью программного обеспечения методом конечных элементов**

**И.Л. Титов**

*ORCID: 0000-0003-3406-0813*

*Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия*

**Аннотация:** в данной статье мы исследуем нетрадиционную конструкцию возбуждителя, имеющего зубчатый статор. Основная цель состоит в том, чтобы проверить, может ли предлагаемая машина соответствовать рабочим параметрам, заданным спецификацией. Данная статья начинается с описания возбуждителя тока с выступающими полюсами и описания конструкции с зубцами.[1] Статор с зубцами также отличается тем, что изготовлен из недорогого ферромагнитного материала, такого как чугун. При выборе чугуна руководствуются тем фактом, что он уже используется в промышленности в других компонентах генераторов переменного тока, таких как подшипники и некоторые соединительные втулки. Использование чугуна также позволяет снизить потери на вихревые токи по сравнению с твердыми стальными деталями. Поскольку путь магнитного потока в статоре является трехмерным, исследование проводится с помощью программного обеспечения для 3D-расчета методом конечных элементов. Модель машины сравнивается с экспериментальными результатами, полученными на макете. Затем мы вносим изменения в геометрию машины, чтобы улучшить ее характеристики. В заключение балансируем конструкцию с зубчатой передачей. Полученные результаты позволяют установить хорошую согласованность готовой элементной модели с результатами испытаний.

**Ключевые слова:** нетрадиционная конструкция возбуждителя, зубчатый статор, экспериментальные результаты, 3D-расчета методом конечных элементов, испытание с диодным мостом.

## **Investigation of an unconventional exciter of a toothed stator using software with finite element method**

**Ivan L. Titov**

*ORCID: 0000-0003-3406-0813*

*Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia*

**Abstract.** In this article we investigate an unconventional design of an exciter with a toothed stator. The main purpose is to check whether the proposed machine can meet the operating parameters given in the specification. This article begins with a description of a current exciter with protruding poles and a description of a design with teeth. The toothed stator is also different in that it is made of an inexpensive ferromagnetic material such as cast iron. The choice of cast iron is guided by the fact that it is already used commercially in other alternator components such as bearings and some connecting bushings. The use of cast iron also reduces eddy current losses compared to solid steel parts. Since the path of the magnetic flux in the stator is three-dimensional, the study is carried out using software for 3D finite element calculation. The machine model is compared with the experimental results obtained on the layout. Then we make changes to the geometry of the machine to improve its

characteristics. In conclusion, we balance the design with a gear train. The obtained results allow us to establish a good consistency of the finished element model with the test results.

**Keywords:** unconventional exciter design, toothed stator, experimental results, 3D finite element calculation, load test with a diode bridge.

**Описание машины**

Система возбуждения промышленных генераторов переменного тока. состоит из возбудителя и вращающегося выпрямителя, который питает обмотку ротора. Возбудитель представляет собой так называемую инвертированную машину, в которой статор или индуктор имеют выступающие полюса, а ротор или якорь содержат трехфазную обмотку, соединенную с вращающимся выпрямителем.[2] На рисунке 1 показана текущая структура возбудителя.

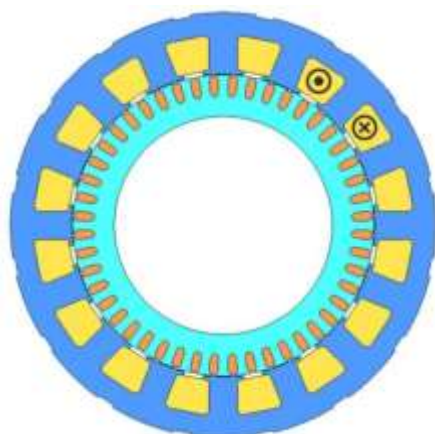


Рис. 1. Текущая структура возбудителя

Основные характеристики исследуемой машины (возбудитель генератора мощностью 600 кВА) приведены в таблице 1. Критерий размеров возбудителей предъявляется спецификацией генераторов переменного тока для конкретных областей применения (производство электроэнергии на борту судов). Большинство компаний, отвечающих за квалификацию генераторов переменного тока, предусматривают, что генератор переменного тока с коротким замыканием должен обеспечивать в 3 раза больший номинальный ток машины, что подразумевает, что система возбуждения должна подавать на обмотку ротора в 3 раза больший ток возбуждения[3]. Сравнение между существующей структурой и нетрадиционной структурой проводится по этому критерию.

Таблица 1

**Характеристики существующего возбудителя**

Данные	Значение
Количество полюсов	16
Количество выемок	48
Диаметр отверстия [мм]	270
Внешний диаметр [мм]	379.5
Длина утюга [мм]	60
Скорость вращения [об / мин]	1500

Нетрадиционная структура возбудителя имеет ту же арматуру, что и у эталонного возбудителя. Внешний диаметр индуктора увеличен до 400 мм. Катушка

индуктивности образована двумя узлами, которые содержат зубцы (показаны синим цветом на рис.2 а)) и внутри которых остается место для тороидальной общей обмотки (показаны желтым). Все когти в одном наборе имеют одинаковую полярность, в то время как когти в другом наборе имеют противоположную полярность. На рисунке 2 б) показана схема траекторий потока в машине. Эти траектории носят трехмерный характер[4]. Они имеют радиальную форму в воздушном зазоре, проходят в осевом направлении по зубцам и проходят через головку блока цилиндров статора с окружным и осевым компонентом. Траектории движения ротора такие же, как в машине с радиальным потоком.

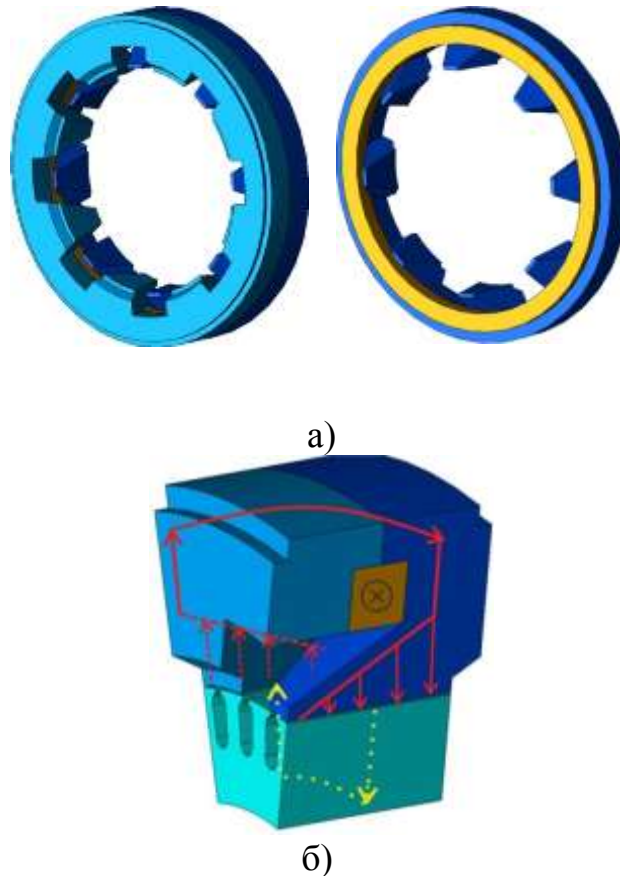


Рис. 2. Конструкция возбуждителя с зубчатым статором: (а) детали индуктора и (б) траектории линий потока в конструкции

**Преимущество этого типа конструкции кратко изложена ниже:**

- Количество деталей, необходимых для формирования статора, уменьшено по сравнению с обычным статором.
- Процессы изготовления и сборки массивных ферромагнитных деталей проще, чем для конструкций со штабелированием из листового металла.
- Использование общей намотки упрощает изготовление и позволяет иметь высокий коэффициент заполнения, попутно устраняя недостатки, присущие головкам катушек[5].

С другой стороны, индуктор изготовлен из недорогого материала, такого как чугун. Выбранным эталоном является чугун со сфероидальным графитом FGS 400-15. Чугуны из сфероидального графита обладают магнитными свойствами, которые являются лучшими среди чугунов (Калибр 01) Они также используются при

производстве тормозных двигателей (LS03). При выборе чугуна руководствуются тем фактом, что он уже используется в промышленности в других компонентах генераторов переменного тока, таких как подшипники и некоторые соединительные втулки. С другой стороны, реализация массивных деталей из чугуна проста и облегчает сборку индуктора.

При сравнении магнитных свойств с другими ферромагнитными материалами, используемыми в электрических машинах, чугун демонстрирует более низкие характеристики. Чтобы проиллюстрировать это, кривые  $B(H)$  чугуна, листового металла М600 и текущий эталонный показатель SMC сравниваются на рис. 3. можно заметить, что с точки зрения относительной проницаемости и поляризации насыщения листовая металл М600 имеет одни из лучших показателей. Относительная проницаемость рассматриваемого эталона SMC аналогична проницаемости сплава, но поляризация SMC при насыщении ( $J_s$ ) выше. Поляризация при насыщении этого эталона плавления составляет  $J_s = 1,55T$ .

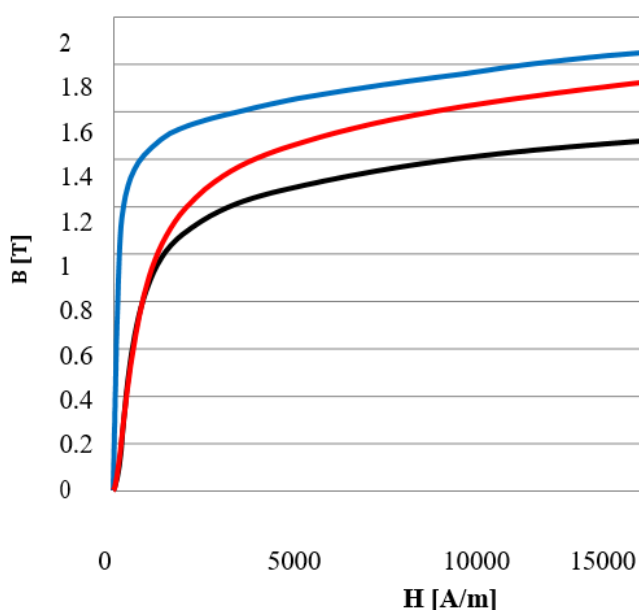


Рис. 3. Магнитные характеристики чугуна FGS 400-15 (черный цвет), магнитного листового металла М600(синий) и SMC 700 3Р(красный).

Использование чугуна также позволяет снизить потери на вихревые токи по сравнению с твердыми стальными деталями. Это связано с его более высоким удельным электрическим сопротивлением ( $\rho$  чугуна =  $0.5 \mu\Omega \cdot m$  в то время  $\rho$  стали =  $0.3 \mu\Omega \cdot m$ ).

#### **Проверка результатов 3D-модели расчета методом конечных элементов**

Программное обеспечение, выбранное для анализа структур в 3D – это JMAG. Это исследование возбудителя с зубцами было нашим первым использованием электромагнитного 3D-инструмента конечных элементов. Первым шагом является проверка результатов расчетов методом конечных элементов путем сравнения их с результатами испытаний макета чугунного возбудителя. Изображение макета приведено на рисунке 4.



Рис. 4. Макет возбудителя с зубцами

Проверка 3D-модели EF выполняется для нескольких режимов:

- Работа без нагрузки
- Работа при коротком замыкании
- Работа с проточным выпрямителем на однофазной нагрузке
- Работа с проточным выпрямителем на обмотке Ротора главного генератора

Все моделирование было выполнено с помощью магнитопереходного анализа в 3D-инструменте с моделью конечных элементов, подключенной к электрической цепи. В модели конечных элементов головки катушек якоря не были показаны. Питание индуктора осуществляется от источника тока. Обмотка якоря подключена к трехфазной резистивной нагрузке, значение которой представляет собой разомкнутую цепь ( $R = \infty$ ) или короткое замыкание ( $R = 0$ ). Для режимов работы с выпрямительным мостом мы решили использовать идеальные диоды. Роторная обмотка главного генератора представлена сопротивлением, что позволяет обеспечить быструю сходимость расчетов[6-8].

Производительность без нагрузки ( $R = \infty$ )

На рисунке 5 показаны эффективные значения составных напряжений как функции тока возбуждения в индукторе для испытаний и трехмерной модели конечных элементов.

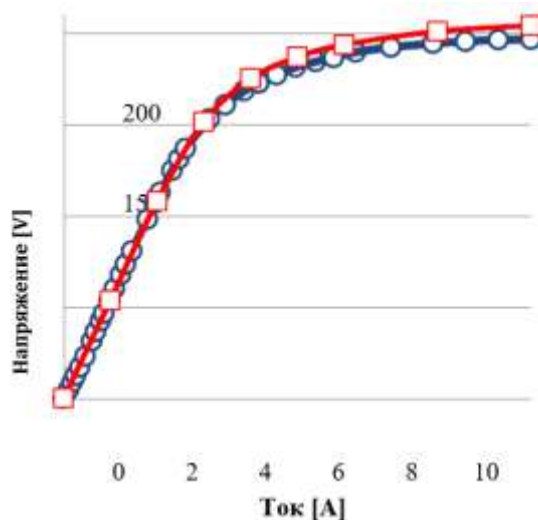


Рис. 5. Кривая без нагрузки (испытания красный, 3-d модель синяя)

Сравнение на линии воздушного зазора, линейной части кривой без нагрузки, является удовлетворительным. Когда мы находимся в нелинейной зоне, результаты моделирования находятся выше кривой, полученной в результате испытаний. Рисунок 6 позволяет сравнивать формы сигналов напряжения холостого хода как функцию времени. Мы используем два уровня тока возбуждения  $I_{exc} = 1\text{ A}$  (находится справа от воздушного зазора) и  $I_{exc} = 5\text{ A}$  (находится в зоне насыщения).

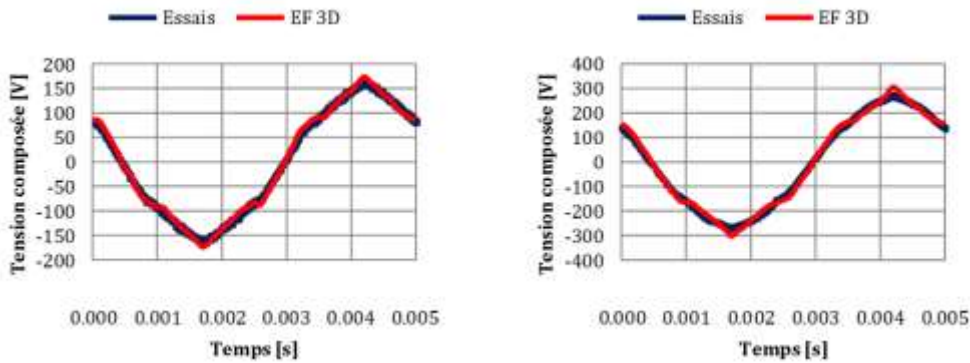


Рис. 6. Формы сигналов напряжения холостого хода

Характеристики при коротком замыкании ( $R = 0$ ) На этот раз сравнения проводятся по току в обмотке. На рисунке 7 показана эволюция эффективных значений тока якоря в зависимости от тока возбуждения в индукторе.

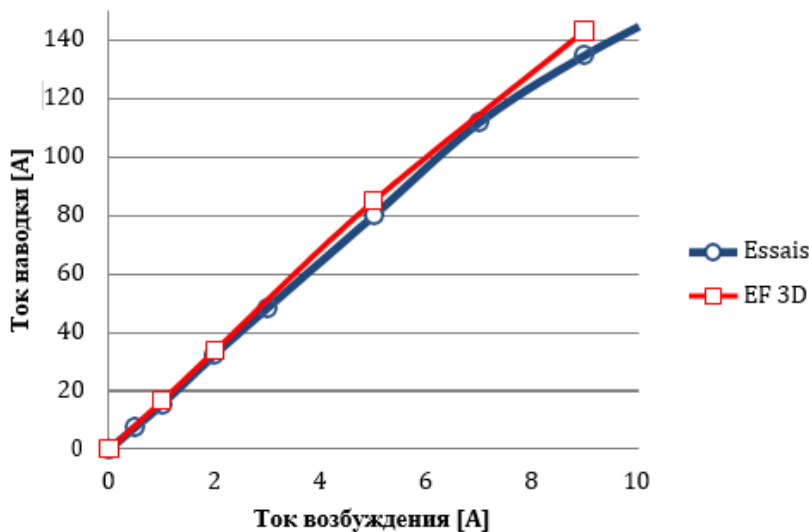


Рис. 7. Характеристика при коротком замыкании

Результаты близки к испытаниям, несмотря на отклонение при токе возбуждения при 9 А. Что касается форм сигналов тока якоря как функции времени, сравнения для двух уровней тока возбуждения (см. рисунок 8) также показывают хорошие результаты.

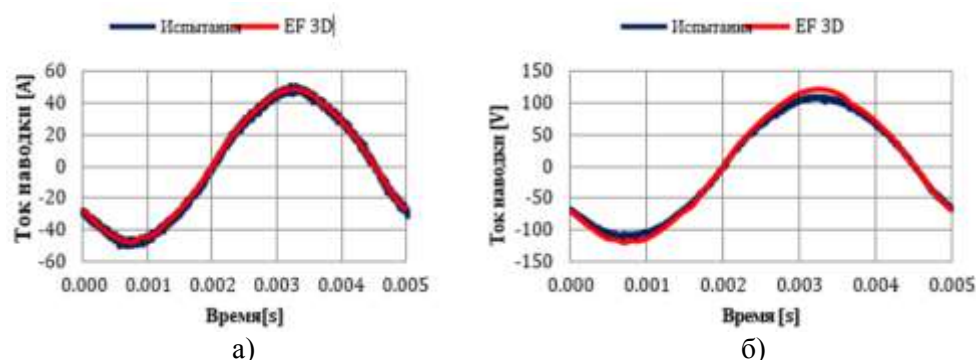


Рис. 8. Форма волны тока якоря при коротком замыкании для двух уровней тока возбуждения: (а) в линейной области  $I_{exc} = 2 \text{ A}$  и (б) в нелинейной области  $I_{exc} = 5 \text{ A}$ .

Производительность с выпрямительным мостом и однофазной нагрузкой. В этом случае обмотка якоря соединена с идеальным мостовым выпрямителем, который питает однофазную нагрузку[9]. Мы получаем среднее значение тока, протекающего через нагрузку. Мы построили кривую возбуждения для двух значений нагрузки,  $R = 9,5 \text{ ом}$  (рис. 9 (А)) и  $R = 14,5 \text{ ом}$  (рис. 9 (Б)). Результаты приемлемые.

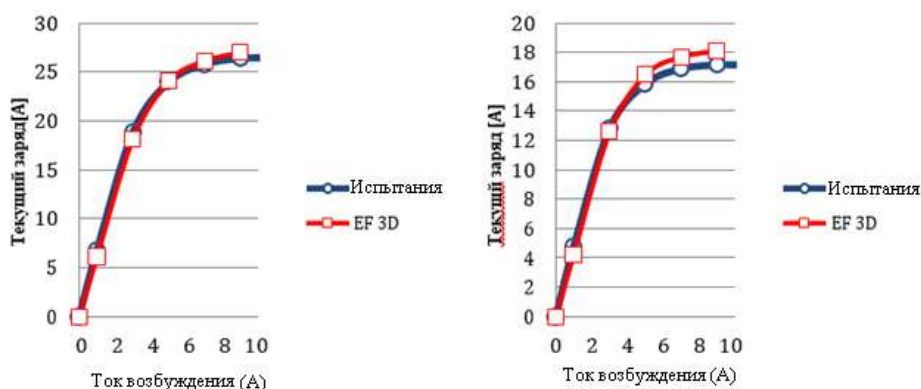


Рис. 9. Характеристики нагрузки возбудителя: испытание под нагрузкой с диодным мостом  $R = 9,5 \text{ ом}$  (а) испытание под нагрузкой с диодным мостом  $R = 14,5 \text{ ом}$  (б)

Характеристики с выпрямительным мостом, питающим обмотку ротора главного генератора.

Обмотка якоря соединена с диодным мостом и обмоткой главного генератора. В таблице 2 указаны отклонения в токе ротора между испытаниями и расчетами методом конечных элементов для двух точек измерения[10].

Таблица 2

Сравнение токов ротора между испытаниями и 3D-моделью для двух точек измерения.

	$I_{exc} = 9.6 \text{ A}$ Ток ротора [a]	$I_{exc} = 12 \text{ A}$ Ток ротора [a]
Испытания	139.8	145.4
EF 3D	144.9	151.6
Разница	3.6%	4.3%

### **Вывод**

Полученные при помощи исследования результаты позволяют установить хорошую согласованность готовой элементной модели с результатами испытаний. Таким образом, мы можем использовать их в качестве эталонного примера для изучения возможных улучшений в последующих исследованиях для получения более результативных значений. При использовании данных результатов в проектировании моделей могут быть достигнуты значения, более удовлетворяющие требованиям надежности, безотказности, повышенный КПД и др.

### **Список литературы**

1. Ю. Ван И З. Дэн, "Гибридные топологии возбуждения и стратегии управления статорными машинами с постоянными магнитами для систем питания постоянного тока". Труды IEEE по промышленной электронике том 59, № 12, стр. 4601-4616, декабрь 2012.
2. А. Тессароло, "Моделирование и анализ синхронных реактивных машин с круговыми барьерами потока посредством конформного отображения". IEEE Transactions on Magnetics, том 51, № 4, стр. 1-11, апрель 2015.
3. Г. Нейдхофер, "Эволюция синхронной машины". Журнал инженерных наук и образования, том 1, № 5, стр. 239-248, октябрь 1992.
4. О. Малоберти и др., "3-D–2-D динамическое магнитное моделирование двигателя с постоянным магнитом с осевым потоком с мягкими магнитными композитами для гибридных электромобилей". IEEE Transactions on Magnetics, том 50, № 6, стр. 1-11, июнь 2014.
5. Сахаров В.В., Чертков А.А., Сабуров С.В. Предиктивное апериодическое управление динамическими объектами на водном транспорте с использованием математического программирования. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2016. № 5 (39). С. 206-214.
6. Д. К. Людуа, Дж. К. Рид и К. Хансон, "Емкостная передача мощности для тока возбуждения ротора в синхронных машинах". IEEE Transactions on Power Electronics, том 27, № 11, стр. 4638-4645, ноябрь 2012.
7. Й. Колемайнен, "Синхронный реактивный двигатель с ротором, заблокированным формой". IEEE Transactions on Energy Conversion, том 25, № 2, стр. 450-456, июнь 2010.
8. А. М. Найт, Р. Э. Бетц и Д. Г. Доррелл, "Проектирование и анализ бесщеточных реактивных машин с двойным питанием". IEEE Transactions on Industry Applications, том 49, № 1, стр. 50-58, январь- февраль 2013.
9. А. Г. Джек и др., "Машины с постоянными магнитами с сердечниками из порошкового железа и предварительно спрессованными обмотками". IEEE Transactions on Industry Applications, том 36, № 4, стр. 1077-1084, июль/август 2000.
10. П. Чжан, Г. Ю. Сизов, Д. М. Ионель и Н. А. О. Демердаш, "Установление относительных достоинств машин с постоянными магнитами внутреннего и спицевого типа с ферритом или NdFeB путем систематической оптимизации конструкции". IEEE Transactions on Industry Applications, том 51, № 4, стр. 2940-2948, июль-август 2015.

### **References**

1. Y. Wang and Z. Deng, "Hybrid Excitation Topologies and Control Strategies of Stator Permanent Magnet Machines for DC Power System". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 12, pp. 4601-4616, Dec. 2012.
2. Tassarolo, "Modeling and Analysis of Synchronous Reluctance Machines With Circular Flux Barriers Through Conformal Mapping". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 4, pp. 1-11, April 2015.
3. G. Neidhofer, "The evolution of a synchronous machine". Journal of Engineering Sciences and Education, Volume 1, No. 5, pp. 239-248, October 1992.



4. O. Maloberti et al., "3-D-2-D dynamic magnetic simulation of a permanent magnet axial flow engine with soft magnetic composites for hybrid electric vehicles". IEEE Transactions on Magnetics, Volume 50, No. 6, pp. 1-11, June 2014.
5. Sakharov V.V., Chertkov A.A., Saburov S.V. Predictive aperiodic control of dynamic objects on water transport using mathematical programming. // Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet. 2016.No. 5 (39). pp. 206-214.
6. D. K. Ludua, J. K. Reed and K. Hanson, "Capacitive power transmission for rotor excitation current in synchronous machines". IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 27, No. 11, pp. 4638-4645, November 2012.
7. J. Kolehmainen, "Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 450-456, June 2010
8. M. Knight, R. E. Betz and D. G. Dorrell, "Design and Analysis of Brushless Doubly Fed Reluctance Machines". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 1, pp. 50-58, Jan.- Feb. 2013.
9. G. Jack et al., "Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 4, pp. 1077-1084, Jul/Aug 2000.
10. P. Zhang, G. Y. Sizov, D. M. Ionel and N. A. O. Demerdash, "Establishing the relative merits of machines with permanent magnets of internal and spoke type with ferrite or NdFeB by systematic design optimization." IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 51, No. 4, pp. 2940-2948, July-August 2015.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

##### **Титов Иван Леонидович**

К.т.н., доцент, заместитель декана по организационно-воспитательной работе, Керченский государственный морской технологический университет 298309, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, vanya-titov-1993@mail.ru

##### **Ivan L. Titov**

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, associate dean for organizational and educational work, Kerch State Maritime Technological University 298309, Kerch, Ordzhonikidze str., 82, vanya-titov-1993@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 02.05.2023; published online 20.06.2023.