

УДК 621.313.32

Влияние числа пазов статора на характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами при фиксированном размере статора

Э. Э. Ибатуллин*, Т. И. Петров

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: ibatullinedick@yandex.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
18.08.2025;

получена
после доработки
30.10.2025;

принята
к публикации
10.11.2025

Ключевые слова:

оптимизация,
число пазов статора,
Motor-CAD,
синхронный двигатель,
крутящий момент

Оптимизация конструктивных параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) – это важная задача в условиях возросших требований к энергетической эффективности и габаритной компактности электрических машин. Одним из ключевых параметров, оказывающих влияние на электромагнитные характеристики машины, является число пазов в статоре, от которого зависят такие показатели, как крутящий момент, его пульсации, электромагнитные потери и коэффициент полезного действия. В рамках настоящего исследования проведено численное моделирование работы СДПМ с различными конфигурациями статорной части при сохранении неизменных габаритов активной зоны. Расчеты выполнялись в специализированной программной среде Motor-CAD. Сравнительный анализ позволил установить зависимости между числом пазов и основными энергетическими характеристиками машины. Выявлены конфигурации, обеспечивающие наилучшее соотношение между средним крутящим моментом, снижением пульсаций и повышением коэффициента полезного действия (КПД). Результаты могут быть использованы при проектировании СДПМ, предназначенных для применения в условиях ограниченного монтажного пространства, а также на этапах параметрической оптимизации новых моделей электродвигателей. Представленный подход позволяет повысить точность выбора конструктивных решений и сократить затраты на прототипирование за счет предварительной оценки характеристик с использованием численного моделирования.

Для цитирования

Ибатуллин Э. Э. и др. Влияние числа пазов статора на характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами при фиксированном размере статора. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 4/1. С. 478–489. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-4/1-478-489>.

Influence of the number of stator slots on the performance of a permanent magnet synchronous motor with fixed stator dimensions

Eduard E. Ibatullin*, Timur I. Petrov

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: ibatullinedick@yandex.ru

Article info

Received
18.08.2025;

received
in revised form
30.10.2025;

accepted
10.11.2025

Key words:

optimization,
number of stator slots,
Motor-CAD,
permanent magnet
synchronous motor,
torque

Abstract

Optimization of the design parameters of permanent magnet synchronous motors (PMSM) is an important task in the context of increased requirements for energy efficiency and compactness of electrical machines. One of the key factors influencing the electromagnetic performance of such machines is the number of stator slots, which directly affects parameters such as torque, torque ripple, electromagnetic losses, and overall efficiency. This study presents a numerical investigation of PMSM performance with various stator slot configurations, while maintaining fixed geometric dimensions of the active zone. Simulations have been carried out using the specialized Motor-CAD software package. A comparative analysis has revealed the relationship between the number of stator slots and the machine's main electromagnetic characteristics. Several configurations have been identified that offer the best balance between average torque, reduced torque ripple, and improved efficiency. The obtained results can be applied in the design of PMSMs intended for use in applications with strict spatial constraints, as well as during the parametric optimization of new motor models. The proposed approach enhances the accuracy of selecting optimal design parameters and reduces the need for physical prototyping by enabling reliable performance evaluation through numerical modeling.

For citation

Ibatullin, E. E. et al. 2025. Influence of the number of stator slots on the performance of a permanent magnet synchronous motor with fixed stator dimensions. *Vestnik of MSTU*, 28(4/1), pp. 478–489. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-4/1-478-489>.

Введение

Синхронные двигатели с постоянными магнитами находят широкое применение в современных системах электропривода благодаря высокой удельной мощности, энергоэффективности и возможностям точного управления (Мирзаянов и др., 2017; Zhang et al., 2023). Актуальность исследования режимов работы тяговых СДПМ подчеркивается и в более ранних работах (Васьковский и др., 2013; Чуприна и др., 2022). В условиях ограниченного монтажного пространства, характерного для транспортных и промышленных применений, возрастает необходимость оптимизации конструктивных параметров при сохранении габаритных ограничений (Yuan, 2023; Zhao et al., 2020). Одним из ключевых факторов, определяющих характеристики СДПМ, выступает число пазов статора, влияющее на форму электродвижущей силы, пульсации момента и уровень магнитных потерь (Абдуллин и др., 2017).

Ряд исследований сосредоточен на топологической оптимизации или выборе обмоточных схем без учета габаритных ограничений (Петренко и др., 2016; Баширов, 2022). Современные подходы к выбору типов СДПМ и систем управления подробно рассматриваются в работе (Поздеев и др., 2015). Однако влияние изменения числа пазов при фиксированной геометрии активной зоны подробно изучено лишь в ограниченном числе работ. Также недостаточно раскрыты инженерные ограничения, связанные с реализацией обмоток при дробных обмоточных отношениях.

Целью настоящего исследования является количественная оценка влияния числа пазов на электромагнитные характеристики СДПМ при фиксированных размерах активной зоны. Объектом исследования выступает двигатель Siemens 1FU8134-6TD3.

Научная значимость работы заключается в системном численном анализе параметров электромагнитного взаимодействия при варьировании количества пазов, что позволяет выявить оптимальные соотношения для повышения КПД и стабильности момента. Практическая значимость заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании компактных высокоэффективных СДПМ в условиях жестких габаритных ограничений, типичных для транспортных и станочных систем.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран серийный синхронный двигатель с постоянными магнитами Siemens 1FU8134-6TD3, предназначенный для применения в составе промышленного электропривода. Выбор обусловлен доступностью его геометрических и электрических параметров, а также типичностью конструктивного исполнения. Сравнительные исследования роторных систем подтверждают типичность выбранной конструкции (Кириллов и др., 2021). Номинальная мощность двигателя составляет 3 кВт, напряжение – 125 В, частота питающего напряжения – 50 Гц.

Основное внимание уделено оценке следующих параметров: средний и пульсирующий электромагнитный момент, форма ЭДС, магнитные потери, КПД. Подобный подход к параметрической оценке применялся и в других работах (Пыркин и др., 2023). Геометрические и электрические параметры двигателя, занесенные в программу Motor-Cad, указаны в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры модели двигателя Siemens 1FU8134-6TD3, занесенные в программу Motor-Cad
Table 1. The main parameters of the Siemens 1FU8134-6TD3 engine model entered into the Motor-Cad program

Параметр	Значение
Slot number / Кол-во пазов	36 шт.
Stator lamination diameter / Диаметр сердечника статора	180 мм
Stator bore / Внутренний диаметр статора	94 мм
Tooth width / Ширина зубца	7 мм
Slot depth / Глубина паза	18 мм
Slot corner radius / Радиус угла паза	0 мм
Tooth tip depth / Глубина кончика зубца	1 мм
Slot opening / Ширина раскрытия паза	3 мм
Tooth tip angle / Угол кончика зубца	30°
Sleeve thickness / Толщина гильзы	0 мм
Pole count / Количество полюсов	6 шт.
Magnet thickness / Толщина магнита	4 мм
Airgap / Воздушный зазор	0,75 мм

Выбор числа пазов статора синхронного двигателя с постоянными магнитами оказывает существенное влияние на его электромагнитные характеристики. С увеличением числа пазов при фиксированном внешнем диаметре статора уменьшается ширина зубца и прорези. Это может ограничивать допустимую плотность тока, вызывать насыщение зубцов и снизить технологичность изготовления. Однако увеличение числа пазов, как правило, способствует улучшению формы электродвижущей силы, снижению зубцового момента и пульсаций момента за счет более равномерного распределения магнитного поля.

Обмоточное соотношение (1) является ключевым параметром при проектировании обмотки. Целочисленные значения q позволяют реализовать симметричные трехфазные схемы с равномерным распределением токов и минимальными гармоническими искажениями. Дробные значения q могут использоваться в высокоэффективных двигателях, но требуют более сложного расчета схемы обмотки и анализа паразитных эффектов

$$q = \frac{Z_s}{2p \times m}, \quad (1)$$

где Z_s – число пазов, p – число полюсов, m – число фаз.

Таким образом, выбор числа пазов требует компромисса между улучшением электромагнитных характеристик и соблюдением конструктивных и технологических ограничений. В дальнейшем моделировании были рассмотрены четыре конфигурации: 24, 36, 48 и 60 пазов с соответствующим числом полюсов, обеспечивающим симметрию обмотки.

Для проведения численного анализа электромагнитных характеристик синхронных двигателей с постоянными магнитами использовалась программная среда Ansys Motor-CAD, модуль EMag.

Геометрия статора и ротора формировалась параметрически, на основе шаблонов Motor-CAD, с указанием следующих исходных данных: внешний диаметр статора – фиксированный; ширина зубца и ширина прорези варьировались автоматически при изменении количества пазов; постоянные магниты задавались в виде вложенных сегментов в роторе, с фиксированным уровнем намагниченности; длина активной части двигателя и число витков в обмотке – одинаковые для всех моделей.

Для обеспечения симметрии трехфазной обмотки и минимизации неравномерности токов использовались варианты с целым или дробным обмоточным соотношением. Расчеты проводились для четырех конфигураций: с 24, 36, 48 и 60 пазами. Для каждой из них было выбрано соответствующее число полюсов ротора (4, 6, 8 и 10 соответственно), что обеспечивало симметрию обмотки и корректное распределение фазных токов.

Дополнительно в модуле Lab выполнялся расчет ЭДС, среднего электромагнитного момента, зубцового момента, а также оценка формы кривой момента и его пульсаций.

Основным варьируемым параметром моделирования является число пазов статора. Для обеспечения корректного формирования симметричной трехфазной обмотки соответствующим образом изменялось число полюсов, сценарии моделирования занесены в табл. 2. Симметрия обмотки обеспечивалась равномерным распределением катушек, а также подбором числа пазов, кратного числу фаз и числу полюсов. Таким образом, обмоточное отношение q принимало целое значение, исключая паразитные гармоники.

Таблица 2. Сценарии моделирования
Table 2. Simulation scenarios

Число пазов Z_s	Число полюсов	Обмоточное соотношение $q = \frac{Z_s}{2p \times m}$
24	4	1
36	6	1
48	8	1
60	10	1

Для каждой из конфигураций выполнялись следующие этапы:

- построение модели двигателя в Motor-CAD с измененным числом пазов;
- адаптация ширины паза и зубца под новую конфигурацию;
- автоматический подбор параметров обмотки в рамках заданного класса;
- расчет: ЭДС, момент, пульсации момента, КПД, магнитные потери;
- визуализация распределения магнитной индукции и анализ формы ЭДС;
- сопоставление результатов между конфигурациями.

Результаты и обсуждение

Для наглядного сопоставления рассмотренных вариантов в табл. 3 приведены ключевые электромагнитные параметры каждой конфигурации. Особое внимание уделено уровню пульсаций и зубцовому моменту, так как они существенно влияют на эксплуатационные характеристики.

Таблица 3. Сравнительные параметры конфигураций статора
Table 3. Comparative parameters of stator configurations

Конфигурация	Ср. момент, Н·м	Пульсации, Н·м	Зубцовый момент, Н·м	КПД, %	Ширина прорези, мм
24/4	27	±2,5	3,0	83	3,0
36/6	53	±2,5	0,15	87	3,0
48/8	38	±4,0	3,6	90	0,28
60/10	59	±1,5	0,007	91	0,024

В результате численного моделирования проанализировано влияние изменения числа пазов статора на характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами при фиксированных габаритах активной зоны. Рассмотрены четыре конфигурации с числом пазов: 24, 36, 48 и 60.

Конфигурация с 24 пазами / 4 полюсами

Для обеспечения симметричной трехфазной обмотки количество полюсов ротора было уменьшено до 4. Форма электродвижущей силы существенно отклоняется от синусоидальной, наблюдаются выраженные гармоники, пульсации момента 2,5 Н·м, средний момент 27 Н·м. Конфигурация демонстрирует наихудшую плавность хода и наименьший средний момент среди рассмотренных вариантов. Графики ЭДС, электромагнитного момента и пульсаций представлены на рис. 1, а распределение магнитной индукции в активной зоне машины показано на рис. 2. Данная конфигурация оказалась наименее эффективной с точки зрения электромагнитных характеристик.

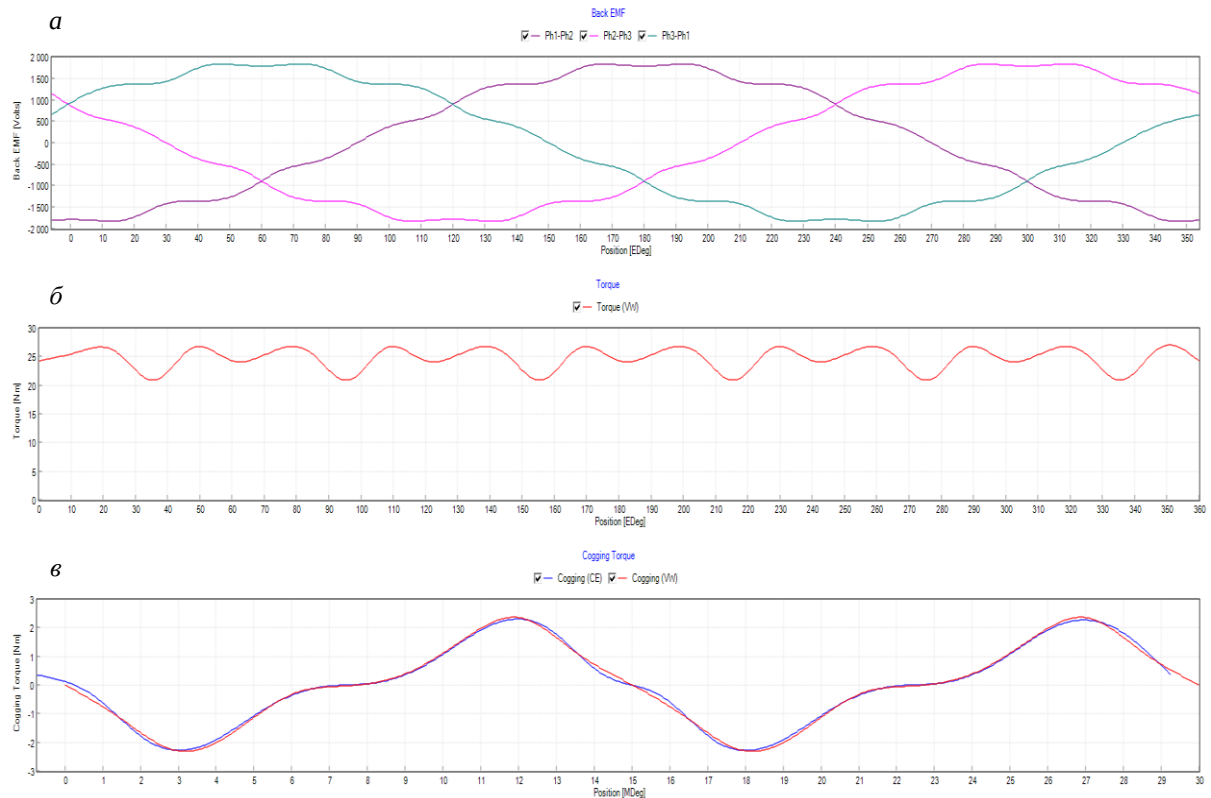


Рис. 1. Результаты для конфигурации с 24 пазами: а – электродвижущая сила; б – электромагнитный момент; в – зубцовый момент

Fig. 1. Results for the 24-slot configuration: а – back EMF; б – electromagnetic torque; в – cogging torque

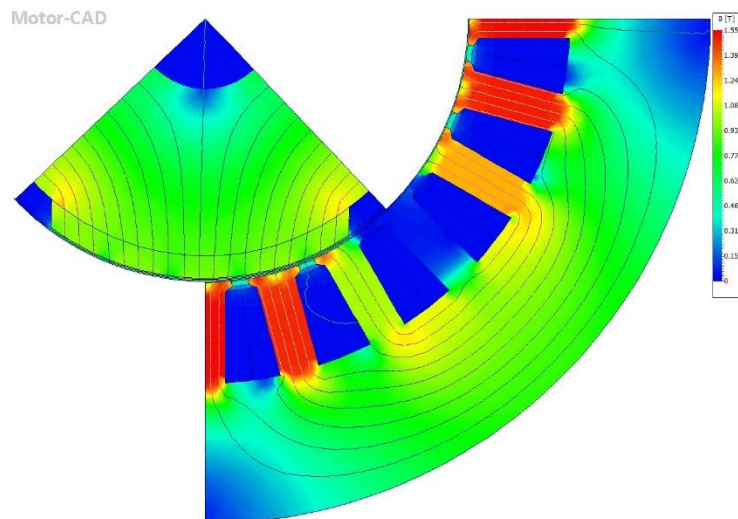


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в модели с 24 пазами
Fig. 2. Magnetic flux distribution in the 24-slot model

Конфигурация с 36 пазами / 6 полюсами

Конфигурация с 36 пазами и 6 полюсами обеспечивает целое обмоточное соотношение, что способствует формированию сбалансированной магнитной структуры. Электромагнитный момент составляет 52 Н·м, пульсации $\pm 2,5$ Н·м, амплитуда зубцового момента 0,18 Н·м. Результаты расчета ЭДС, момента и зубцового момента приведены на рис. 3, а распределение магнитной индукции представлено на рис. 4. Указанная конфигурация используется в качестве базовой и демонстрирует стабильные и сбалансированные характеристики.

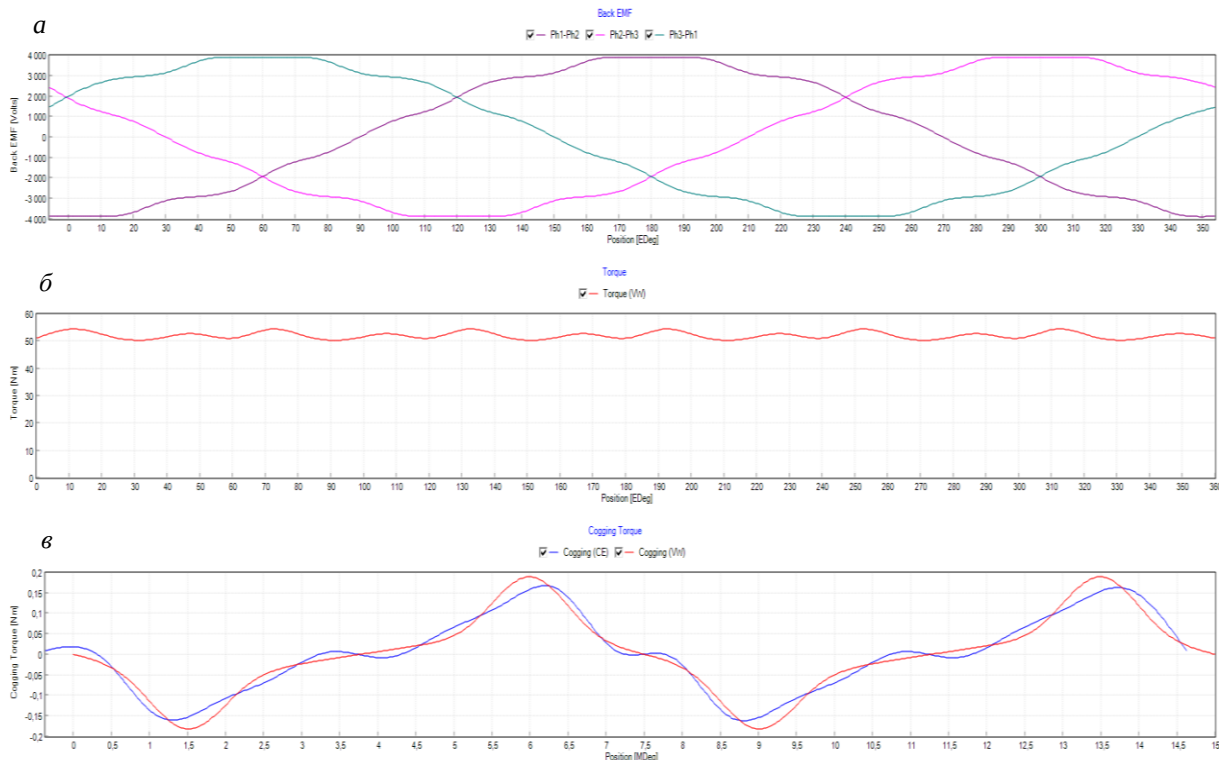


Рис. 3. Результаты для конфигурации с 36 пазами: а – электродвижущая сила;
б – электромагнитный момент; в – зубцовый момент
Fig. 3. Results for the 36-slot configuration: а – back EMF; б – electromagnetic torque; в – cogging torque

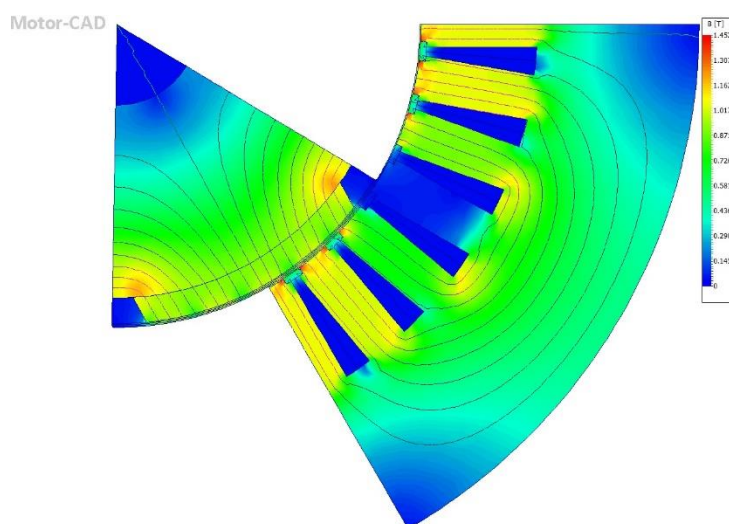


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в модели с 36 пазами
Fig. 4. Magnetic flux distribution in the 36-slot model

Конфигурация с 48 пазами / 8 полюсами

При увеличении числа пазов до 48 была также увеличена кратность полюсной системы до 8, что позволило сохранить симметрию трехфазной обмотки. В процессе генерации модели в среде Motor-CAD произошло автоматическое уменьшение ширины зубца с 7 до 6 мм и ширины прорези с 3 мм до 0,28 мм. Электродвижущая сила по фазам близка к синусоидальной форме, среднее значение электромагнитного момента составляет 36–38 Н·м при пульсациях около ± 4 Н·м. Зубцовый момент достигает примерно 3,6 Н·м, что отражает умеренный уровень механических колебаний. На рис. 5 представлены графики ЭДС, электромагнитного момента и зубцового момента, распределение магнитной индукции – на рис. 6. Конфигурация с 48 пазами демонстрирует компромиссные характеристики при умеренных геометрических изменениях и может применяться там, где допустимо небольшое увеличение пульсаций относительно заводского варианта.

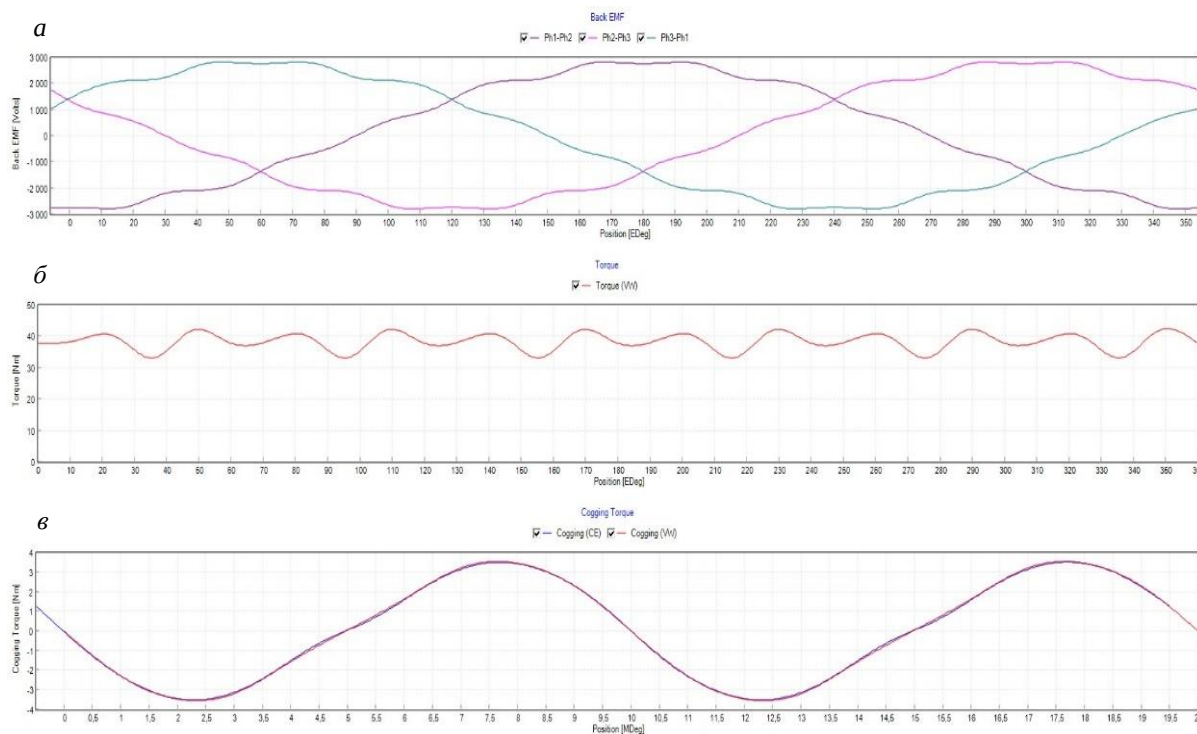


Рис. 5. Результаты для конфигурации с 48 пазами: *a* – электродвижущая сила; *б* – электромагнитный момент; *в* – зубцовый момент

Fig. 5. Results for the 48-slot configuration: *a* – back EMF; *б* – electromagnetic torque; *в* – cogging torque

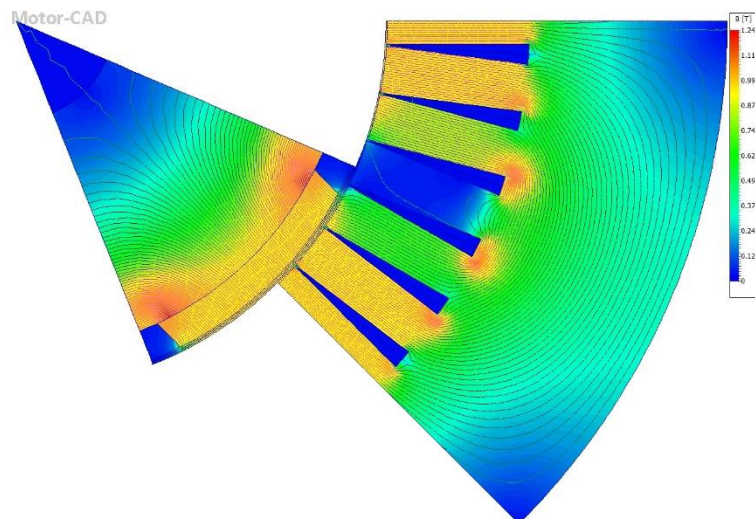


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в модели с 48 пазами
Fig. 6. Magnetic flux distribution in the 48-slot model

Конфигурация с 60 пазами / 10 полюсами

В модели с 60 пазами для обеспечения симметричной обмотки число полюсов было увеличено до 10. Это привело к сильному геометрическому сжатию прорези: Motor-CAD автоматически уменьшил ее ширину до 0,024 мм, что приближается к нижнему технологическому пределу. При этом средний электромагнитный момент достиг максимального значения – около 59 Н·м, пульсации снизились до $\pm 1,5$ Н·м, а зубцовый момент стал практически нулевым ($\sim 0,007$ Н·м). Графики основных характеристик приведены на рис. 7, а распределение магнитной индукции показано на рис. 8.

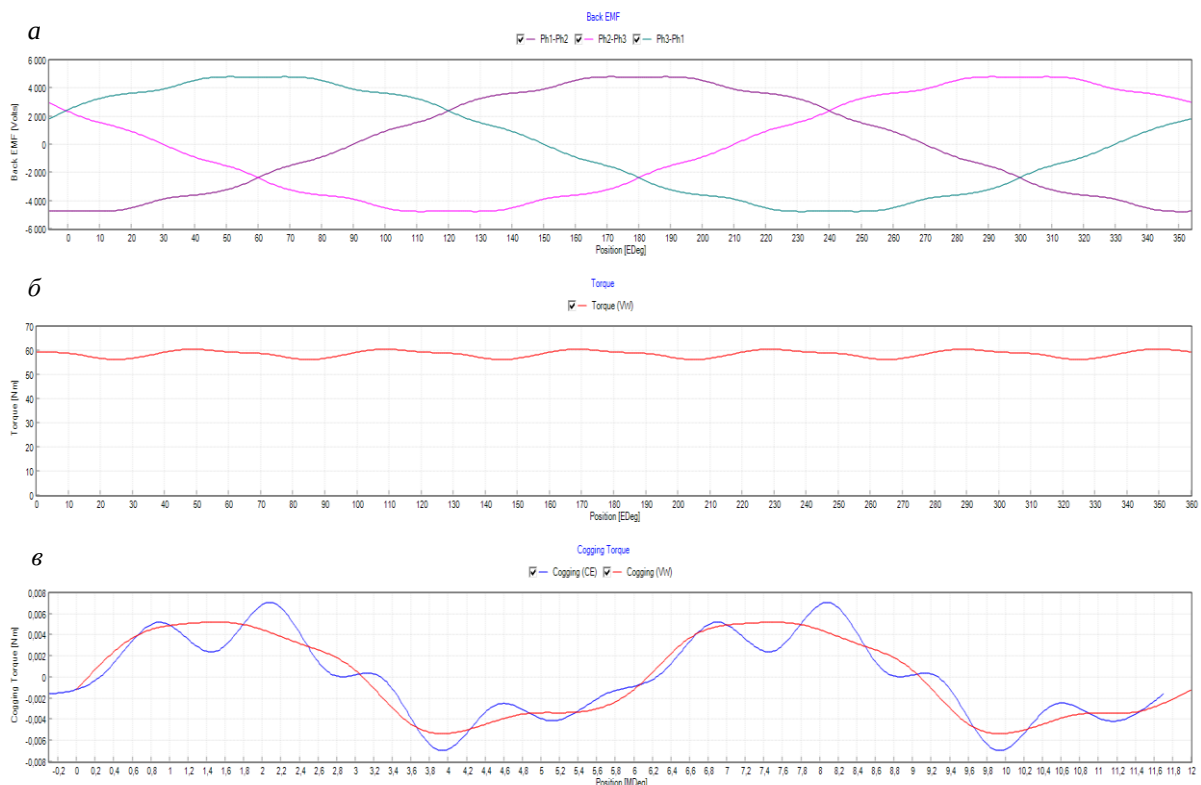


Рис. 7. Результаты для конфигурации с 60 пазами: *a* – электродвижущая сила;
b – электромагнитный момент; *в* – зубцовый момент
Fig. 7. Results for the 60-slot configuration: *a* – back EMF; *b* – electromagnetic torque; *в* – cogging torque

Несмотря на высокую эффективность, конфигурация требует оценки с точки зрения технологической реализуемости из-за чрезмерного сужения прорезей.

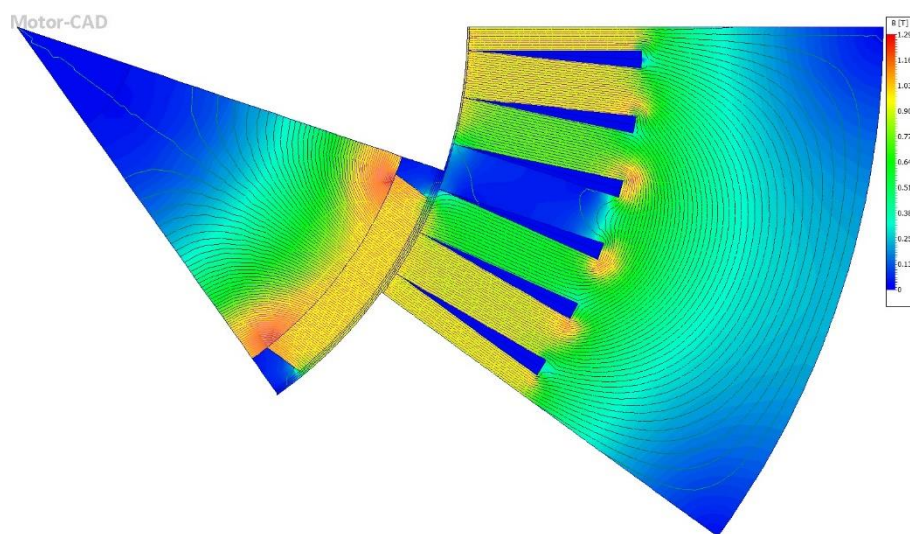


Рис. 8. Распределение магнитной индукции в модели с 60 пазами
Fig. 8. Magnetic flux distribution in the 60-slot model

Следует отметить, что конфигурации с 48 и 60 пазами носили в рамках данного исследования экспериментальный характер и использовались преимущественно для оценки влияния роста числа пазов на электромагнитное поле при фиксированных габаритах активной зоны. Значения ширины раскрытия паза, автоматически масштабированные программной средой Motor-CAD, могут превышать пределы технологической реализуемости при традиционных методах штамповки и намотки. Одним из важнейших факторов, ограничивающих применение конфигураций с большим числом пазов, является технологическая сложность изготовления. При значительном увеличении числа пазов ширина прорези уменьшается до сотых долей миллиметра, как это наблюдается в модели с 60 пазами. Прорези шириной менее 0,05 мм крайне сложны в исполнении при использовании традиционных методов штамповки и механической обработки, поскольку такие размеры приближаются к пределам допуска на точность при массовом производстве. Это приводит к необходимости применения специализированного оборудования и высокоточных технологических процессов, что увеличивает производственные издержки и усложняет контроль качества.

Уменьшение размеров пазов также ограничивает толщину изоляции проводников и увеличивает плотность тока, что может привести к перегреву обмоток и снижению ресурса машины. При этом тепловое сопротивление изоляционного слоя становится критическим, особенно в зонах с ограниченным теплоотводом. Также возрастает вероятность возникновения частичных разрядов в межвитковом пространстве. Повышенная плотность тока может привести к ускоренному старению обмоток и необходимости использования специальных термостойких изоляционных материалов, что дополнительно увеличивает стоимость двигателя.

Кроме того, узкие прорези затрудняют укладку обмоток и усложняют автоматизацию процесса производства. Введение дополнительной обмоточной оснастки и снижение допустимых механических отклонений требует модернизации технологических линий. Автоматизированные системы намотки и формовки катушек становятся менее эффективными, особенно при мелкосерийном производстве, что влечет рост затрат и увеличение времени сборки. В практике специализированных электрических машин для подобных конфигураций применяются методы частичной или предварительной намотки катушек с последующей вставкой в пазы (insert winding), а также технологии намотки на раскрытых сердечниках с последующей сборкой пакета.

В качестве возможных решений можно рассматривать применение лазерной или электроэрозионной резки, использование мягких магнитных материалов, пригодных для аддитивных технологий, а также оптимизацию формы прорези для уменьшения локального насыщения. Перспективным является применение высокопрочных сплавов и порошковых материалов с улучшенными магнитными характеристиками, пригодных для селективного лазерного спекания. Однако все эти подходы повышают себестоимость двигателя, также требуют пересмотра производственного цикла и повторной сертификации оборудования. Их внедрение целесообразно только в условиях высокого спроса или при производстве специализированных двигателей, например, в авионике или медицине.

Дополнительным аспектом, требующим учета, является охлаждение обмоток и магнитопровода. При конфигурациях с увеличенным числом пазов циркуляция воздуха или охлаждающей жидкости может быть затруднена из-за снижения зазоров между элементами активной зоны. Это может вызвать локальное перегревание зубцов и затруднить отвод тепла от внутренних участков обмотки. Данные условия требуют либо применения более эффективных систем охлаждения, таких как жидкостные каналы, встроенные теплообменники, либо ограничения предельной нагрузки на двигатель. Также возможно использование теплопроводящих компаундов между обмоткой и корпусом, что обеспечивает равномерный температурный градиент и повышает надежность изоляции.

Следует отметить, что при реализации конструкций с высоким числом пазов возрастают требования к точности изготовления и контролю параметров при сборке. Даже небольшие отклонения от проектной геометрии могут привести к существенным перекосам магнитного поля, росту несимметрий и повышенному уровню пульсаций. Такие эффекты особенно критичны в приводах с высокими требованиями к плавности хода и минимальному уровню вибраций. В связи с этим особое внимание должно уделяться качеству материалов, точности резки и механической обработки, а также надежности изоляционных материалов в условиях плотной укладки. Эффективными мерами контроля могут быть внедрение систем автоматической оптической проверки, применение координатно-измерительных машин, а также цифровая трассировка погрешностей при сборке.

Результаты, полученные в рамках данной работы, могут быть использованы при проектировании тяговых синхронных двигателей с постоянными магнитами для систем, требующих высокой точности позиционирования и низкого уровня пульсаций, таких как робототехнические приводы, электромобили, исполнительные механизмы авиационной автоматики. Повышенное число пазов способствует снижению зубцового момента и приближению формы ЭДС к синусоидальной, что критично для систем с высокочастотным управлением, где требуются плавность хода, отсутствие вибраций и стабильность отклика при нагрузке.

Практическая значимость исследования заключается в сравнительной оценке четырех геометрических конфигураций, что позволяет обоснованно выбирать топологию двигателя с учетом требований к надежности, эффективности и производственным возможностям. Полученные данные особенно актуальны при разработке машин, в которых недопустимы вибрации, связанные с пульсациями момента, а также при параметрической оптимизации существующих конструкций (Yuan, 2023). Результаты анализа могут использоваться в качестве справочных при выборе конфигурации для проектирования двигателей различного назначения.

С практической точки зрения, с учетом баланса характеристик и технологичности наиболее сбалансированной выглядит конфигурация с 36 пазами, а максимальные электромагнитные показатели демонстрирует конфигурация с 60 пазами (при существенных производственных ограничениях по ширине прорези). Конфигурация с 48 пазами характеризуется умеренным средним моментом и повышенными пульсациями по сравнению с 36-пазовой схемой, однако может рассматриваться как компромиссный вариант при проектировании двигателей, где допустимо небольшое увеличение вибраций ради упрощения обмотки. Схожие выводы встречаются и в исследованиях по другим типам электрических машин (Савостеенко и др., 2023). Конфигурация с 24 пазами демонстрирует наименьший момент и наибольшие искажения ЭДС и потому целесообразна лишь для маломощных или бюджетных решений.

В дальнейшем планируется расширить исследования за счет анализа влияния формы прорези, типов постоянных магнитов, учета температурного режима, а также моделирования режимов с нагрузкой, близкой к номинальной. Дополнительный интерес представляет оптимизация обмоточной схемы для снижения высокочастотных пульсаций момента и повышения эффективности. Перспективным направлением является также разработка новых типов обмоточных конфигураций, например auxetic winding (Ravanbod et al., 2024). Также целесообразно провести экспериментальную верификацию численных моделей с целью уточнения параметров потерь, нагрева и колебательных эффектов в реальных условиях эксплуатации.

Заключение

В рамках настоящего исследования выполнено численное моделирование синхронного двигателя с постоянными магнитами при различных конфигурациях числа пазов статора, с сохранением фиксированной геометрии активной зоны. Основным инструментом анализа выступила программная среда Ansys Motor-CAD с применением модулей EMag и Lab, обеспечивающих электромагнитную и тепловую оценки характеристик. Использование численных методов позволило выявить ключевые зависимости между числом пазов, распределением магнитного поля, величиной пульсаций момента и особенностями охлаждения обмоток.

Были рассмотрены четыре конфигурации: 24, 36, 48 и 60 пазов, при соответствующем изменении числа полюсов ротора для обеспечения симметричной трехфазной обмотки. Анализ показал следующее:

- конфигурация с 36 пазами демонстрирует сбалансированные параметры, близкую к синусоидальной форму ЭДС и приемлемые значения пульсаций и зубцового момента. Она рекомендована как базовая конструкция для двигателей общего применения;

– конфигурация с 48 пазами показывает умеренный средний момент и более высокие пульсации по сравнению с 36-пазовым вариантом, тем не менее она может рассматриваться как компромисс с допустимыми геометрическими изменениями;

– конфигурация с 60 пазами характеризуется максимальным моментом и минимальным уровнем зубцового момента, однако сопряжена с критическими ограничениями по ширине прорези, что требует отдельной оценки реализуемости и применения высокоточных технологий;

– конфигурация с 24 пазами показывает наихудшие характеристики и не рекомендуется к использованию в высокоэффективных приводных системах. Ее применение допустимо лишь в условиях жестких ограничений по стоимости и габаритам.

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность электромагнитных характеристик к числу пазов и необходимость комплексного подхода на этапе проектирования. Аналогичные тенденции отмечены и в исследованиях авиационных приводов (*Xiong et al.*, 2024). Представленная методика численного анализа может быть применена при разработке новых моделей СДПМ с ограниченным монтажным пространством, а также при параметрической оптимизации существующих конструкций с учетом реальных ограничений производства и эксплуатации.

Таким образом, проведенная работа позволяет не только выделить наиболее эффективные варианты топологии синхронных двигателей с постоянными магнитами с точки зрения электромагнитных характеристик, но и оценить конструктивные и производственные ограничения, влияющие на выбор оптимального решения. Это подтверждает целесообразность совмещения численного моделирования с инженерным анализом при проектировании электрических машин нового поколения, где необходимо обеспечить высокую точность, надежность и устойчивость рабочих характеристик в широком диапазоне нагрузок.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдуллин Д. Ш., Бутылин И. А., Ваганов М. А. Оптимальная поперечная геометрия синхронных явнополюсных двигателей // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2017. № 6. С. 38–43. EDN: ZCIDJR.
- Баширов Б. Э. Синхронная машина с постоянными магнитами // The Scientific Heritage. 2022. № 93(93). С. 94–98. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6882633>. EDN: RVAXHP.
- Васьковский Ю. Н., Гайденок Ю. А., Русятинский А. Е. Моделирование режимов работы тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехника и электромеханика. 2013. № 5. С. 19–22. EDN: RSYKBT.
- Кириллов И. В., Апальков Р. Г., Борисоглебский Н. А., Иванов А. С. Сравнительный анализ роторных систем синхронных машин на постоянных магнитах // The Scientific Heritage. 2021. № 71–1(71). С. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-71-1-26-30>. EDN: ZEURSH.
- Мирзаянов Р. Р., Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е. Исследование магнитного поля синхронного двигателя с постоянными магнитами и асинхронным пуском в зависимости от формы паза // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. Т. 21, № 2(76). С. 82–87. EDN: YSEKDP.
- Петренко А. Н., Плюгин В. Е., Петренко Н. Я., Шайда В. П. Разработка синхронного двигателя с постоянными магнитами на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Электротехнические и компьютерные системы. 2016. № 22(98). С. 111–115. EDN: YMITUL.
- Поздеев А. С., Казакбаев В. М., Прахт В. А., Дмитриевский В. А. Современные типы синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе и способы управления ими // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, Екатеринбург, 16–19 декабря 2014 г. Т. 1. Екатеринбург, 2015. С. 188–192. EDN: YPFUCX.
- Пыркин А. А., Ведяков А. А., Голубев А. К. Оценивание параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 6. С. 1242–1246. DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-6-1242-1246>. EDN: MEGKCO.
- Савостеенко Н. В., Бухтояров В. Ф., Хрюкин Д. Ю., Кушнарев В. А. Параметрическая оптимизация синхронных реактивных электрических машин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2023. Т. 23, № 4. С. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.14529/power230407>.
- Чуприна Н. В., Пугачев А. А. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 10–17. DOI: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-10-17](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17). EDN: ATSJVS.
- Ravanbod M., Montazeri A. A novel auxetic stator winding to improve the performance of permanent magnet synchronous electric motors // Engineering Research Express. 2024. Vol. 6, N 1. Article number: 015095. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad3148>.

- Xiong F., Yan R., Xie Y., Yang K. Design and optimization of an interior permanent-magnet synchronous motor for aircraft drive application // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Iss. 1. Article number: 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010309>.
- Yuan P. Finite element simulation calculation and optimal design of permanent magnet synchronous motor // *MATEC Web of Conferences*. 2023. Vol. 382. Article number: 01013. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338201013>.
- Zhang G. B., Li G. J. Comparative study of stator-mounted pm machines focusing on thermal performance // *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, San Francisco, CA, USA, 2023. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/iemdc55163.2023.10238952>.
- Zhao J., Wang Z., Liu H., Ning F. [et al.]. Modal analysis and structure optimization of permanent magnet synchronous motor // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 151856–151865. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3017679>.

References

- Abdullin, D. Sh., Butylin, I. A., Vaganov, M. A. 2017. Optimal cross-sectional geometry of salient-pole synchronous motors. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 6, pp. 38–43. EDN: ZCIDJR. (In Russ.)
- Bashirov, B. E. 2022. Permanent magnet synchronous machine. *The Scientific Heritage*, 93(93), pp. 94–98. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6882633>. EDN: RVAXHP. (In Russ.)
- Vaskovsky, Yu. N., Gaydenko, Yu. A., Rusyatinsky, A. E. 2013. Modeling of operating modes of permanent magnet traction synchronous motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 5, pp. 19–22. EDN: RSYKBT. (In Russ.)
- Kirillov, I. V., Apalkov, R. G., Borisoglebsky, N. A., Ivanov, A. S. 2021. Comparative analysis of rotor systems of permanent magnet synchronous machines. *The Scientific Heritage*, 71–1(71), pp. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-71-1-26-30>. EDN: ZEURSH. (In Russ.)
- Mirzayanov, R. R., Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E. 2017. Study of magnetic field in a permanent magnet synchronous motor with asynchronous start depending on slot shape. *VESTNIK UGATU*, 21(2(76)), pp. 82–87. EDN: YSEKDP. (In Russ.)
- Petrenko, A. N., Plughin, V. E., Petrenko, N. Ya., Shaída, V. P. 2016. Development of a permanent magnet synchronous motor based on a squirrel-cage asynchronous motor. *Elektrotehnicheskie i Kompyuternye Sistemy*, 22(98), pp. 111–115. EDN: YMITUL. (In Russ.)
- Pozdeev, A. S., Kazakbaev, V. M., Pracht, V. A., Dmitrievsky, V. A. 2015. Modern types of AC permanent magnet synchronous motors and control methods. *Energy and Resource Saving. Energy Supply. Alternative and Renewable Energy*, Ekaterinburg, pp. 188–192. EDN: YPFUCX. (In Russ.)
- Pyrkin, A. A., Vedyakov, A. A., Golubev, A. K. 2023. Evaluation of parameters of permanent magnet synchronous motor. *Scientific and Technical Bulletin of ITMO*, 23(6), pp. 1242–1246. DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-6-1242-1246>. EDN: MEGKCO. (In Russ.)
- Savostenko, N. V., Bukhtoyarov, V. F., Khryukin, D. Yu., Kushnarev, V. A. 2023. Parametric optimization of synchronous reluctance electric machines. *Bulletin of the South Ural State University series "Power Engineering"*, 23(4), pp. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.14529/power230407>. (In Russ.)
- Chuprina, N. V., Pugachev, A. A. 2022. Modeling of vector control system for permanent magnet traction synchronous motor. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2(55), pp. 10–17. DOI: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-10-17](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17). EDN: ATSJVS. (In Russ.)
- Ravanbod, M., Montazeri, A. 2024. A novel auxetic stator winding to improve the performance of permanent magnet synchronous electric motors. *Engineering Research Express*, 6(1). Article number: 015095. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad3148>.
- Xiong, F., Yan, R., Xie, Y., Yang, K. 2024. Design and optimization of an interior permanent-magnet synchronous motor for aircraft drive application. *Applied Sciences*, 14(1). Article number: 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010309>.
- Yuan, P. 2023. Finite element simulation calculation and optimal design of permanent magnet synchronous motor. *MATEC Web of Conferences*, 382. Article number: 01013. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338201013>.
- Zhang, G. B., Li, G. J. 2023. Comparative study of stator-mounted pm machines focusing on thermal performance. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, San Francisco, CA, USA, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/iemdc55163.2023.10238952>.
- Zhao, J., Wang, Z., Liu, H., Ning, F. et al. 2020. Modal analysis and structure optimization of permanent magnet synchronous motor. *IEEE Access*, 8, pp. 151856–151865. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3017679>.

Сведения об авторах

Ибатуллин Эдуард Эльсович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, аспирант;
e-mail: ibatullinedick@yandex.ru

Eduard E. Ibatullin – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, PhD Student;
e-mail: ibatullinedick@yandex.ru

Петров Тимур Игоревич – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Timur I. Petrov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>