

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311.61

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54

СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «СОЗДАНИЕ СЕРИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ РОТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА МАЛОЙ МОЩНОСТИ»

Басенко В.Р., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vasiliybas123@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Задачи создания современных синхронных двигателей с постоянными магнитами требуют решения технических задач совместно с экономическими реалиями. Ввиду использования постоянных магнитов в конструкции синхронных двигателей их стоимость ограничивает их промышленное применение. Поэтому стоит актуальный вопрос оптимизации конструкции синхронных двигателей, которую можно решить путем изменения топологии. *ЦЕЛЬ.* Целью является создание более экономичных синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в электротранспорте малой мощности. Планируется реализовать способ новый способ конструирования СДПМ. Данное решение позволит уменьшить массо-габаритные параметры и увеличить удельную мощность, которые являются важными показателями для электротранспорта. *МЕТОДЫ.* Для модернизации современных синхронных двигателей предлагается метод комплексной топологической оптимизации на основе генетического алгоритма. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получена компьютерная модель в виде расчета электромагнитных полей в статоре и роторе синхронного двигателя с постоянными магнитами. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Моделирование параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами имеет малую степень разработанности в отечественном машиностроении ввиду отсутствия развитой инфраструктуры в области электрического транспорта малой мощности, создание отечественных разработок в данной области носит стратегический характер.

Ключевые слова: электротранспорт; синхронные двигатели с постоянными магнитами, компьютерная модель, комплексная топологическая оптимизация.

Благодарности: Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности», Договор №419ГССС15-L/78948 от 08.09.2022 совместно с «Фондом содействия инновациям».

Для цитирования: Басенко В.Р., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р. Создание компьютерной модели синхронного двигателя для реализации проекта «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 46-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54.

CREATING A COMPUTER MODEL OF A SYNCHRONOUS MOTOR FOR THE IMPLEMENTATION OF THE PROJECT «CREATION OF A SERIES OF ELECTRIC MOTORS WITH A MODERNIZED ROTOR FOR ELECTRIC TRANSPORT OF LOW POWER»

Basenko V.R., Petrov T.I., Ibragimova A.R.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The challenges of creating modern permanent magnet synchronous motors require solving technical problems in conjunction with economic realities. Due to the use of permanent magnets in the construction of synchronous motors, their cost limits their industrial application. Therefore, there is an urgent issue of optimizing the design of synchronous motors, which can be solved by changing the topology. *TARGET.* The goal is to create more economical permanent magnet synchronous motors (PMSMs) in low-power electric vehicles. It is planned to implement a new method for constructing PMSM. This solution will reduce weight and size parameters and increase specific power, which are important indicators for electric transport. *METHODS.* To modernize modern synchronous motors, a complex topological optimization method based on a genetic algorithm is proposed. *RESULTS.* A computer model was obtained in the form of calculation of electromagnetic fields in the stator and rotor of a synchronous motor with permanent magnets. *CONCLUSION.* Modeling the parameters of synchronous motors with permanent magnets has a low degree of development in the domestic mechanical engineering due to the lack of developed infrastructure in the field of low-power electric transport; the creation of domestic developments in this area is of a strategic nature.

Key words: electric transport; permanent magnet synchronous motors, computer model, complex topological optimization.

Acknowledgments: The article was published within the framework of the project “Creation of a series of electric motors with a modernized rotor for low-power electric vehicles”, Agreement No. 419ГССС15-Л/78948 dated 09/08/2022 together with the Innovation Promotion Fund.

For citation: Basenko V.R., Petrov T.I., Ibragimova A.R. Creating a computer model of a synchronous motor for the implementation of the project «Creation of a series of electric motors with a modernized rotor for electric transport of low power». *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 46-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54.

Введение (Introduction)

За последнее десятилетие все большую популярность приобрели синхронные машины с постоянными магнитами в виде зубцов (ТС СДПМ). Благодаря своим характеристикам СДПМ могут найти широкое применение в электротранспортных системах. Поэтому именно данный тип электрического двигателя выбран для реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности». СДПМ находят сегодня широкое применение в различных сферах промышленности, таких как робототехника, электротранспорт малой и средней мощности, автоматизированных системах электропривода. Двигатели типа СДПМ не имеют больших отличий от стандартных синхронных машин.

Научная значимость исследования состоит в использовании постоянных магнитов для создания поля вращающегося узла. Также особенностью данных типов двигателей является подключение к сети, которые не может быть прямым. Главными преимуществами данных двигателей являются:

- снижение времени конструкторских работ;
- уменьшение массо-габаритных характеристик;
- отсутствие механических узлов управления;
- низкое потребление электроэнергии.

Область применения СДПМ сегодня находится в диапазоне систем электропривода до 1МВт. СДПМ могут служить заменой двигателей постоянного тока на коллекторах, в определённых технологических условиях могут быть предпочтительнее асинхронных двигателей и с фазным, и с короткозамкнутым ротором.

Практическая значимость исследования заключается в представлении результатов реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности» было создано Общество с ограниченной ответственностью «ЛУННЫЙ ЦВЕТОК».

Научная значимость работы заключается в создании генетического алгоритма (ГА) для проведения комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ, который имеет представленную далее систему реализации:

- Определение начального (родительского) набора хромосом является случайным. Данный набор может быть разным, но при этом в наборе должна сохраняться четность.

- Алгоритм реализует процедуру скрещивания хромосом (родителей), в результате чего получается новый набор хромосом с новыми характеристиками.

- Из всех имеющихся наборов хромосом крутящего момента двигателя (М) в дальнейший расчет берется два максимальных значения момента. Отобранные хромосомы становятся следующими родительскими наборами.

- Проведение процедуры скрещивания и отбора хромосом с наибольшими значениями крутящего момента двигателя происходят до достижения целей работ, а именно, до определения значения необходимого крутящего момента. Соответственно, от начальной постановки задачи определения крутящего момента будет зависеть количество циклов проведения расчета генетического алгоритма.

Практическая значимость работы заключается в создании компьютерной модели синхронного двигателя с постоянными магнитами мощностью со следующими параметрами:

- 350 Вт, 48 В;
- КПД >75%;
- 40X40X30 см, 12.0 кг.;
- номинальная частота вращения: 450 об/мин;
- номинальная вращающий момент: 7 Н·м.
- номинальный ток загрузки 9,4 А.

Литературный обзор (Literature Review)

Повышение эффективности асинхронных двигателей среди всех типов электродвигателей является наиболее эффективной практикой, поскольку этот тип двигателей потребляет огромную часть всей энергии, поступающей в электродвигатели [1]. Обычно это достигается за счет оптимизации конструкции асинхронных двигателей, что приводит к ограниченному успеху. Альтернативным решением является замена асинхронных двигателей высокоэффективными двигателями с постоянными магнитами (ПМ), которые набирают популярность благодаря существенному снижению цен на постоянные магниты в последние годы. Однако для запуска двигателей с постоянными магнитами требуются инверторы, что неэкономично для многих односкоростных устройств, таких как большинство вентиляторов, насосов и компрессоров, составляющих более 70% применений электродвигателей [3]. Чтобы решить эту проблему, с 1955 года разрабатываются двигатели с постоянными магнитами, оборудованные клетку, так называемые синхронные двигатели с линейным пуском и постоянными магнитами (LS-PMS) [8]. Однако отсутствие постоянных магнитов высокой энергии в прошлом и их высокая цена в дальнейшем помешали широкому использованию двигателей LS-PMS. В последние годы внедрение материалов с постоянными магнитами высокой энергии по разумным ценам проложило путь для двигателей LS-PMS.

Применение СДПМ сегодня является актуальным благодаря их техническим характеристикам. Но высокая стоимость материалов не позволяет в полной мере реализовать все технические возможности данного типа синхронных двигателей. Самым дорогим материалом СДПМ сегодня являются постоянные магниты. Решить данную проблему сегодня можно путем комплексной топологической оптимизации (КТО) конструкции. Методы КТО позволяет оптимизировать конструкцию двигателя с сохранением его технических характеристик, главными из которых являются прочностные, тепловые и электромагнитные характеристики СДПМ. Предлагается использовать современные методы КТО для решения проблемы высокой стоимостью материалов, используемых для изготовления СДПМ [1,2].

Анализ работ современных исследователей [3,4,5] показывает наличие проблемы в области проведения комплексной топологической оптимизации СДПМ, ведь проводя данную процедуру необходимо учитывать электромагнитные, прочностные, тепловые процессы при изменении конструкции двигателя. Также данные процессы коррелируются с конструкцией электротранспорта, в котором применяется тот или иной двигатель.

Существующие методы КТО основаны сегодня на преобразовании конструкции двигателя путем распределения материалов. В частности, если необходимо оптимизировать электромагнитные характеристики двигателя, [1,6,7].

Решение вышеописанной проблемы, анализируя работы авторов [9,10,11] состоит в 3 аспектах:

1. Снижение стоимости конструкции СДПМ за счет изменение параметров используемых постоянных магнитов [12], а именно:

- снижение массы магнитов с сохранением электромагнитных характеристик двигателя с помощью КТО;

- сохранение массы магнитов с улучшением электромагнитных характеристик за счет проведения КТО.

2. Переход от дорогих постоянных магнитов к ферритовым (более низкие энергетические характеристики, но стоимость на 50% меньше). Оптимальное расположение ферритовых магнитов также необходимо определить при помощи комплексная топологическая оптимизация конструкции СДПМ.

3. Оптимизировать конструкцию статора, а именно пазов, с целью оптимального использования токопроводящего материала, и снижения влияния гармонических колебаний.

Материалы и методы (Materials and methods)

Материалы и методы комплексной топологической оптимизации для создания электродвигателя с модернизированным ротором

Решение вопросов оптимизации конструкции электротехнических систем, в частности синхронных двигателей с постоянными магнитами, решаются за счет систем автоматизированного проектирования [1,3,4]. Для эффективной работы таких систем применяются расчетные алгоритмы. Наиболее актуальным и эффективным алгоритмом проведения комплексной топологической оптимизации ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами является генетический алгоритм (ГА). [1,9].

Пример ГА показан на рисунке 1. В этом случае хромосомы для следующего поколения были родительским № 2 и дочерним № 1.

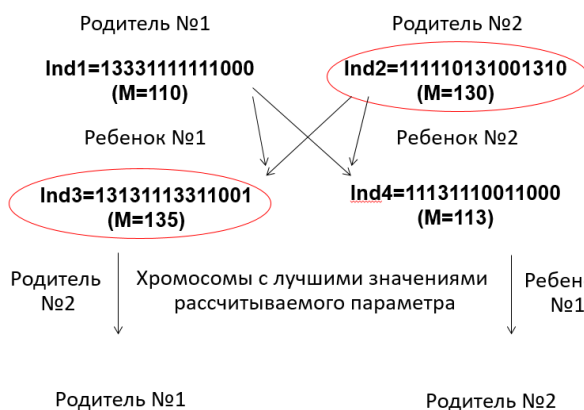


Рис. 1. Схема проведения ГА

Fig.1. Scheme of the GA

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Генетический алгоритм, представленный на рисунке 1, является стандартным для такого типа задач. Для проведения КТО ротора СДПМ его необходимо модернизировать. Главным элементом модернизации представленного ГА будет являться элемент окончания проведения ГА, который осуществляется за счет достижения необходимого значения крутящего момента СДПМ на одной из рассматриваемых хромосом.

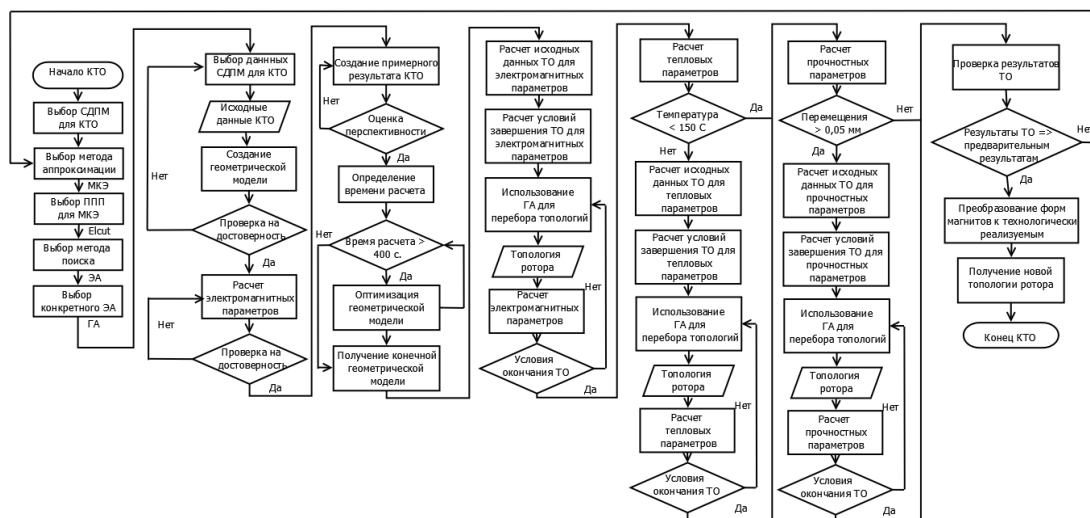


Рис. 2. Генетический алгоритм оптимизации конструкции ротора

Fig. 2. Genetic algorithm for rotor design optimization

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Также рассматриваемой целевой функцией здесь будет служить количество материала постоянных магнитов в статоре СДПМ, что дает возможность снизить объем материала магнитов для снижения себестоимости разрабатываемого электродвигателя.

Результаты (Results)

Результаты реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности»

Для реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности» было создано Общество с ограниченной ответственностью «ЛУННЫЙ ЦВЕТОК». 21.09.2022 зарегистрировано Общество с ограниченной ответственностью «ЛУННЫЙ ЦВЕТОК», имеющее следующие выходные данные:

Общество с ограниченной ответственностью «ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ЛУННЫЙ ЦВЕТОК».

Данное юридическое лицо ориентировано на предоставление услуг потенциальным заказчикам по конструированию и топологической оптимизации СДПМ. Заключение договора о поставке комплектующих для создания образца СДПМ с поставщиками; заключение договора на предоставление услуг по конструированию и топологической оптимизации СДПМ с потенциальными заказчиками.

Получение займа в банке предполагается при возникновении сложностей с возможными инвестициями от потенциальных заказчиков. Организация сети посредников не планируется. Совместное создание агрегатора для реализации с партнерами (потенциальными заказчиками) по модели B2B для реализации полной цепочки производства и реализации электротранспорта малой мощности в России.

Также создана компьютерная модель СДПМ для проведения комплексной топологической оптимизации ротора.

Построена компьютерная модель СДПМ для проведения расчетов электромагнитных характеристик (рис. 3).

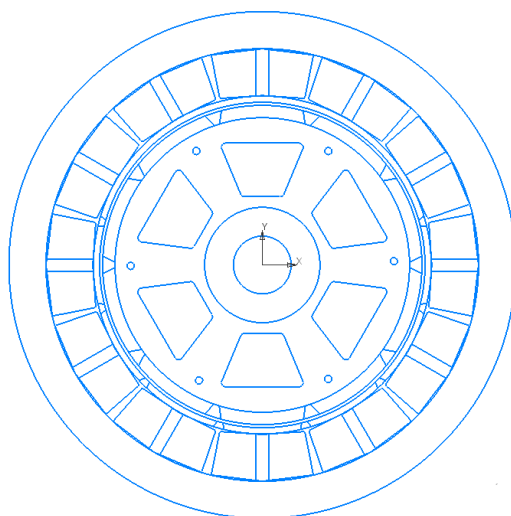


Рис. 3. Компьютерная модель BM1418 ZXF

Fig. 3. Computer model BM1418 ZXF

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Созданная компьютерная геометрическая модель СДПМ загружается в программное обеспечение Elcut. Далее происходит расчет распределения электромагнитного поля, возникающего в роторе с решением сопряжённой задачи расчета момента нагрузки, возникающей на валу ротора. В итоге получено значение в 7,3 Н*м, со среднеквадратичным отклонением в 3,82%. Данная погрешность является допустимой, поэтому модель можно считать верифицированной. Результаты электромагнитных расчетов в программном обеспечении Elcut визуализируются в виде 2D модели продольного разреза ротора, с отображенным распределением электромагнитного поля, что представлено на рисунке 3.

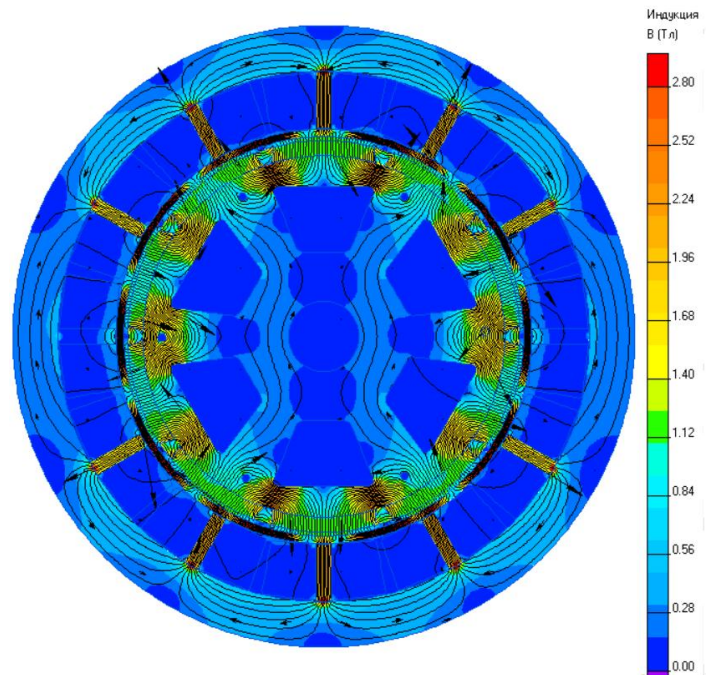


Рис. 4. Результаты электромагнитных расчетов BM1418 ZXF *Fig. 4. BM1418 ZXF Electromagnetic Calculation Results*
Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors.*

Расчёты одной модели ротора СДПМ составляли 110 с, число элементов сетки составляло 928385 ячеек. Полная итерация шага ГА занимала 150 с времени, при этом проведение полной КТО при самом малом количестве популяций хромосом для многопоточного расчета занимало 12 дней. В дальнейшем для снижения трудоемкости расчетов будут приняты необходимые упрощения конструкции СДПМ.

В результате проведения КТО для СДПМ типа были достигнуты следующие результаты:

- для модернизированного СДПМ объем ПМ составит 9600 мм³;
- снижение объема ПМ составило 32,9 %;
- стоимость магнитов исходного СДПМ составляла 43% от общей стоимости, то после модернизации данный процент составил уже 18%.

Для демонстрации результатов оптимизации проведено сравнение оптимизированного двигателя с существующими аналогами, в частности с BM1418. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

	Исходный СДПМ			Модернизированный СДПМ			
	М _{ср.кв.} , н*М	М _{макс.} , н*М	ω _{ср.кв.} , об/мин	ω _{макс.} , об/мин	М _{ср.кв.} , н*М	М _{макс.} , н*М	ω _{ср.кв.} , об/мин
Опыт №1 (без нагр.)	1,09	1,79	97,22	106,5	1,13	2,42	87,15
Опыт №2 (с нагр.)	1,74	2,49	86,5	96	1,81	2,82	91,5
Опыт №3 (без нагр.)	3,18	4,38	184,84	198	3,31	3,55	190,8
Опыт №4 (с нагр.)	3,88	5,81	192	198	4,01	4,99	191

Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors.*

Заключение (Conclusions)

Проект «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для

электротранспорта малой мощности» имеет хороший потенциал для реализации, так как имеется научный задел по созданию СДПМ, имеется поддержка со стороны потенциальных заказчиков и государства. Процесс работы бизнеса - заключение договора с заказчиком о предоставлении услуг по конструированию и оптимизации СДПМ, производства СДПМ и дальнейшая продажа двигателя транспортным и энергетическим предприятиям. Данный бизнес-проект будет устойчив, потому что материалы, комплектующие, программное обеспечение есть в РФ и странах-партнерах (Казахстан, Китай); а направление работы бизнеса соответствует государственным приоритетам, в частности "Транспортной стратегии развития РФ до 2030" и программе «ПСАЛ – 2030».

Данный проект уже нашел интерес у некоторых потребителей и будет устойчив, потому что материалы, комплектующие, программное обеспечение есть в РФ и странах-партнерах (Казахстан, Китай); а направление работы бизнеса соответствует государственным приоритетам, в частности "Транспортной стратегии развития РФ до 2030" и программе «ПСАЛ – 2030». Данная бизнес-идея имеет высокую прибыльность, так как оптимизации СДПМ имеет преимущество в виде снижения стоимости одного СДПМ на 30 %, что дает дополнительную финансовую привлекательность проекту, также данный проект повышает эффективность работы электротранспорта, что является актуальным направлением для транспорта и промышленности РФ.

Теоретическая значимость работы реализована за счет применения генетического алгоритма при проведении комплексной топологической оптимизации двигателя ВМ1418 ZXF, так как получено преимущество в виде снижения стоимости одного СДПМ на 30 %, что дает дополнительную научную и финансовую привлекательность исследованию. Практически данная рассчитанная после оптимизации модель двигателя будет применена на практике, что также повышает эффективность работы электротранспорта, что является актуальным направлением для транспорта и промышленности РФ.

Расчет индекса доходности данного проекта $PI=1,2$ при ставке дисконтирования 10%, при этом инвестиции в 1 млн. рублей принесут порядка 400 тыс. рублей в год чистого денежного потока, дисконтированный срок окупаемости - 2,5 года и текущем объеме рынка 1000 моделей СДПМ в год.

Литература

1. Петров, Т. И. Стенд для измерения вращающего момента и частоты вращения синхронных двигателей с постоянными магнитами / Т. И. Петров, В. Р. Басенко // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 20–22 октября 2022 года / Редколлегия: А.Г. Арзамасова (отв. редактор). – Казань: ООО "Издательство Фолиант", 2022. – С. 203-206. – EDN KVVYKDF.
2. Разработка макета мобильной установки заряда электротранспорта и стенда для проведения испытаний / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Т. И. Петров [и др.] // Естественные и технические науки. – 2023. – № 7(182). – С. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.
3. Khanchandani K.B., Силовая электроника / K.B. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 – С. 908-959.
4. Гуляев И.В. Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 5. – С. 187-191.
5. Гуляев И.В. Работа асинхронизированного вентильного двигателя с потреблением чисто активной мощности со стороны якоря/ Тутаев Г.М., Юшков И.С., Волков А.В. // Актуальные проблемы электронного приборостроения труды XII международной конференции: АПЭП-2014. 2014. С. 241-244.
6. Ван Л. Прямое управление моментом для СДПМ / Л. Ван, Ю. Гао // Труды IEEE International Электрические машины и приводы конференция IEMDC. – 2007. – С. 403-406.
7. Гуляев И.В. Электропривод на базе асинхронизированного вентильного двигателя / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 70-73.
8. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit. / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2022. – No. 4(25). – P. 37-44. – EDN FLAYJK.
9. Петров, Т. И. Особенности проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами при помощи комплексной топологической оптимизации / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, R. K. Behera // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 1(57). – С. 58-67. – EDN KKTGUR.

10. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. Н. Цветков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHN.

11. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

12. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).

13. Сафин, А. Р. Оптимизация модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для снижения времени расчета вращающего момента / А. Р. Сафин, Т. И. Петров // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2021. – № 3(20). – С. 31-37. – EDN TBKBRC.

14. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.

15. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Петров Тимур Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Ибрагимова Айгуль Равиловна – аспирант Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Petrov, T. I. Stand for measuring the torque and rotational speed of synchronous motors with permanent magnets / T. I. Petrov, V. R. Basenko // Dispatch and control in the electric power industry: Proceedings of the XVII All-Russian Open Youth Scientific and Practical Conference, Kazan, October 20–22, 2022 / Editorial Board: A.G. Arzamasova (responsible editor). – Kazan: LLC "Publishing House Foliant", 2022. – S. 203-206. – EDN KVKYKDF.

2. Safin A. R., Tsvetkov A. N., Petrov T. I. [et al.] Development of a model of a mobile electric transport charge unit and a test bench // Natural and technical sciences. – 2023. – No. 7 (182). – S. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.

3. Khanchandani K.B., Power electronics / K.V. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 - pp. 908-959.

4. Gulyaev I.V. Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov and others // Scientific and technical bulletin of the Volga region. – 2015. – No. 5. – P. 187-191.

5. Gulyaev I.V. The operation of an asynchronized brushless motor with the consumption of purely active power from the armature / Tutaev G.M., Yushkov I.S., Volkov A.V. // Actual problems of electronic instrumentation, Proceedings of the XII International Conference: APEP-2014. 2014. S. 241-244.

6. Wang L. Direct torque control for PMSM / L. Wang, Yu. Gao // Proceedings of IEEE International Electrical Machines and Drives Conference IEMDC. – 2007. – S. 403-406.

7. Gulyaev I.V. Electric drive based on asynchronized valve motor / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov and others // Scientific and technical bulletin of the Volga region. – 2015. – No. 1. – S. 70-73.

8. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit. / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Bulletin of PITTU named after academician M.S. Osimi. – 2022. – No. 4(25). – P. 37-44. – EDN FLAYJK.

9. Petrov, T. I., Safin, A. R., and Behera, R. K. Design features of permanent magnet synchronous motors using complex topological optimization, Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. – 2023. – T. 15, No. 1 (57). – S. 58-67. – EDN KKTGUR.

10. Development of the technology of mobile charging stations for electric vehicles / A. R. Safin, I. V. Ivshin, A. N. Tsvetkov [et al.] // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2021. – T.

23, No. 5. - S. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHH.

11. Petrov T.I., Safin A.R., Gracheva E.I. [et al.] Modeling the operation of equipment for a mobile charging installation for charging electric vehicles in order to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups // Bulletin of MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University. - 2022. - T. 25, No. 4. - S. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

12. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).

13. Safin, A. R. Optimization of the model of a synchronous motor with permanent magnets to reduce the time for calculating the torque / A. R. Safin, T. I. Petrov // Bulletin of PITTU named after academician M.S. Osimi. - 2021. - No. 3 (20). - S. 31-37. – EDN TBKBRC.

14. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. - 2022. - Vol. 190. - P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.

15. Basenko, V.R., Nizamiev, M.F., Ivshin, I.V., and Vladimirov, O.V., 3D model of a power transformer for the study of its technical condition in terms of vibrational parameters, Izv. Energy problems. - 2022. - T. 24, No. 3. - S. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTL.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Timur I. Petrov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Aigul R. Ibragimova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Получено 07.02.2024 г.

Отредактировано 19.02.2024 г.

Принято 21.02.2024 г.