

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 621.313.84

DOI 10.17513/snt.40837



CC BY 4.0

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА****Сафин А. Р., Шакурова З. М., Шавалеев Б. Д.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация,
e-mail: diligentquaga663@gmail.com*

В настоящее время электрические машины в транспортных средствах в основном используют дорогие редкоземельные магниты NdFeB, что создает экономические и экологические проблемы из-за растущего спроса. Данное исследование рассматривает последние достижения в области конструирования двигателей и магнитных материалов, чтобы выявить и оценить перспективы решения этой проблемы. Цель исследования – оценить перспективы использования альтернативных магнитных материалов (ферритов, переработанных NdFeB) и перспективных конструкций двигателей (PMaSynRM, WFSM, SynRM, гибридное возбуждение) в качестве замены дорогим и экологически проблемным NdFeB-магнитам в тяговых электроприводах, с выявлением наиболее рациональных решений для промышленности. В работе анализируются различные альтернативные конструкции двигателей по сравнению с традиционным синхронным двигателем с постоянными магнитами (в иностранной литературе PMSM). Кроме того, оценивается потенциал ферритовых и переработанных магнитов NdFeB в качестве замены первичным магнитам NdFeB. С помощью детального моделирования в исследовании сравниваются производительность и экономическая эффективность этих решений с эталонным синхронным двигателем с постоянными магнитами (PMSM), при рассмотрении которых можно прийти к выводу, что использование магнитов NdFeB в PMSM привело к более высокой плотности крутящего момента, меньшей пульсации момента, более высокому КПД и меньшей длине пакета по сравнению с ферритами. Учитывая их перспективные эксплуатационные характеристики и потенциал в электрических двигателях следующего поколения, рекомендуется, чтобы будущие исследования были сосредоточены на новых технологиях, таких как двигатели с гибридным возбуждением, аксиально-поточковые и синхронные двигатели с реактивным ротором, с акцентом на технологичность изготовления, а также на новых магнитных материалах, таких как FeN и MnBi.

Ключевые слова: синхронные двигатели, постоянные магниты, редкоземельные магниты, переработанные магниты, ферриты

**ALTERNATIVE MAGNETIC MATERIALS
AND MOTORS FOR ELECTRIC DRIVES****Safin A. R., Shakurova Z. M., Shavaleev B. D.**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Kazan State Power Engineering University”, Kazan, Russian Federation,
e-mail: diligentquaga663@gmail.com*

Currently, electric vehicles mainly use expensive rare-earth NdFeB magnets, which creates economic and environmental challenges due to the growing demand. This study examines the latest advancements in motor design and magnetic materials to identify and evaluate the potential solutions to this problem. The purpose of the study is to evaluate the prospects of using alternative magnetic materials (ferrites, recycled NdFeB) and promising motor designs (PMaSynRM, WFSM, SynRM, hybrid excitation) as a replacement for expensive and environmentally problematic NdFeB magnets in traction electric drives, and to identify the most suitable solutions for the industry. The paper analyzes various alternative motor designs compared to the traditional permanent magnet synchronous motor (PMSM in foreign literature). In addition, the potential of ferrite and recycled NdFeB magnets as a replacement for primary NdFeB magnets is evaluated. Through detailed simulations, the study compares the performance and cost-effectiveness of these solutions with a reference permanent magnet synchronous motor (PMSM), which suggests that the use of NdFeB magnets in PMSM results in higher torque density, lower torque ripple, higher efficiency, and shorter package length compared to ferrites. Given their promising performance and potential in next-generation electric motors, it is recommended that future research focus on new technologies such as hybrid-excited, axial-flux, and jet-rotor synchronous motors, with a focus on manufacturing feasibility, as well as new magnetic materials such as FeN and MnBi.

Keywords: synchronous motors, permanent magnets, rare earth magnets, recycled magnets, ferrites

Введение

Данное исследование посвящено изучению последних достижений в области электрических двигателей (ЭД) и магнитных

материалов, которые позволяют сократить или полностью исключить использование редкоземельных постоянных магнитов, через анализ безмагнитных и магниторедукторных конструкций двигателей.

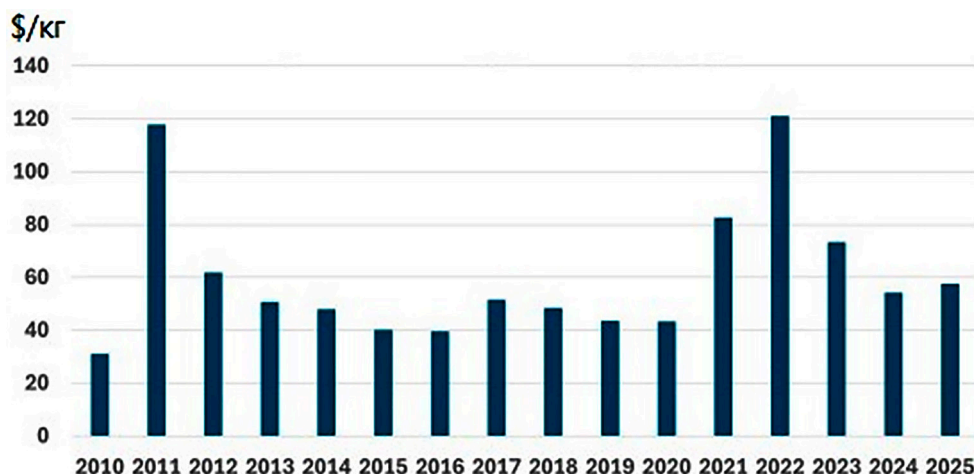


Рис. 1. Цены на неодим (USD за кг, очищенный металл 99,5 %) с 2010 по 2025 г.
Примечание: составлен авторами на основе источника [6]

Неодим-железо-борные ($Nd_2Fe_{14}B$) магниты высоко ценятся за их непревзойденную магнитную энергию в тяговых машинах, однако их высокая стоимость и зависимость от поставок с Китая на рынке создают геополитические и экономические риски [1, 2]. Их ценовая волатильность очевидна из значительных скачков в 2012 и 2022 гг., что проиллюстрировано на рис. 1. Таким образом, существует необходимость в поиске альтернативных решений для обеспечения будущего высокоэффективных ЭД и электромобилей.

Электрические двигатели играют ключевую роль в переходе к устойчивому транспорту, предлагая значительно более высокий КПД – примерно в 3 раза выше, чем у двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Поскольку электрификация автомобильного сектора набирает обороты, она напрямую решает критически важный источник выбросов, на долю транспорта приходится почти половина глобального объема выбросов CO_2 [3]. ДВС не только неэффективны, но и являются основными источниками вредных загрязнителей. Только в ЕС мелкодисперсные частицы из выхлопных газов ДВС связаны с более чем 300 000 случаев преждевременной смерти ежегодно [4]. Помимо CO_2 ДВС выбрасывают метан и оксиды азота – парниковые газы (ПГ) с гораздо более высоким потенциалом глобального потепления, что дополнительно усугубляет изменение климата и наносит ущерб здоровью органов дыхания.

Безотлагательность этого перехода подчеркивается текущим климатическим кризисом: глобальная температура уже повысилась на 1–1,5 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем [5, 6], а прогно-

зы указывают на продолжение потепления, что угрожает экосистемам и биоразнообразию во всем мире.

Однако это растущее стремление к электрификации значительно увеличит спрос на редкоземельные постоянные магниты (РЗМ-ПМ) в электрических машинах, если гибридные и электромобили (HEV и EV) будут доминировать в продажах новых автомобилей в ближайшем будущем. С ростом популярности внедорожников их возросшие потребности в мощностях будут потреблять больше редкоземельных материалов [7]. Ожидается, что спрос на тяговые машины к 2030 г. вырастет более чем в 10 раз, а прогнозы предсказывают до 140 млн электродвигателей для EV ежегодно к 2034 г., что дополнительно усугубляется потребностью и в других сферах (например, ветряные турбины) [8, 9]. Такой возросший спрос может экспоненциально увеличить стоимость РЗМ-ПМ и создает проблемы для производителей оригинального оборудования (ОЕМ) в обеспечении стабильной, диверсифицированной цепочки поставок, с потенциальными экономическими потерями из-за сбоев в поставках. Кроме того, добыча редкоземельных материалов усугубляет разрушение окружающей среды, выбросы парниковых газов и небезопасные условия труда, угрожая устойчивости автомобильной промышленности [10]. Крупные производители техники, такие как John Deere, Fendt и Case IH, уже представили концепты и серийные модели электрических тракторов (например, Fendt e100 Vario, John Deere SESAM), что подтверждает растущий интерес отрасли к электроприводу.

Исследование восполняет пробел в знаниях, изучая производительность и жиз-

неспособность переработанных NdFeB-магнитов в тяговых электродвигателях. В то время как некоторые исследования, такие как [11], изучали переработанные магниты в сравнении с первичными, они были ограничены конкретными уровнями мощности – 385 Вт и 8,8 кВт соответственно. Более того, исследование [12] было сосредоточено исключительно на бесщеточном двигателе постоянного тока, который не используется в электромобилях. В исследованиях [13] сконцентрировано внимание на тяговой электродвигатель для электрической лодки, который, предположительно, должен быть приспособлен для низкоскоростной, высокомоментной работы, эффективности и долговечности в морских условиях с водяным охлаждением. В отличие от этого, ЭД в электромобилях требуют высокой выходной мощности, компактности и легкого веса с продвинутым отводом тепла при отсутствии избытка воды. Устаревший характер большей части существующей литературы не учитывает последние технологические разработки и тенденции, такие как растущее внедрение синхронных двигателей с обмоткой возбуждения (WFSM) крупными производителями, например BMW [14].

Цель исследования – оценить перспективы использования альтернативных магнитных материалов (ферритов, переработанных NdFeB) и перспективных конструкций двигателей (PMSynRM, WFSM, SynRM, гибридное возбуждение) в качестве замены дорогим и экологически проблемным NdFeB-магнитам в тяговых электроприводах, с выявлением наиболее рациональных решений для промышленности.

Материалы и методы исследования

В данном исследовании использовался программный комплекс Ansys Motor-CAD версии 2023.2.2. Он был выбран для сбора данных благодаря широкому применению в моделировании электрических двигателей на этапе среднего уровня проектирования, с использованием аналитических методов и двумерного конечно-элементного анализа. В качестве эталонного двигателя для сравнения был выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM).

Результаты исследования и их обсуждение

Тепловые характеристики моделировались на скорости 6000 об/мин с использованием стационарных расчетов для определения распределения температур, что показано на рис. 2. Контрольными точками являются: полюс ротора, поверхность ста-

тора, поверхность ротора, корпус и горячая точка обмотки. Данная скорость была выбрана потому, что она находится в диапазоне, где двигатели начинают проявлять тепловые ограничения и происходит снижение крутящего момента. Для базового двигателя с магнитами N45UH на рис. 2, а, самой горячей частью является обмотка (146,2 °C), за которой с небольшим отрывом следуют ярмо статора и корпус. Температура магнитов составляет приблизительно 124 °C, при этом температура снижается по направлению к внутренней части ротора и вала. Такое распределение указывает на то, что охлаждение обмотки можно улучшить, либо увеличив расход охлаждающей жидкости в минуту на слоях обмотки, либо используя водяной контур.

Примечательно, что у двигателей с переработанными магнитами наблюдается лишь незначительное повышение температуры в каждой из контрольных точек. Это не объясняет причину разницы в производительности, поэтому для дальнейшего обсуждения будет использован анализ переходных процессов. Замена магнитов на ферритовые в базовом двигателе привела к небольшому повышению температуры в большинстве ее частей. Синхронные реактивные двигатели с постоянными магнитами (PMSynRM – Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motor) демонстрируют меньшее нагревание во всех областях, что можно объяснить большим объемом для распределения тепла и большей общей площадью поверхности.

На рис. 3 показано, как каждая технология двигателя была масштабирована для достижения крутящего момента приблизительно в 400 Н·м. Поскольку для масштабирования изменялась только высота оси вращения, базовые скорости у двигателей различаются. Базовый двигатель на магнитах NdFeB демонстрирует более плавное снижение крутящего момента в режиме ослабления поля по сравнению с другими двигателями. Базовый двигатель с переработанными магнитами потребовал увеличения высоты оси вращения на 3,5 %, что незначительно снизило его базовую скорость. Характеристики переработанных магнитов незначительно ухудшились после превышения базовой скорости. Их замена на ферритовые магниты привела к значительному снижению базовой скорости, что потребовало увеличения высоты оси вращения на 82 %. У двигателей PMSynRM с магнитами NdFeB базовая скорость значительно ниже (около 3300 об/мин), а крутящий момент быстро падает с ростом скорости.

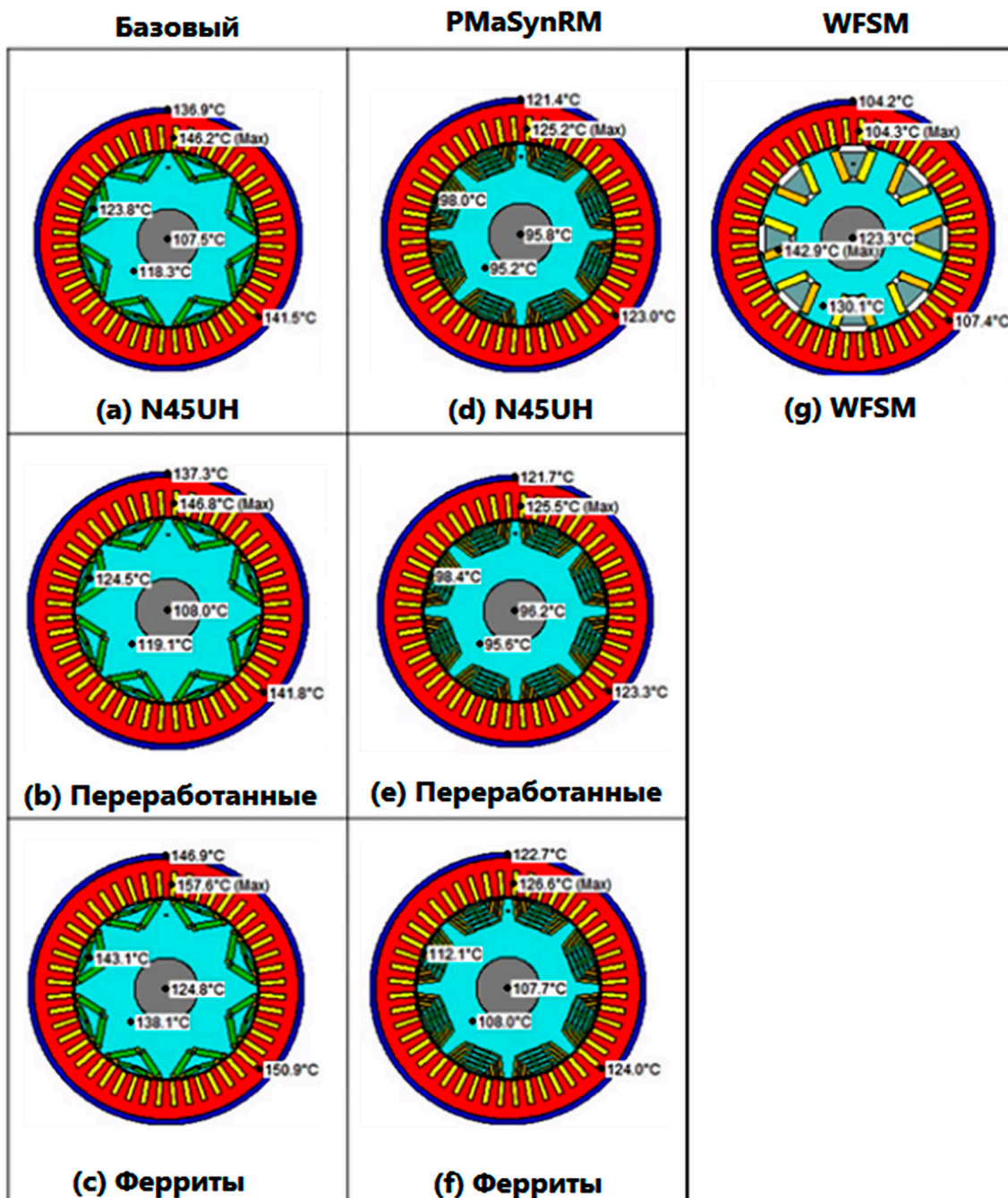


Рис. 2. Сравнение установившихся температур двигателей при 6000 об/мин:
 (a) – Базовый двигатель с магнитами N45UH, (b) – Базовый двигатель с переработанными магнитами, (c) – Базовый двигатель с ферритами, (d) – PМаSynRM с магнитами N45UH, (e) – PМаSynRM с переработанными магнитами, (f) – PМаSynRM с ферритами, (g) – WFSM
 Примечание: составлен авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Аналогичным образом использование ферритов приводит к снижению базовой скорости, причем данный двигатель демонстрирует наиболее выраженное падение момента в режиме ослабления поля. По сравнению с PМаSynRM на первичных магнитах, осевая длина увеличилась на 2,9 % для перера-

ботанных магнитов и на 31 % для двигателей с ферритами. Синхронный двигатель с обмоткой возбуждения (WFSM), имеющий базовую скорость около 3800 об/мин, также показывает резкое падение крутящего момента, но ее характеристики во всем рабочем диапазоне лучше, чем у двигателей PМаSynRM.

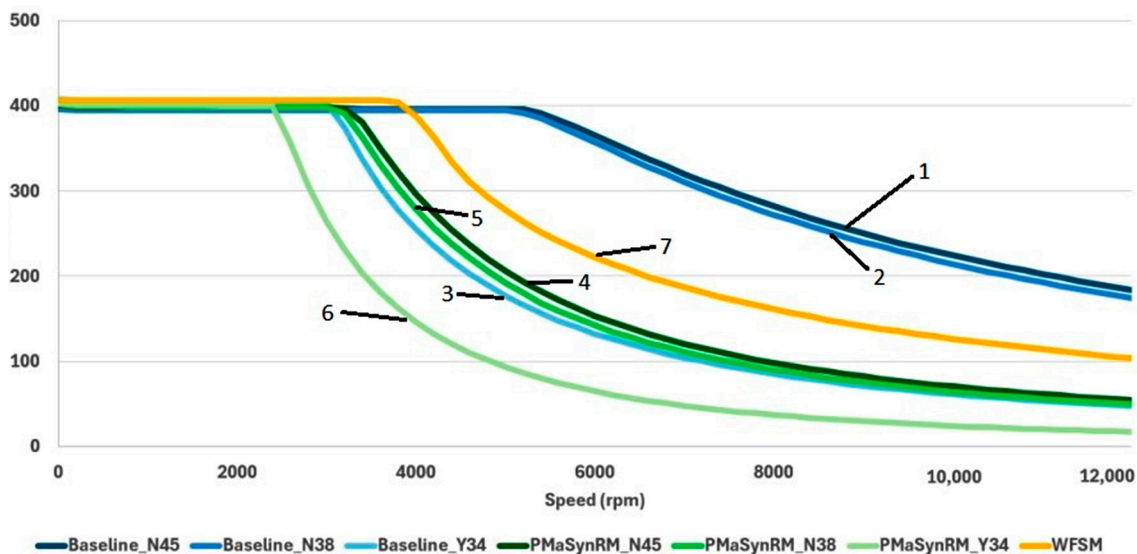


Рис. 3. Максимальный крутящий момент в зависимости от скорости для различных конструкций двигателей и типов магнитов. Кривые: 1 – базовый PMSM (NdFeB); 2 – PMSM с переработанным NdFeB; 3 – PMSM с ферритами; 4 – PMSynRM (NdFeB); 5 – PMSynRM (ферриты); 6 – WFSM (медные обмотки возбуждения)
Примечание: составлен авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 1

Качественное сравнение свойств материалов и практических соображений, касающихся альтернативных магнитных материалов спеченному NdFeB, где «+» означает преимущество, а «-» – недостаток

Материал	Свойства материала	Практические соображения
Переработанный NdFeB	(BH)max < ~95 % Br ~97 %, Hcj ~102 %	стоимость ~70 % от первичного
NdFeB на полимерной основе	(BH)max ~60 % Br ~65 %, Hcj ~55 %	цена ~120 % из-за сложности
Горячеформованный NdFeB	(BH)max ~90 % Br ~98 %, Hcj ~95 %	стоимость ~150 % (малая распространенность)
Нитрид железа (FeN)	(BH)max теоретически до 200 %, реально ~80 %, Hcj ~70 %	без РЗМ, но фазовая нестабильность
Марганец – висмут (MnBi)	(BH)max ~40 %, Br ~50 %, Hcj растет с температурой	без РЗМ, низкая окислительная стойкость
Нитрид самария – железа (SmFeN)	(BH)max ~85 %, Hcj ~120 % (при 150 °C)	содержит самарий (РЗМ), термическая нестабильность

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В табл. 1 суммированы ключевые преимущества и недостатки рассмотренных альтернативных магнитных материалов с точки зрения их магнитных свойств и практических аспектов. Сравнение свойств альтернативных магнитных материалов по отношению к спеченному NdFeB (базовый уровень – 100 %). «+» – преимущество, «-» – недостаток относительно базового материала.

При рассмотрении влияния ферритов и NdFeB на характеристики PMSynRM

результаты согласуются с выводами работ [11, 13]. Использование магнитов NdFeB в PMSynRM привело к более высокой плотности крутящего момента, меньшей пульсации момента, более высокому КПД и меньшей длине пакета по сравнению с ферритами. Более того, двигатель на основе ферритов не смог достичь тех же пиковой и постоянной мощности, что и двигатель с магнитами NdFeB, и для создания того же момента ему потребовались бы большие размеры и вес.

Таблица 2

Преимущества (+) и недостатки (–) альтернативных конструкций двигателя по сравнению с базовым PMSM на магнитах NdFeB (базовый PMSM принимается за 100 % по моменту, КПД, стоимости, массе)

Технология	Производительность двигателя	Практическое применение
PMSynRM	+ момент ~85 %, КПД ~92 % (у PMSM 96 %), пульсации момента выше на 30 %	магнитов PЗМ на 40 % меньше, стоимость ~80 %, масса +15 %
WFMSM	момент ~90 %, КПД на низких оборотах ~82 % (у PMSM 94 %), CPSR широкий	без магнитов, но нужен возбудитель (+20 % к стоимости)
SynRM	момент ~60 %, КПД ~85 %, пульсации момента низкие	стоимость ~50 % от PMSM, но масса +70 %
Новые SRMs	момент ~80 %, КПД ~90 %, но пульсации при малых нагрузках	сложность производства (+30 % цены)
Гибридное возбуждение	момент ~110 %, КПД ~93 %, CPSR широкий	магнитов PЗМ на 50 % меньше, но сложность схемы
CPMs	момент ~95 % от PMSM	магнитов PЗМ на 60 % меньше, малоисследовано
AFMs	момент ~120 %, КПД ~97 %	компактность, но сложность производства (+50 % к цене)

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Дополнительно исследование PMSynRM с ферритами подтверждает вывод о том, что этот двигатель, хотя и намного дешевле, демонстрирует худшие характеристики во всем диапазоне скоростей по сравнению с PMSM [15].

Синхронные реактивные двигатели с постоянными магнитами (PMSynRM) отличаются от более традиционных PMSM тем, что у них больше реактивного момента по сравнению с моментом магнитного выравнивания, что позволяет использовать меньше постоянных магнитов. Реактивный момент создается за счет разницы индуктивности между осями d и q , создаваемой воздушными полостями или магнитными барьерами, которые в PMSM были бы заполнены магнитами. Хотя они предлагают более высокую плотность крутящего момента и коэффициент мощности, чем SynRM, они не могут сравниться по производительности с PMSM [11, 12].

Недавние исследования также изучали синхронные двигатели с обмоткой возбуждения и гибридным возбуждением (HE-WFMSM), комбинирующие редкоземельные постоянные магниты (RE-PM) и обмотку возбуждения на роторе. Эти двигатели обеспечивают повышенную эффективность и плотность крутящего момента, но также страдают от более высоких пульсаций момента и проблем с теплорегулированием. Один из примеров достиг увеличения максимального крутящего момента на 39 % и улучшения эффективности на 4 %, однако сложность массового производства, вероятно, является препятствием [16].

В табл. 2 описаны ключевые преимущества и недостатки рассмотренных альтернативных конструкций двигателя с точки зрения их производительности и практических аспектов.

Заключение

По результатам моделирования и сравнения с базовым PMSM на магнитах NdFeB можно сделать следующие выводы:

1. Ферритовые магниты не могут быть рекомендованы для прямого замещения NdFeB в PMSM без кардинального увеличения габаритов (высота оси +82 %, масса +70 %), что ухудшает массогабаритные показатели и увеличивает износ подшипников. Их применение оправдано только в низкобюджетных, некритичных к массе приводах.

2. Переработанные магниты NdFeB показывают незначительное снижение характеристик (V_{Hmax} ~95 % от первичных), требуют увеличения высоты оси всего на 3,5 % и могут быть рекомендованы как экологичная и экономичная альтернатива после отработки технологий утилизации.

3. Среди альтернативных конструкций двигателей наиболее перспективны для промышленного внедрения:

– WFMSM – полностью без редкоземельных магнитов, с хорошей плотностью момента (до 90 % от PMSM) и широким диапазоном ослабления поля, однако требует решения проблем с КПД на низких оборотах.

– PMSynRM – снижение использования магнитов RE на 40 %, момент и КПД приемлемы (85–90 %), но требуется повышение механической прочности ротора.

– Аксиально-поточковые машины (AFM) – высочайшая плотность момента (до 120 %) и КПД, но сложность серийного производства пока ограничивает их применение.

4. Не рекомендуются на данном этапе:

– чистый SynRM (слишком низкие моменты и КПД);

– ферритовый PМаSynRM (значительное падение характеристик);

– новые SRM с пульсациями момента и сложной технологией.

Перспективы дальнейших исследований: экспериментальная проверка переработанных магнитов в натурном образце; разработка гибридных систем возбуждения с комбинированием ферритов и обмоток.

Список литературы

1. Poudel B., Amiri E., Rastgoufard P., Mirafzal B. Toward Less Rare-Earth Permanent Magnet in Electric Machines: A Review // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2021. Vol. 57. Is. 9. Art. № 900119. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3095615.

2. Yang Y., Walton A., Sheridan R. et al. Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. Vol. 3. P. 122–149. DOI: 10.1007/s40831-016-0090-4.

3. Hioki K. Development of High-Performance Hot-Deformed Neodymium–Iron–Boron Magnets without Heavy Rare-Earth Elements // *Materials*. 2023. Vol. 16. Is. 19. 6581. DOI: 10.3390/ma16196581.

4. Bailey G., Mancheri N., Van Acker K. Sustainability of permanent rare earth magnet motors in (H) EV industry // *J. Sustain. Metall.* 2017. Vol. 3. P. 611–626. DOI: 10.1007/s40831-017-0118-4.

5. Zakotnik Miha. Performance Comparison of Motors Fitted with Magnet-to-Magnet Recycled or Conventionally Manufactured Sintered NdFeB // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.04.034.

6. Kimiabeigi M., Sheridan R. S., Widmer J. D., Walton A., Farr M., Scholes B., Harris I. R. Production and Application of HPMS Recycled Bonded Permanent Magnets for a Traction Motor Application // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017. Vol. 99. DOI: 10.1109/TIE.2017.2762625.

7. Ma Q., El-Refaie A., Lequesne B. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine with Multiple Magnet Types // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2020. Vol. 56. Is. 2. P. 1452–1463. DOI: 10.1109/TIA.2020.2966458.

8. Chai W., Kwon J. W., Kwon B. Analytical Design of a Hybrid-Excited Wound Field Synchronous Machine for the Improvement of Torque Characteristics // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 87414–87421. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993317.

9. Ghosh M. K., Grainger B., McElhinny S., Brody R., Cui J., Sherman A., Ohodnicki P. Multiphysics Design and Optimization of a Rare-Earth Free, Manganese Bismuth Based, Surface Mounted Permanent Magnet Machine // *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. USA, 21–23 June 2023. DOI: 10.1109/ITEC55900.2023.10186907.

10. Rom C. L., Smaha R. W., O'Donnell S., Dugu S., Bauers S. R. Emerging magnetic materials for electric vehicle drive motors // *MRS Bulletin*. 2024. Vol. 49. P. 738–750. DOI: 10.1557/s43577-024-00743-4.

11. Saito T., Yamamoto H., Nishio-Hamane D. Production of Rare-Earth-Free Iron Nitride Magnets (a-Fe16N2) // *Metals*. 2024. Vol. 14. Is. 6. P. 734. DOI: 10.3390/met14060734.

12. Keszler M., Grosswendt F., Assmann A. C., Kregel M., Maccari F., Gutfleisch O., Sebold D., Guillon O., Weber S., Bram M. Direct Recycling of Hot-Deformed Nd–Fe–B Magnet Scrap by Field-Assisted Sintering Technology // *Advanced Energy and Sustainability Research*. 2024. Vol. 5. Is. 1. 2300184. DOI: 10.1002/aesr.202300184.

13. Zheng S., Zhu X., Xiang Z., Xu L., Zhang L., Lee C. H. Technology trends, challenges, and opportunities of reduced-rare-earth PM motor for modern electric vehicles // *Green Energy Intell. Transp.* 2022. 1:100012. DOI: 10.1016/j.geits.2022.100012.

14. Zhang L., Liu X., Ouyang X., Chen W. Characteristic analysis of conventional pole and consequent pole IPMSM for electric vehicle application // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Is. 4. P. 259–269. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.11.023.

15. Park H. J., Lim M. S. Design of High Power Density and High Efficiency Wound-Field Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 46677–46685. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2907800.

16. Rifaq M. S., Midgley W., Steffen T. A Review of the State of the Art of Torque Ripple Minimization Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors // *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2024. Vol. 20. Is. 1. P. 1019–1031 DOI: 10.1109/TII.2023.3272689.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2026-543 от 16.01.2026 по теме «Разработка инновационных компонентов для электромобилей различного климатического исполнения с использованием технологии цифрового двойника».

Financing: The results of the study were obtained with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under state assignment No. 075-03-2026-543 dated January 16, 2026, on the topic “Development of innovative components for electric vehicles of various climates using digital twin technology”.