

Научный обзор

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-676821>

EDN: TPXHSY



Тенденции развития современных электродвигателей: вызовы, сложности и результаты

П.И. Жердев, Р.Ш. Биксалеев, К.Е. Карпухин

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Перспективы отрасли связаны с внедрением инновационных материалов и технологий, а также со снижением зависимости от редкоземельных элементов. Необходима оценка тенденций развития для нахождения решений, связанных с дефицитом редкоземельных материалов, высокими требованиями к энергоэффективности и ограничению по весу и габаритам электрических машин, электрифицированных транспортных средств.

Целью работы является анализ тенденций в развитии современных технологий и опыта в области машиностроения, позволяющих снизить затраты на производство электродвигателей и улучшающих их энергоэффективность.

Материалы и методы. Используемые в статье методы базируются на систематическом литературном обзоре, качественном и метаанализе доступной информации.

Результаты. Выполнен анализ научных трудов по нахождению тенденции в развитии современных тяговых электродвигателей. Предложена экспертно-аналитическая оценка подходов и оптимальных методов, направленных на уменьшение затрат ресурсов на производство электродвигателей для электрифицированных транспортных средств.

Заключение. Перспективы развития электродвигателей связаны с внедрением инновационных материалов и технологий. Активное развитие и внедрение машин с аксиальным магнитным потоком свидетельствует о значительном прогрессе в отрасли, но требует дальнейших исследований и разработок для преодоления существующих ограничений в виде дефицита редкоземельных материалов, а также ограничений, связанных с габаритами и весом изделий.

Ключевые слова: электромобиль; гибридный автомобиль; силовой электропривод; электродвигатель; электрифицированное транспортное средство; энергоэффективность.

Как цитировать:

Жердев П.И., Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е. Тенденции развития современных электродвигателей: вызовы, сложности и результаты // Известия МГТУ «МАМИ». 2025. Т. 19, № 1. С. 422–429. DOI: 10.17816/2074-0530-676821 EDN: TPXHSY

Review

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-676821>

EDN: TPXHSY

Trends in the Development of Modern Electric Motors: Challenges, Difficulties and Results

Pavel I. Zherdev, Rinat Sh. Biksaleev, Kirill E. Karpukhin

Central Scientific and Research Automobile and Automotive Engines Institute NAMI, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The future of the industry is tied to the adoption of innovative materials and technologies, as well as reducing reliance on rare-earth elements. It is essential to assess current trends to address challenges such as the shortage of rare-earth materials, stringent energy efficiency requirements, and constraints on the weight and size of electric machines in electrified vehicles.

AIM: Analysis of trends in modern engineering technologies and practices that allow reducing production costs and enhancing the energy efficiency of electric motors.

METHODS: The research methodology is based on a systematic literature review, qualitative analysis, and meta-analysis of the available data.

RESULTS: Scientific works were analyzed to identify key trends in the development of modern traction electric motors. An expert-analytical assessment of approaches and optimal methods for cost reducing in the production of electric motors for electrified vehicles is proposed.

CONCLUSION: The prospects of electric motors evolution are related to the implementation of innovative materials and technology. The growing development and adoption of axial flux machines demonstrate significant progress in the industry. However, further research is needed to overcome existing limitations, including the shortage of rare-earth materials and constraints related to motor size and weight.

Keywords: electric vehicle; hybrid vehicle; electric powertrain; electric motor; electrified transport; energy efficiency.

To cite this article:

Zherdev PI, Biksaleev RSh, Karpukhin KE. Trends in the Development of Modern Electric Motors: Challenges, Difficulties and Results. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2025;19(1):422–429. DOI: 10.17816/2074-0530-676821 EDN: TPXHSY

Submitted: 04.03.2025

Accepted: 15.05.2025

Published online: 15.05.2025

ВВЕДЕНИЕ

Современные разработчики электродвигателей сталкиваются с дилеммой, которая связана с необходимостью создавать высокоэффективные, компактные и мощные приводы, одновременно преодолевая зависимость от дорогостоящих редкоземельных материалов [1]. Несмотря на активные поиски альтернатив в виде ферритов и новых композитных материалов, научные исследования в этой области остаются недостаточно финансируемыми и фрагментарными, что серьёзно замедляет технологический прогресс в этой области.

Растущие требования к характеристикам электродвигателей электрифицированных транспортных средств (ЭТС) в виде энергоэффективности, точности управления и увеличения удельной мощности вступают в противоречие с ограниченными возможностями существующих материалов и технологий [2]. Производители вынуждены балансировать между стоимостью, производительностью и доступностью компонентов, что делает особенно актуальными фундаментальные исследования в области новых материалов и инновационных конструкторских решений для электроприводов.

ЭЛЕКТРОМОБИЛИ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ НИХ

Зарождение ЭТС началось с двигателей постоянного тока (ДПТ), которые благодаря простоте управления и надёжности стали первыми электродвигателями, применёнными на практике. В 1834 г. русский инженер Борис Семёнович Якоби установил ДПТ на лодку, продемонстрировав первый случай использования электричества для движения транспорта [3]. К концу XIX в. ДПТ стали основой для первых электромобилей, таких как созданный Густавом Труве трёхколёсный экипаж в 1881 г. и четырёхколёсные повозки с электромотором, созданные американцем Уильямом Моррисоном [4]. Несмотря на ограниченный запас хода до 100 км на одной зарядке и скорость около 30 км/ч, эти автомобили пользовались популярностью [5]. Однако в первой половине XX в. такие транспортные средства уступили место бензиновым из-за неразвитой системы управления силовыми агрегатами, начала массового производства автомобилей компанией Ford и повсеместного развития топливной инфраструктуры [6].

Возрождение электрического транспорта началось лишь к концу XX в., когда развитие электротехники привело к появлению более эффективной полупроводниковой электроники. Асинхронные двигатели, изобретённые Николой Теслой в 1888 г. [7], стали применяться в электромобилях благодаря своей надёжности и простоте. Ярким примером стала компания Tesla, которая в 2008 г. выпустила Roadster с асинхронным двигателем (АД), доказав, что электромобили могут обладать высокой динамикой и иметь перспективу для массового производства. Чуть

позже стали доминировать ЭТС с синхронными машинами на постоянных магнитах (СМПМ), которые обладают ещё большей удельной мощностью и меньшими габаритами, а их управление осуществляется с помощью сложных инверторных систем, что обеспечивает высокую энергоэффективность и экологичность такого типа транспорта, а также рост его популярности.

На сегодняшний день согласно исследованиям аналитического агентства Rho Motion, в январе 2025 г. в мире было реализовано около 1,3 млн электромобилей. Несмотря на то, что это на треть ниже рекордного уровня декабря 2024 г., в годовом выражении продажи выросли на 18% [8].

Особого внимания заслуживает китайский рынок, где традиционное снижение продаж после новогоднего бума не помешало сохранить положительную годовую динамику. Рынок Европы и Северной Америки продолжает стабильный рост, подтверждая глобальный тренд на электрификацию транспорта (рис. 1).

В январе 2025 г. Китай подтвердил лидерство на рынке электромобилей, реализовав 700 000 единиц. Европейский союз и Великобритания вместе продали 250 000 электромобилей, тогда как рынок США и Канады достиг показателя в 130 000. Другие регионы мира суммарно реализовали 130 000 электромобилей, продемонстрировав рост на 50% по сравнению с январём 2024 г., хотя и показав небольшое снижение (-4%) относительно декабря 2024 г.

В условиях жёсткой конкуренции на рынке электромобилей ключевым фактором становится выбор оптимального типа электродвигателя. Анализ технических характеристик выявляет существенный разброс параметров различных типов двигателей от доступных асинхронных до высокотехнологичных аксиальных машин с высокими среди остальных показателями удельной мощности до 1500 Вт/кг (табл. 1).

Принципиальное отличие между двигателями заключается в конструкции магнитной системы. В то время, как традиционные радиальные машины создают поток, перпендикулярный оси вращения, в аксиальных конструкциях, получивших развитие в последние два десятилетия, магнитный поток направлен вдоль оси, что обеспечивает их преимущества в компактности и эффективности.

Электродвигатель с АМП, хотя и был первым изобретённым человечеством электродвигателем, стал более активно изучаться и применяться в ЭТС только в последние 20 лет [18]. Это объясняется как тем, что в прошлые столетия инженеры испытывали трудности в обеспечении и налаживании его надёжного серийного производства, так и прогрессом в нынешних производственных технологиях, удешевлением добычи магнитов и более высокой удельной мощностью таких двигателей по сравнению с радиальными аналогами [19].

Согласно исследованиям ресурса IDTechEx Ltd (рис. 2), аксиальные электрические машины демонстрируют наилучшие удельные показатели среди различных типов

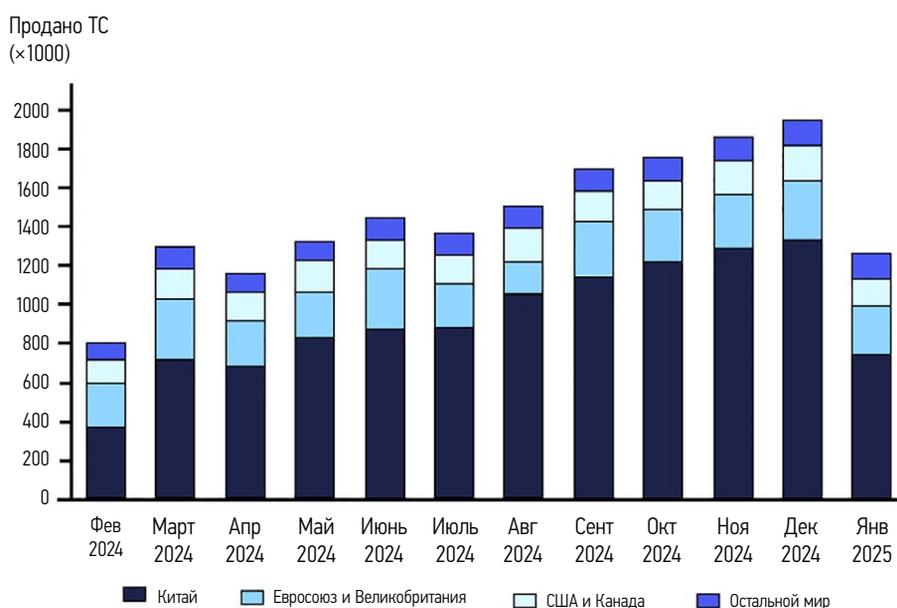


Рис. 1. Актуальные данные о продажах электромобилей в мире.

Fig. 1. Latest data on electric vehicles worldwide sales.

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных типов электродвигателей

Table 1. Data for comparing the characteristics of different types of electric motors

Тип двигателя / Параметр	АД с КЗ ротором	СМПМ	Коллекторный DC	Бесколлекторный DC (BLDC)	СМ с аксиальным потоком
Макс. удельная мощность (Вт/кг)	400–600 [9][10]	800–1200 [11][12]	300–400 [13]	600–1000 [12][14]	1000–1500 [15][16][17]
Удельный крутящий момент (Н·м/кг)	1.0–1.5 [10]	2.0–3.5 [11]	0.8–1.2 [13]	1.5–2.5 [12]	2.5–4.5 [15][16]
КПД (%)	85–93 [9][10]	90–97 [11][12]	75–88 [13]	88–95 [12][14]	92–98 [15][16][17]
Удельная масса (кг/кВт)	2.0–3.0 [9]	0.8–1.5 [11][12]	2.5–3.3 [13]	1.0–1.6 [12]	0.6–1.2 [15][17]
Макс. скорость вращения (об/мин)	до 12 000 [9]	до 20 000 [12][14]	до 6 000 [13]	до 20 000 [12][14]	до 25 000 [15][16][17]
Управляемость	Средняя [9]	Очень высокая [11]	Высокая [13]	Очень высокая [12]	Очень высокая [15][17]
Стоимость (отн.)	Низкая [9]	Высокая [11]	Низкая [13]	Средняя [12]	Высокая [15][16]
Надёжность	Высокая [9]	Высокая [11]	Низкая (щётки) [13]	Высокая [12]	Высокая [15]
Обслуживание	Минимальное [9]	Не требуется [11]	Требуется [13]	Не требуется [12]	Не требуется [15][17]

электродвигателей. Анализ подтверждает их превосходство по ключевым параметрам мощности, момента и энергоэффективности [20].

Электродвигатели с АМП, относящиеся к СМПМ, обладают низким уровнем демпфирования, что исключает их работу непосредственно от сети переменного тока без применения отдельной системы управления. Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что использование векторного регулирования позволяет снизить пульсации электромагнитного момента как в режиме холостого хода, так и при полной механической нагрузке [19].

В современных ЭТС наблюдается устойчивая тенденция ко всё более частому применению аксиальных

двигателей [21]. Основными преимуществами таких машин по сравнению с аналогами являются меньшие габаритные размеры, более высокое отношение электромагнитного момента к массе и увеличенная удельная мощность [22]. Дополнительными достоинствами выступают сниженный расход материалов при производстве статора и ротора [23], а также упрощённая процедура регулировки воздушного зазора между этими элементами.

Сравнительный анализ конструктивных особенностей радиальных и аксиальных машин выявляет существенные различия. В аксиальных конструкциях максимальное количество полюсов и плотность

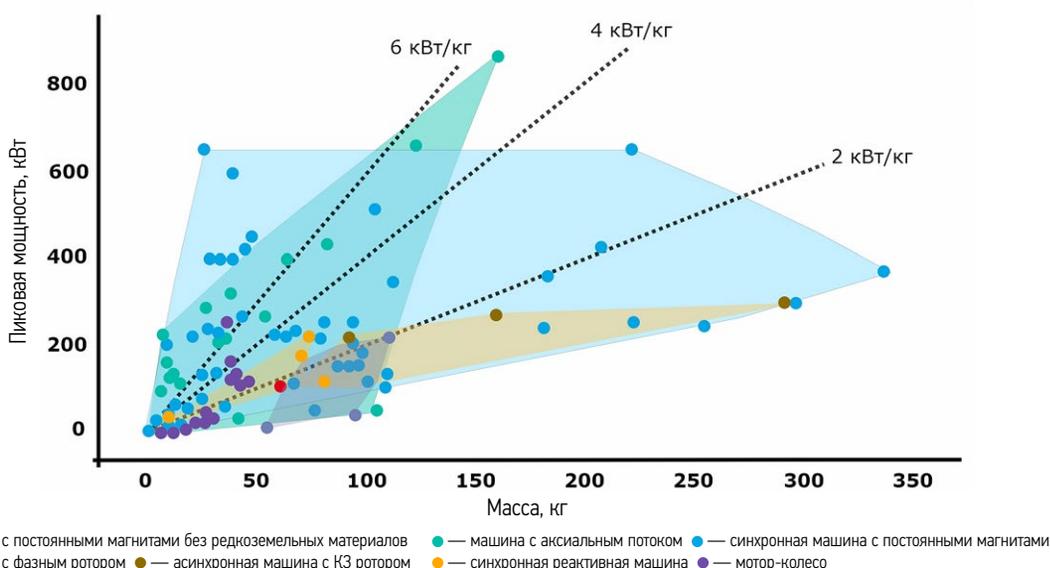


Рис. 2. Удельные показатели разных по исполнению электродвигателей.
Fig. 2. Specific indicators of electric motors with different design.

крутящего момента определяются осевой длиной, в то время как в радиальных двигателях эти параметры не зависят от данного размера. Такая зависимость объясняется тем, что осевая длина аксиальных машин учитывает также толщину яра.

Преимущество электродвигателей с АМП по плотности крутящего момента реализуется при условии пропорционального заполнения пазовых зон обмоточным материалом. Однако необходимо учитывать, что предельное значение плотности момента ограничивается эффектом насыщения зубцов статора. Применение метода конечных элементов позволило установить оптимальные значения осевой длины для различных нагрузочных режимов [24].

В ближайшие десять лет электродвигатели с АМП могут стать безусловным лидером рынка благодаря своим неоспоримым преимуществам перед традиционными решениями. Эти машины демонстрируют рекордные показатели удельной мощности, обеспечивая максимальные показатели энергоэффективности. Их уникальная осевая конструкция позволяет создать более компактные силовые установки, что критически важно для современных электромобилей. При этом технологический потенциал аксиальных двигателей не исчерпан. С развитием новых материалов и автоматизацией производства текущие ограничения по стоимости и доступности будут преодолены. Они не уступают в надёжности АД, а по сравнению с СМПМ предлагают более совершенную конструкцию с упрощённой регулировкой воздушного зазора и меньшим расходом материалов. Именно эти преимущества могут в ближайшем будущем сделать аксиальные машины основным выбором производителей электромобилей, оставив другим типам двигателей для ЭТС узкие нишевые применения.

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Современные тенденции в развитии тяговых электродвигателей для электромобилей сосредоточены на повышении эффективности, снижении зависимости от редкоземельных материалов и использовании передовых технологий проектирования.

1. Рост популярности синхронных машин с постоянными магнитами

СМПМ обладают высокой эффективностью и компактностью. Большинство современных электромобилей используют СМПМ из-за их высокой удельной мощности. Однако они требуют редкоземельных материалов (неодим, диспрозий), что делает их производство зависимым от поставок этих элементов.

Высокий КПД и компактность помогают увеличить запас хода за счёт снижения потерь энергии. Оптимизация пространства внутри автомобиля может позволить использовать более ёмкие батареи или улучшать аэродинамику.

2. Развитие асинхронных двигателей и отказ от редкоземельных магнитов

Некоторые автопроизводители, такие как Tesla, применяют асинхронные двигатели [25]. Они менее эффективны, но не требуют редкоземельных элементов, что снижает производственные риски и затраты.

Независимость от дорогих магнитов способна снизить себестоимость производства электромобилей и повысить устойчивость привода к перегрузкам, что может быть важно для спортивных ЭТС.

3. Переход на технологии, исключая использование редкоземельных магнитов

Данный вопрос стал актуальным в последнее время, ведутся активные исследования по созданию ЭМ без использования редкоземельных материалов.

Варианты замены:

- ферритовые магниты — более доступные, но менее мощные;
- магнитопласты — используют в местах, где требуются магниты определённой формы;
- обмоточные роторные двигатели — используют электромагниты вместо постоянных магнитов;
- радиальные и аксиальные электродвигатели — обеспечивают высокую плотность мощности при меньшем количестве магнитных материалов.

Эффект от исключения использования редкоземельных магнитов заключается в снижении зависимости от монополии основного поставщика и уменьшении экологического следа.

4. Использование передовых материалов в управляющей электронике

Применение карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) в силовых модулях инверторов снижает потери и повышает эффективность на 5–10%, что критично для увеличения запаса хода электромобиля.

Высокая теплостойкость и КПД силовой электроники могут снизить потери энергии и тем самым увеличивать запас хода, а уменьшение размеров силового инвертора позволит создать более компактные электрические приводы.

5. Совершенствование систем охлаждения

Тяговые двигатели подвергаются высоким нагрузкам, поэтому разрабатываются эффективные системы охлаждения, включая:

- жидкостное охлаждение (помимо классического теплосъёма из теплообменника в корпусе электродвигателя, используют непосредственное охлаждение вала ротора, непосредственное охлаждения лобовых частей обмотки, непосредственное охлаждение обмоток);
- масляное охлаждение, интегрированное с редуктором;
- комбинированное охлаждение совместно с воздушным и жидкостным охлаждением.

Эффективный теплосъём при высоких нагрузках может позволить повысить пиковую мощность и продлить срок службы электродвигателя ввиду того, что перегрев является основной из причин деградации материалов, в него входящих.

6. Внедрение цифровых двойников и расчётного ПО

Компьютерное моделирование позволяет проектировать электродвигатели с высокой точностью, снижая время на разработку. Цифровой двойник (Digital Twin) позволяет тестировать конструкцию в виртуальной среде до начала производства.

Моделирование привода до начала производства сокращает время разработки новых моделей ЭТС, а оптимизация таких параметров, как КПД, шум и вибрации,

позволяет обойтись без ряда дорогостоящих физических прототипов изделий.

7. Развитие интегрированных электроприводов (e-Axle)

Интеграция электродвигателя, редуктора и инвертора в единый блок уменьшает потери и снижает вес, что улучшает динамику электромобиля. Компании, такие как Bosch и ZF, активно развивают e-Axle решения [26].

Снижение потерь и компактность помогают увеличить размер полезного пространства багажника или отсека для батарей, улучшать разгонную динамику за счёт снижения массы ЭТС, а также упростить сборку автомобиля, что влечёт за собой снижение себестоимости его производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Будущее тяговых электродвигателей связано с внедрением новых материалов, технологий проектирования и моделирования. Инновационные подходы позволят повысить их эффективность, снизить зависимость от редкоземельных элементов и удешевить производство.

К сложностям в развитии отрасли можно отнести:

- дефицит редкоземельных материалов, используемых в магнитах электродвигателей;
- высокие требования к энергоэффективности и снижению тепловых потерь;
- ограничения по весу и габаритам электродвигателей;
- стоимость производства и интеграции новых технологий.

На сегодняшний день развитие современных электродвигателей идёт по пути создания высокоэффективных, экологически устойчивых и экономически выгодных решений. Основным вектором развития является переход на технологии без использования редкоземельных материалов с применением альтернативных магнитных систем и изменение обмоточных конструкций. Идёт повсеместное внедрение интегрированных модульных решений для снижения массы привода и потерь энергии, применение новых видов полупроводниковых компонентов в силовой электронике и совершенствование систем охлаждения для увеличения надёжности систем. Активное использование цифрового моделирования для ускорения разработки и оптимизации характеристик позволяет помочь разработчикам в сфере автомобилестроения преодолевать основные ограничения в проектировании, которые в основном связаны с дефицитом материалов для создания приводов, тепловыми потерями и высокой стоимостью производства ЭТС при параллельном улучшении энергоэффективности и массогабаритных показателей электроприводов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. П.И. Жердев — проведение анализа и исследований, обработка результатов, написание текста статьи; П.Ш.

Биксалеев — формулирование целей, задач исследования, руководство научным проектом, участие в обсуждении материалов статьи, редактирование статьи; К.Е. Карпукhin — научное руководство, формулирование основных направлений анализа, планирование исследований, редактирование статьи, участие в обсуждении материалов статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. неприменимо.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-71-00015, <https://rscf.ru/project/24-71-00015/>.

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения, помимо данных, на которые даны библиографические ссылки.

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Tuan NK, Karpukhin KE, Terenchenko AS, Kolbasov AF. World Trends in the Development of Vehicles with Alternative Energy Sources. *ARPN Journal of engineering and applied sciences*. 2018;13(7):2535–2542. CODEN: JEASHK
2. Terenchenko AS, Karpukhin KE, Shorin AA, Sklyarinskiy SF. Optimization of losses in traction asynchronous motor as a part of combined power plant. *Scientific, technical and industrial journal «Vestnik Mashinostroeniya»*. 2014;12–14. (In Russ.) EDN: UYZOVF
3. Leonard TC. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. 3rd ed. Hoboken: Wiley; 2014. 672 p.
4. Mom G. *The Electric Vehicle: Technology and Expectations in the Automobile Age*. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 2004. 416 p.
5. Mom G. *The Electric Vehicle: Technology and Expectations in the Automobile Age*. New Brunswick: Rutgers University Press; 2000. 320 p.
6. Sperling D, Gordon D. *Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability*. Oxford: Oxford University Press; 2009. 368 p.
7. Carlson WB. *Tesla: Inventor of the Electrical Age*. Princeton: Princeton University Press; 2013. 520 p.
8. Global EV sales grow by 18% in 2025 vs 2024. [internet] Accessed: 27.02.2025. Available from: <https://rhomotion.com/news/global-ev-sales-grow-by-18-in-2025-vs-2024/>
9. Boldea I, Nasar SA. *Electric Drives*. CRC Press; 2010. 472 p.
10. Fitzgerald AE, Kingsley C, and Umans SD. *Electric machinery*. 5th ed. McGraw-Hill. New York; 2003. 620 p.
11. Krishnan R. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press; 2017. 584 p.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: P.I. Zherdev: conducting analysis and research, processing results, writing the text of the article; R.Sh. Biksaleev: formulation of research goals, objectives, management of a scientific project, participation in the discussion of the materials of the article, editing the article; K.E. Karpukhin: scientific guidance, formulation of the main directions of analysis, research planning, editing the article, participation in the discussion the materials of the article. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-71-00015, <https://rscf.ru/project/24-71-00015/>.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

12. Hanselman DC. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. 2nd ed. Magna Physics Publishing; 2006. 408 p.
13. Hughes A. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. 4th ed. Newnes; 2013. 384 p.
14. Infineon Technologies. BLDC Motor Control Overview. Infineon Technologies, 2020. [internet] Accessed: 23.05.2025. Available from: <https://www.infineon.com>
15. Magnax NV. Axial Flux Motor Technology Whitepaper. Magnax, 2022. [internet] Accessed: 23.05.2025. Available from: <https://www.magnax.com>
16. YASA Motors Ltd. Technical Specifications and Whitepapers. YASA, 2021. [internet] Accessed: 23.05.2025. Available from: <https://www.yasamotors.com>
17. Tuma J, Novak M, Prokop J. Axial Flux vs. Radial Flux Motors for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021;57(6):6198–6207. doi: 10.1109/TIA.2021.3105216
18. Oliver B. An Innovative EV Motor Used by Lamborghini, McLaren, and Ferrari Is Being Mass-Produced by Mercedes. WIRED. [internet] Accessed: 28.02.2025. Available from: <https://www.wired.com/story/yasa-motors-mercedes-axial-flux-2024/>
19. Malyshev AV. Modeling the vector control system of the axial flux permanent magnet motor. *Scientific and technical journal «Izvestia Transsiba»*. 2023;53(1):121–130. (In Russ.) EDN: GUCPVR
20. Edmondson J, Siddiqi S, Takahashi M. Electric Motors for Electric Vehicles 2025–2035: Technologies, Materials, Markets, and Forecasts. IDTechEx Ltd. [internet] Accessed: 28.02.2025. Available from: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors-for-electric-vehicles-2025-2035-technologies-materials-markets-and-forecasts/1031>

- 21.** Havel A, Sobek M, Stepanec L, Strossa J. Optimization of Permanent Magnet Parameters in Axial Flux Rotary Converter for HEV Drive. *Energies*. 2022;15(3):724. doi: 10.3390/en15030724
- 22.** Celik E, Gor H, Ozturk N, Kurt E. Application of artificial neural network to estimate power generation and efficiency of a new axial flux permanent magnet synchronous generator. *Int. J. Hydrog. Energy*. 2017;42(28):17692–17699. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.168
- 23.** Polat M, Yildiz A, Akinci R. Performance Analysis and Reduction of Torque Ripple of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor Manufactured for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2021;57(7):1–9. doi: 10.1109/TMAG.2021.3078648
- 24.** Nakahara A, Deguchi K, Kikuchi S, Enomoto Y. Comparative electrical design of radial-and axial-flux permanent magnet synchronous machines

- under space limitation. *International Conference on Electrical Machines (ICEM) IEEE*. 2014;422–428. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960215
- 25.** Chumakov KA. Electric motors using the example of Tesla Model S: Advantages and disadvantages. *XXVII Agro-industrial Forum of the South of Russia*. 2024;131–135. (In Russ.) doi: 10.23947/interagro.2024.131-134
- 26.** Automotive E-Axle Market Research Covering Growth Analysis and Industry Trends with Forecast 2032. [internet] Accessed: 01.03.2025. Available from: <https://contentengine.llc.com/2024/02/18/automotive-e-axle-market-research-covering-growth-analysis-and-industry-trends-with-forecast-2032-dana-incorporated-gkn-robert-bosch-gmbh-schaeffler-ag-zf-friedrichshafen-ag/>

ОБ АВТОРАХ

* Жердев Павел Игорьевич,

инженер-конструктор 1 категории Центра «Электронные устройства»;
адрес: Россия, 125438, Москва, ул. Автомоторная, д. 2;
ORCID: 0009-0004-1002-0256;
eLibrary SPIN: 2857-7951;
e-mail: pavel.zherdev@nami.ru

Биксалеев Ринат Шакирович,

канд. техн. наук,
ведущий инженер Научно-образовательного центра;
ORCID: 0009-0004-0199-9394;
eLibrary SPIN: 5186-4044;
e-mail: rinat.biksaleev@nami.ru

Карпухин Кирилл Евгеньевич,

канд. техн. наук, доцент,
директор проектов Центра «Управление проектами»;
ORCID: 0000-0002-6192-7817;
eLibrary SPIN: 8926-2694;
e-mail: kirill.karpukhin@nami.ru

AUTHORS' INFO

* Pavel I. Zherdev,

1st grade design engineer of the Electronic Devices Center;
address: 2 Avtomotornaya st, Moscow, Russia, 125438;
ORCID: 0009-0004-1002-0256;
eLibrary SPIN: 2857-7951;
e-mail: pavel.zherdev@nami.ru

Rinat Sh. Biksaleev,

Cand. Sci. (Engineering),
lead engineer of the Scientific and Educational Center;
ORCID: 0009-0004-0199-9394;
eLibrary SPIN: 5186-4044;
e-mail: rinat.biksaleev@nami.ru

Kirill E. Karpukhin,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Project Director of the Project Management Center;
ORCID: 0000-0002-6192-7817;
eLibrary SPIN: 8926-2694;
e-mail: kirill.karpukhin@nami.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author