

УДК 519.6. 621.313.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.011](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.011)

Математическое моделирование и программная оптимизация электрических машин промышленных комплексов

А.А. Агапов, Ю.М. Крылов, В.Л. Бурковский

*Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Российская Федерация*

Резюме. Исследование новых типов электрических машин с улучшенными электромеханическими характеристиками требует проведения огромного количества вычислений, при этом анализ оптимального соотношения тех или иных параметров является многокритериальной задачей, не всегда имеющей единственно верное решение, удовлетворяющее всем поставленным задачам. Сравнительно недавнее появление и применение в исполнительных механизмах новых типов электрических машин малых габаритов на основе обмоток со сложной геометрией активной части исключает возможность классического плоскостного моделирования, однако трехмерное моделирование требует значительных вычислительных и временных ресурсов. В связи с этим данное исследование посвящено анализу возможности применения дискретного моделирования сложных объектов с возможностью оптимизации свойств исследуемого объекта. В ходе исследования был проведен анализ конструктивного исполнения объекта моделирования с последующим формированием массива дискретных моделей. Формирование подобного типа моделирования было обосновано, исходя из условия отсутствия резких структурных и конструктивных изменений исследуемого объекта. Моделирование проводилось в среде ANSYS путем формирования скрипт-файла на языке APDL. Результаты исследования демонстрируют возможность проведения такого рода моделирования применительно к бесконтактным двигателям постоянного тока с ромбовидной обмоткой с возможностью оптимизации по определенному критерию. Хотя представленная модель имеет ряд допущений и пока полностью не способна заменить трехмерное моделирование, материалы статьи представляют практическую ценность для разработчиков программного обеспечения, направленного на анализ физического состояния электрических машин.

Ключевые слова: БДПТ, ромбовидная обмотка, дискретное моделирование, трехмерное моделирование, APDL.

Для цитирования: Агапов А.А., Крылов Ю.М., Бурковский В.Л. Математическое моделирование и программная оптимизация электрических машин промышленных комплексов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=897> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.011

Mathematical modeling and software optimization of electric machines of industrial complexes

A.A. Agapov, Y.M. Krylov, V.L. Burkovsky

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Abstract: The study of new types of electric machines with improved electromechanical characteristics requires an enormous amount of calculations. By contrast, the analysis of the optimal ratio of selected parameters is a multi-criteria task, which does not always have the only correct solution that satisfies all the tasks set. The relatively recent appearance and application in actuators of new types of small-sized

electric machines based on windings with the complex geometry of the active part exclude the possibility of classical planar modeling. Alongside, three-dimensional modeling requires significant computational and time resources. In this regard, this study is devoted to the analysis of the possibility of using discrete modeling of complex objects with the possibility of optimizing the properties of the object under study. During the study, an analysis of the structural design of the modeling object was carried out, followed by the formation of an array of discrete models. The formation of this type of modeling was justified based on the condition of the absence of sharp structural and structural changes in the object under study. The simulation was performed in the ANSYS environment by generating a script file in the APDL language. Study results demonstrate the possibility of carrying out this kind of modeling relating to the rhomboid brushless direct current motor with the possibility of optimization according to a certain criterion. Although the presented model has several assumptions and is not yet fully capable of replacing three-dimensional modeling, the article materials are of practical value for software developers aimed at analyzing the physical state of electrical machines.

Keywords: BLDC, winding, diamond shape, discrete modeling, three-dimensional modeling, APDL.

For citation: Agapov A.A., Krylov Y.M., Burkovsky V.L. Mathematical modeling and software optimization of electric machines of industrial complexes. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=897> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.011 (In Russ).

Введение (Introduction)

Процесс проектирования электрической машины (ЭМ) на сегодняшний день является довольно сложной задачей. Инженеру-конструктору необходимо учитывать множество факторов, которые в последствии повлияют на работу всей системы [1].

В свою очередь программное моделирование позволяет предсказать многие параметры будущей машины с достаточной точностью. При этом довольно остро стоит проблема программной оптимизации [2]. Неотъемлемым инструментом в руках проектировщика ЭМ на данный момент являются всевозможные системы анализа электромагнитного состояния объекта на основе метода конечных элементов (МКЭ). Данный метод решения задач отлично зарекомендовал себя для анализа теплового и механического анализа исследуемых объектов [3, 4].

Однако, несмотря на огромный функционал представленных сегодня на рынке программных комплексов, можно выявить один общий недостаток, а именно, время расчета. При постановке трехмерной задачи с достаточной степенью точности может занять многие часы (в зависимости от вычислительных мощностей компьютера, на котором производится решение), а время, в условиях современных реалий, весьма ограничено. Использование программной среды для моделирования самых разнообразных сценариев работы ЭМ – самый лучший способ оптимизации уже имеющейся машины или же абсолютно новой разработки. Однако зачастую пространственное распределение тех или иных конструктивных элементов ЭМ не позволяют проводить оптимизацию при плоской постановке задачи с использованием трансляции свойств, а, как упоминалось ранее, решение трехмерных задач занимает в разы большее время [5]. Решением может стать сегментированное пространственное моделирование с частичной трансляцией свойств на конечном участке длины машины, которое позволяет преобразовать трехмерную модель в массив плоских с некоторыми допущениями, что, в конечном итоге, позволит получить информацию об объекте с сложным пространственным расположением тех или иных конструктивных элементов.

Основной целью данной работы является программная оптимизация бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ) на основе постоянного редкоземельного магнита с ромбовидной обмоткой. При этом ставится задача с помощью

скриптового языка APDL создать скрипт-файл для расчета данного БДПТ с учетом особенностей его конструкции.

Рассматриваемый способ решения задачи анализа состояния объекта ранее не применялся ввиду относительно недавнего появления сложносконструированных обмоток (ромбовидного или стреловидного типа) [6, 7]. При этом формирование задачи с помощью языка сценариев (APDL) открывает дополнительные возможности для разработчиков программного обеспечения (ПО), направленного на изучение состояния объектов вариативной геометрии.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Как известно, все физические поля, к которым также относятся и электромагнитной имеют пространственное распространение [8]. С точки зрения моделирования состояние объекта с приемлемым уровнем точности можно описать приведя трехмерную модель к плоскому виду. Наилучшим способом анализа состояния объекта в последнее время является МКЭ. Рассматривая задачу с точки зрения вычислительной математики, основная идея МКЭ сводится к минимизация функционала вариационной задачи на определенной совокупности функций, который в ограничены определенной областью. Таким образом сокращение указанных областей способствует снижению объема вычислений. При этом формирование целостной картины физического состояния объекта производится путем трансляции свойств плоской модели [9]. Данный принцип наилучшим образом подходит при моделировании ЭМ ввиду их конструктивных особенностей. При сложном пространственном распределении данный метод недопустим в классической формулировке ввиду нарушения основного принципа трансляционного решения задачи – постоянство физических и позиционных свойств объекта по вектору трансляции. Особый интерес в данном случае представляет дискретная трансляция модели на конечном участке длины. Исследуя конструктивные исполнения различных типов ЭМ в том числе и БДПТ довольно сложных, а иногда и вовсе уникальных конструкций можно сделать вывод о том, что позиционные изменения однотипных элементов конструкции, оказывающих влияние на физическое состояние объекта, происходит без резких изменений. Из данного утверждения следует, что моделирование сложного объекта можно производить при плоской постановке задачи на некотором малом участке вектора трансляции. При этом для полного представления о состоянии объекта необходимо формирование единого трансляционного массива данных по всем дискретным моделям.

В качестве объекта исследования был выбран БДПТ с ромбовидной обмоткой и индуктором на основе постоянного магнита, трехмерная модель и поперечная геометрия магнитной системы в центральном сечении которого представлена на Рисунке 1.

Стоит отметить, что дискретная модель по своей сути является набором плоских моделей, условно сохраняющих свое постоянство в пределах некой малой конечной длины.

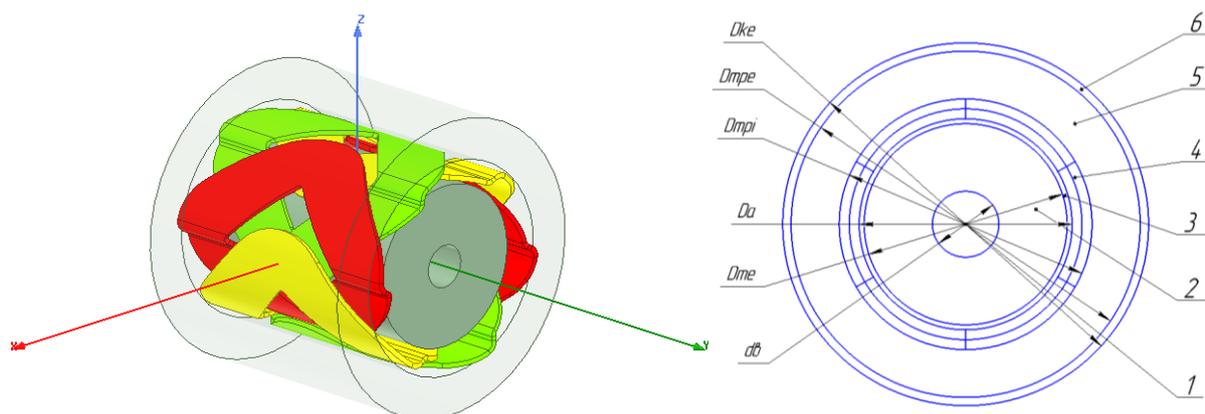


Рисунок 1 – Трехмерная модель и поперечная геометрия магнитной системы в центральном сечении
 Figure 1 – Three-dimensional model and transverse geometry of the magnetic system in the central section

Построение дискретной модели проводилось на основе геометрии центрального сечения путем плоскостного сечения трехмерной модели. В дальнейшем от центрального сечения к торцу машины через равные расстояния были взяты еще 6 сечений, в результате чего была получена множественная дискретная модель в состав которой вошло 7 частичных дискретных моделей.

На Рисунке 2 показаны частичные дискретные модели, взятые от центрального сечения (сечение №0, представленное на Рисунке 1) к торцу машины в порядке возрастания порядкового номера.

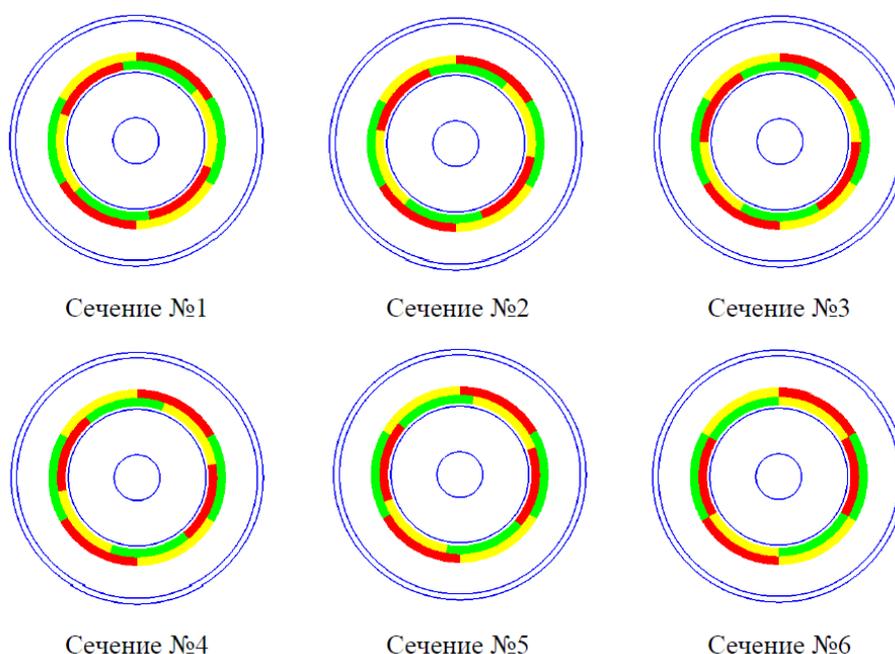


Рисунок 2 – Сечения дискретной модели
 Figure 2 – Cross sections of the discrete model

Данный тип ЭМ ввиду малых массогабаритных показателей и высокой степени надежности нашел применение в самых разнообразных приводах и роботизированных системах. При этом вопрос оптимизации в части выбора необходимого типа индуктора стоит довольно остро, т.к. данный элемент конструкции БДПТ напрямую влияет на все основные показатели ЭМ, такие как частота вращения, развиваемый момент и др.

С точки зрения конструктивного исполнения представленной машины применение дискретного моделирования наиболее рационально ввиду вариативности позиционных свойств только одного элемента модели, а именно обмотки, что позволяет упростить задачу формирования массива переменных данных.

В качестве основного вида машины следует рассматривать поперечную геометрию, представленную выше. Именно на ее основе в дальнейшем и производилась оптимизация электродвигателя.

Для удобства размеры исследуемого электродвигателя (с указанием позиций основных структурных элементов согласно Рисунку 1) сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – Основные размеры электродвигателя
 Table 1 - Main dimensions of the electric motor

Поз.	Наименование величины, единица измерения	Обозначение	Значение величины
1	Диаметр вала в центральной части, мм	d_v	4
2	Диаметр индуктора (магнита), мм	D_{me}	12
3	Величина воздушного зазора между статором и ротором (односторонняя), мм	δ	0,5
4	Внутренний диаметр обмотки, мм	D_a	13
	Толщина обмоточного слоя, мм	δ_a	1,47
5	Внутренний диаметр магнитопровода, мм	D_{mpi}	15,5
	Внешний диаметр магнитопровода якоря, мм	D_{mpe}	21,0
6	Односторонняя толщина корпуса, мм	δ_k	0,5
	Внешний диаметр корпуса, мм	D_{ke}	22,0
–	Активная длина машины, мм	l_δ	20,0

Оптимизация параметров исследуемой ЭМ по большей части направлена на выявление наилучшей, с точки зрения применяемых материалов, конструкции магнитной системы. Однако варьировать все материалы модели в данном случае нецелесообразно т.к., к примеру, влияние конструктивных аустенитных сталей (вал и корпус машины) на параметры магнитной системы – незначительны. При этом, в случае варьирования в задаче более одного параметра, задача становится многокритериальной, что в разы затруднит поиск оптимального очевидного решения.

В связи с выше сказанным было принято решение провести комплексный анализ магнитной системы БДПТ с использованием различного рода магнитов. В качестве материалов были использованы сплавы на основе редкоземельных металлов, таких как самарий и неодим. В качестве данных для расчета были взяты различные типы магнитов, параметры которых представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Параметры магнитов
Table 2 – Parameters of the magnets

Наименование	Величина остаточной индукции, Тл	Коэрцитивная сила, кА/м
НмБ 220/80	1,12	800
НмБ 250/80	1,22	800
НмБ 290/80	1,29	800
НмБ 320/88	1,34	800
НмБ 380/100	1,13	1000
КС37А	0,82	1000
КС25ДЦ-150	0,90	900
КС25ДЦ-240	1,10	900

Примечание – Параметры магнитов указаны с учетом нормативной документации на данные магнитные материалы, применяющейся в РФ [10], [11].

Моделирование производилось на основе скриптового языка APDL (ANSYS Parametric Design Language). Данный язык относится к языкам параметрического программирования сценариев, который позволяет оптимизировать расчеты в среде ANSYS через определенные параметры (переменные). Такого рода скриптовый (сценарный) язык является основой для решения сложных задач в рамках оптимизационных расчетов с возможностью адаптивного построения сетки элементов, что позволяет в значительной степени сократить расчеты сложных объектов.

Для обеспечения динамического перестроения модели необходимо привести уравнения, отвечающие за формирование геометрии, к параметрическому виду. Первоначально создаем массив данных, в котором будут храниться данные расчетов в зависимости от изменения геометрии (программный код представлен на Рисунке 3).

```
count_key=6
*dim, xxx, table, count_key+1
*dim, yyy, table, count_key+1
```

Рисунок 3 – Программный код динамического перестроения модели
Figure 3 – Program code for dynamic model rebuilding

После чего переходим к созданию цикла для построения геометрии. Так же на данном этапе определяется угол на который будет смещать обмотка при изменении геометрии (программный код представлен на Рисунке 4).

```
*Do, ugol_1, 0, count_key, 1
  /prep7
  ugol=ugol_1*60/count_key*2
```

Рисунок 4 – Программный код создания цикла перестроения
Figure 4 – Program code for creating a rebuild cycle

Отдельно стоит отметить блок создания изменяемой геометрии обмотки, позволяющий реализовать динамическое перестроение геометрии модели (программный код представлен на Рисунке 5).

```
pcirc, r3, r4, 0+ugol, 60+ugol
pcirc, r3, r4, 60+ugol, 120+ugol
pcirc, r3, r4, 120+ugol, 180+ugol
pcirc, r3, r4, 180+ugol, 240+ugol
pcirc, r3, r4, 240+ugol, 300+ugol
pcirc, r3, r4, 300+ugol, 360+ugol
pcirc, r4, r5, 0-ugol, 60-ugol
pcirc, r4, r5, 60-ugol, 120-ugol
pcirc, r4, r5, 120-ugol, 180-ugol
pcirc, r4, r5, 180-ugol, 240-ugol
pcirc, r4, r5, 240-ugol, 300-ugol
pcirc, r4, r5, 300-ugol, 360-ugol
allsel
aovlap, all
```

Рисунок 5 – Программный код создания изменяемой геометрии
 Figure 5 – Program code for creating a variable geometry

Важно отметить что расчет должен производиться в пределах одного скрипт-файла, с целью исключения ошибок при переносе данных и сокращении времени расчета. Формирование скрипт-файла производилось с условием использования подпрограммы-счетчика, обеспечивающей возможность проведения циклических расчетов. Именно данная подпрограмма позволила реализовать циклические вычисления с учетом итерационной переписи задачи с формированием массива данных о результатах вычислений в пределах каждой итерации

Результаты (Results)

Оптимизация КЭ-модели в данном случае производилась путем отыскания наилучших показателей момента при использовании различных магнитов в качестве индуктора. В результате было просчитано 8 вариантов конструкций с различными типами магнитов, после чего были получены результаты, приведенные в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты оптимизации
 Table 3 – Results of the optimization

Наименование магнита индуктора	Момент, Н·м
НмБ 220/80	0,006
НмБ 250/80	0,007
НмБ 290/80	0,0071
НмБ 320/88	0,0072
НмБ 380/100	0,0073
КС37А	0,0062
КС25ДЦ-150	0,0056
КС25ДЦ-240	0,006

Наилучшие результаты, как и ожидалось, получены при использовании магнита НмБ380/100 ввиду того, что данный магнит является самый мощным среди представленных.

Обсуждение (Discussion)

Особую роль при дискретном моделировании занимает вопрос выбора числа сечений модели. На Рисунке 6 показан график момента в зависимости от участка катушки.

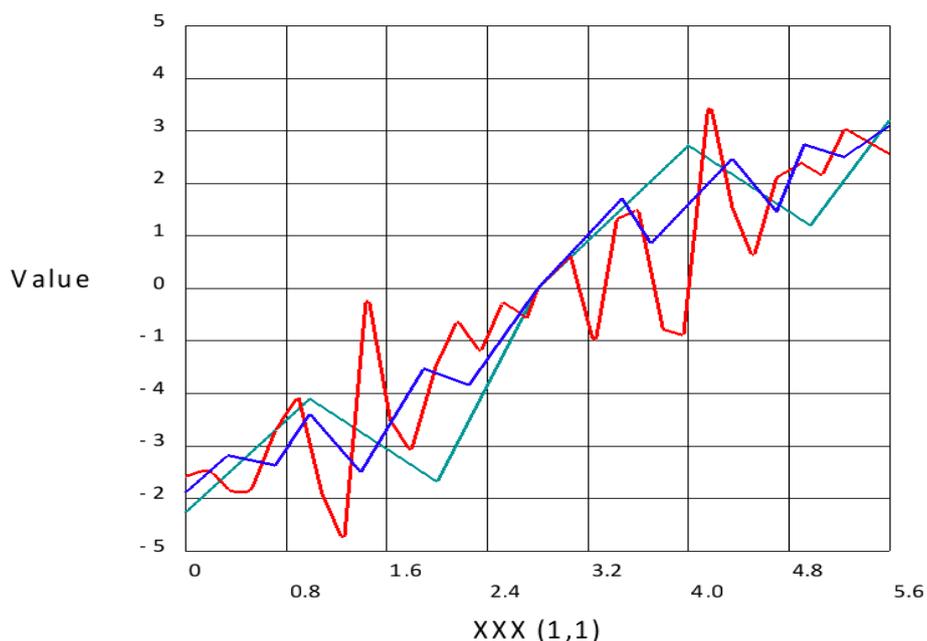


Рисунок 6 – График момента в зависимости от участка катушки
 Figure 6 – Plot of the moment depending on the coil section

При использовании дискретных моделей между ними отсутствует связь, в результате чего может появиться погрешность. На представленном выше Рисунке довольно ярко наблюдается тенденция к увеличению погрешности в зависимости от степени дискретизации модели (зеленый график – 6 дискретных моделей, синий график – 14 дискретных моделей, красный график – 30 дискретных моделей). Стоит отметить, что изменение знака момента (на графике «Value») может быть обусловлено типом коммутации. Однако величина рассчитанного суммарного момента находится в ожидаемых пределах, что подтверждает достаточную степень точности используемой модели. В свою очередь формирование межмодельных дискретных связей в каждом отдельном случае требует своеобразного подхода, а формирование такого рода сложных зависимостей, к примеру, на этапе предварительной проработки конструкции ЭМ не всегда оправдано.

Заключение (Conclusion)

В данной работе было произведено исследование БДПТ с ромбовидной обмоткой на основе постоянных редкоземельных магнитов. Расчет проводился при помощи

дискретной модели, ввиду особой сложности построения трехмерной параметризованной модели при помощи скриптового языка APDL.

Результаты проведенного исследования показали, что наилучшие показатели момента достигаются при использовании в качестве индуктора магнита НмБ 380/100.

По результатам оптимизации конструкции электродвигателя были получены значения моментов при использовании различных магнитов. Так же был проанализирован график изменения момента в зависимости от участка катушки, который показал изменение знака момента в зависимости от исследуемого участка.

В ходе работы было подтверждено высказывание о том, что в случае использования дискретных моделей отсутствие связи между отдельными частями может привести к возникновению погрешности, что подтвердилось при увеличении шага дискретизации.

По итогам проведенной работы можно заключить, что несмотря на некую погрешность модель имеет достаточный уровень точности и применима к расчетам сложных конструкций электрических машин

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. *Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов*, 2019:11-21
2. Chari M.V., Silvester P. *Analysis of turboalternator magnetic field by finite element*, IEEE Trans. PAS., 1971;90(2):970-976
3. Буль О.Б. *Компьютерные программы расчета и анализа магнитных систем*, Электротехника, 2006;12:50-55
4. Wilson E.L., Nickell R.E. *Application of the Finite Element Method to Heat Conduction Analysis*, Nuclear Engineering and Design, 1966;4:276-286
5. Агапов А.А. Черных Т.Е. *Использование САПР для создания компьютерных моделей обмоток электрических машин*, Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века, 2016:15-18
6. Рорер Р., Шульц Е., Хофер Р., Фон Мос-Вёрль А., Гауль М., Миттербек П., Майер Й. *Электрический двигатель с многослойными ромбовидными обмотками*, Патент Рос. Федерация № 2006137171/09, 2009.
7. Агапов А.А., Богусhev В.И., Борисова А.И., Ильяков В.С. *Бесконтактный электродвигатель постоянного тока*, Патент Рос. Федерация №2016145784, 2017.
8. Сильвестр П., Феррари Р. *Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков*, 1986.
9. Копылов И.П., Амбарцумова Т.Т. *Развитие методов и средств макро моделирования электрических машин*, 2007;9:19-24
10. *ГОСТ 21559-76 Материалы магнитотвердые спеченные. Марки*, 1976.
11. *ГОСТ Р 52956-2008 Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры*, 2008.

REFERENCES

1. Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klovov B.K. *Design of electric machines: Textbook for universities*, 2019:11-21
2. Chari M.V., Silvester P. *Analysis of turboalternator magnetic field by finite element*, IEEE Trans. PAS., 1971;90(2):970-976
3. Bul O.B. *Computer programs for calculating and analyzing magnetic systems*, Electrical Engineering, 2006;12:50-55

4. Wilson E.L., Nickell R.E. *Application of the Finite Element Method to Heat Conduction Analysis*, Nuclear Engineering and Design, 1966;4:276-286
5. Agapov A.A. Chernykh T.E. *The use of CAD for creating computer models of electric machine windings*, Applied problems of electromechanics, power engineering, electronics. Engineering ideas of the XXI century, 2016:15-18
6. Rohrer, R., Schulz, E., Hofer, R., Von Mos-Werl A., Gaul M., Mittelbach P., Meyer Th. *Electric motor with multi-layer diamond-shaped windings*, Patent Rus. Federation No. 2006137171/09, 2009.
7. Agapov A.A., Bogushev V.I., Borisova A.I., Ilyakov V.S. *Brushless DC electric motor*, Patent Rus. Federation No. 2016145784, 2017.
8. Sylvester P., Ferrari R. *Finite element method for radio engineers and electrical engineers*, 1986.
9. Kopylov I.P., Ambartsumova T.T. *Development of methods and means of macromodeling of electric machines*, 2007;9:19-24
10. *GOST 21559-76 Sintered magnetic hard materials. Brands*, 1976.
11. *GOST R 52956-2008 Magnetic hard sintered materials based on the neodymium-iron-boron alloy. Classification. The main parameters*, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Агапов Александр Александрович, аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация
e-mail: alex0894080418@yandex.ru

Alexander A. Agapov, post-graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Крылов Юрий Михайлович, магистрант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация
e-mail: cryloff.yuri2018@yandex.ru

Yuri M. Krylov, master's student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Бурковский Виктор Леонидович, заведующий кафедрой электропривода, автоматизации и управления в технических системах, д.т.н., Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация
e-mail: bvl@vorstu.ru

Viktor L. Burkovsky, head of the department of electric drive, automation and control in technical systems, doctor of technical sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation