Студенческий научный электронный журнал
StudArctic Forum

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Т. 11, № 1. С. 32–39 **Машиностроение** **2026**

Научная статья
УДК 621.3.04

ТИШКЕВИЧ
Артём Александрович

магистратура, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Россия),
artemfin18@gmail.com

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТОВ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Научный руководитель:
Янюк Юлия Вячеславовна
Рецензент:
Кузьменков Александр Алексеевич
Статья поступила: 10.03.2026;
Принята к публикации: 29.03.2026;
Размещена в сети: 29.03.2026.

Аннотация. В статье рассмотрены материалы для изготовления постоянных магнитов, их сплавы и соединения, свойства магнитов для электродвигателей, характеристики электродвигателя с магнитами из редкоземельных металлов и ДВС такой же мощности. Представлена разработка внутриколёсного электродвигателя с внешним ротором с постоянными магнитами. Исследование нацелено на обоснование преимуществ редкоземельных магнитов в конструкции электродвигателей для улучшения их эксплуатационных характеристик. Работа может быть полезна для научного сообщества и для практиков, занимающихся разработкой электродвигателей.

Ключевые слова: постоянный магнит, магнитная сила, электродвигатель, крутящий момент, ДВС

Для цитирования: Тишкевич А. А. Преимущества использования магнитов из редкоземельных металлов в конструкции электродвигателей // StudArctic Forum. 2026. Т. 11, № 1. С. 32–39.

Электродвигатели с постоянными магнитами получают в настоящее время широкое распространение в различных отраслях благодаря их эффективности, компактности и точности управления. Это связано с применением материалов (самарий-кобальт, неодим и др.) для постоянных магнитов, обладающих большой удельной магнитной энергией и развитием технологий управления. Основная цель данной работы заключается в исследовании преимуществ использования таких магнитов в конструкциях электродвигателей, что представляет собой актуальную проблему с учётом растущих требований к энергоэффективности и компактности. Важность данной темы обусловлена необходимостью повышения производительности электродвигателей в современном производстве и на транспорте. В рамках работы рассмотрены следующие задачи: анализ магнитных и физических свойств редкоземельных магнитов на предмет их использования в условиях работы электродвигателей, исследование их эффективности по сравнению с традиционными магнитами, сравнение эффективности электродвигателя с магнитами из редкоземельных материалов с ДВС такой же мощности.

Методология исследования включает теоретический анализ на основании данных из открытых источников, сравнительные расчёты параметров существующего ДВС и разрабатываемого электродвигателя, создание и описание 3D-модели внутриколёсного электродвигателя, что позволит получить комплексное представление о преимуществах использования этих материалов.

* * * * *

Многие исследователи считают синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) самыми перспективными с точки зрения энергоэффективности, их можно выполнять с классом энергоэффективности IE4 (супер-премиум класс по европейскому стандарту). Преимущества СМПМ: высокий КПД, хороший график зависимости n=f(M) при частотном регулировании и высокие динамические характеристики; менее требовательны эти машины к обслуживанию, имеют длительный срок службы, низкий уровень шума, возможность выполнения сверхскоростными и ультраскоростными, обладают высокими массогабаритными показателями, при частотном регулировании не требуют обязательного применения обратной связи по положению ротора [Шумов: 46].

Электродвигатель с постоянными магнитами – это устройство, преобразующее электрическую энергию в механическое вращательное движение благодаря взаимодействию магнитных полей. Магниты из редкоземельных материалов способны генерировать наиболее сильные магнитные поля, и позволяют двигателям работать с повышенной эффективностью и мощностью, что даёт возможность их успешного использования в различных технических устройствах.

В двигателях электромобилей используются неодимовые магниты, обеспечивающие необходимую мощность и крутящий момент для движения[1]. Многие промышленные машины, такие как конвейеры, насосы, используют неодимовые магниты для эффективной и надежной работы. Мощные магнитные поля, создаваемые неодимовыми магнитами, необходимы для выработки электроэнергии ветротурбинами. Для двигателей БПЛА выбирают синхронные двигатели с постоянными магнитами, обладающие высокой плотностью мощности, компактными размерами и малым весом[2].

Использование современных постоянных магнитов в электродвигателях дает следующие преимущества.

- Более высокая эффективность: постоянные магниты в бесколлекторных двигатели постоянного тока (BLDC) способствуют повышению эффективности преобразования энергии, что приводит к повышению производительности и снижению энергопотребления по сравнению с коллекторными двигателями[3].
- Компактный дизайн: использование постоянных магнитов позволяет уменьшить и облегчить конструкцию двигателя, что делает двигатели BLDC подходящими для конструкций, где важны ограничения по пространству и весу.
- Возможности с высоким крутящим моментом и скоростью: двигатели BLDC с постоянными магнитами могут развивать более высокий крутящий момент и работать в широком диапазоне скоростей.

При выборе постоянных магнитов для бесколлекторных двигателей постоянного тока необходимо учитывать следующие факторы: магнитная сила, термостойкость и устойчивость к внешним воздействиям. Высококачественные редкоземельные неодимовые и самариево-кобальтовые магниты обладают превосходной магнитной силой, что способствует повышению общей производительности двигателя.

Рабочая температура двигателя может повышаться с ростом нагрузки. Температурная стабильность магнита важна для конструкций, требующих работы при высоких температурах. Самарий-кобальтовые магниты, например, обладают хорошей температурной стабильностью и могут работать при температурах до 350° С и стойкостью к размагничиванию в отличие от ферритовых. Они обладают естественной коррозионной стойкостью и минимальным температурным коэффициентом -0,02 до -0,04° С. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с NdFeB, SmCo магниты незаменимы в аэрокосмической и военной технике.

Возможность намагничивания (ферромагнитные свойства) зависят от атомной структуры, веществ и распределения электронов по орбитам. Например, железо (Fe): его порядковый номер 26 в таблице Менделеева равен количеству электронов на орбитах. Электроны по его орбиталям (s, p, d и f) распределяются по энергетическим уровням так, что образуется 4 неспаренных электрона на d-орбитали. Они и наделяют вещество способностью намагничиваться[4].

Кроме железа, подобной структурой обладают:

- кобальт (№ 27);
- никель (№ 28);
- некоторые вещества из группы редкоземельных металлов (лантаноиды № 57-71): например, гадолиний (№ 64) и тербий (№ 65) — наш неодим имеет № 60;
- различные сплавы из перечисленных выше веществ, но не только: некоторые сплавы могут иметь в составе слабо магнитящиеся вещества (парамагнетики), при этом являясь хорошими ферромагнетиками — речь идет о сплавах Гейслера.

Сила намагничивания и притяжения неодимового магнита намного больше, чем у ферритового. Если сравнить два абсолютно одинаковых по размеру магнита из разных сплавов, сила сцепления у неодимового будет больше более чем в 10 раз[5]. Для достижения таких параметров у двигателя с ферритами необходимо увеличить в 3,3 раза объём пространства, куда устанавливаются магниты, что приведёт к увеличению массы используемого магнитного материала в 1,63 раза [Сафин: 44]. Кроме того, срок службы ферритовых магнитов меньше: их магнитные свойства постепенно утрачиваются и полностью исчезают примерно через 10 лет.

Редкоземельные магниты на основе неодима-железа-бора (NdFeB) и самария-кобальта (SmCo) представляют собой вершину развития технологии постоянных магнитов. Магниты NdFeB демонстрируют рекордные значения энергетического произведения до 450 кДж/м³, что в 10–15 раз превышает показатели ферритовых магнитов того же объёма.

В основе работы современных электродвигателей с постоянными магнитами лежит взаимодействие магнитных полей статора и ротора, приводящее к возникновению электромагнитного момента. Ключевое отличие от традиционных электродвигателей заключается в том, что магнитное поле ротора создается не электрическим током в обмотке возбуждения, а постоянными магнитами, что исключает потери на возбуждение и повышает общий КПД, достигающий 97,5 %. Высокая эффективность во многом объясняется устранением потерь в роторе и оптимизированной конструкцией магнитной цепи. Для сравнения, асинхронные двигатели с КПД 90–93 % менее эффективны и более громоздкие, что делает их менее привлекательными для массового внедрения в электромобилях.

Конструктивно двигатель с постоянными магнитами (ДПМ) состоит из следующих основных элементов[6]:

- статор – неподвижная часть, включающая магнитопровод (обычно шихтованный из электротехнической стали) и обмотки, создающие вращающееся магнитное поле при питании от источника переменного тока или преобразователя частоты;
- ротор – вращающаяся часть, содержащая постоянные магниты, размещенные на поверхности или встроенные в сердечник ротора;
- подшипниковые узлы – обеспечивают вращение ротора с минимальным трением;
- корпус – защищает внутренние компоненты и обеспечивает механическое крепление;
- система охлаждения – предотвращает перегрев двигателя (в зависимости от типа может быть естественное или принудительное охлаждение).

Электромагнитный момент M ДПМ можно выразить формулой $M=k\Phi I$, где k – конструктивный коэффициент, Ф – магнитный поток, создаваемый постоянными

магнитами, I – ток в обмотке статора.

Современные электродвигатели оснащены высокоточными системами управления. Это позволяет регулировать скорость и момент с высокой точностью, обеспечивая оптимальную эффективность работы [Саляхиев: 317].

Управление электродвигателем может осуществляться с помощью контроллера – электронного устройства, которое регулирует поток электричества к статору внутриколёсного электродвигателя, причём каждый из внутриколёсных электродвигателей транспортного средства может управляться отдельно, в соответствии с задаваемой траекторией движения машины.

Перераспределение момента между приводными колесами средствами автоматизированного электропривода позволяет повысить управляемость и безопасность транспортного средства [Осадчий: 71].

Рассмотрим применение двигателей с постоянными магнитами в сравнении с двигателями внутреннего сгорания, используемые в транспортных средствах. Решая задачи снижения массы транспортного средства за счёт отказа от тяжёлых агрегатов трансмиссии, а также увеличения полезного объёма кузова, электродвигатели располагаются непосредственно внутри каждого колеса. Двигатель внутреннего сгорания развивает максимальный крутящий момент только при достаточно высоких оборотах, что требует установки коробки передач или подобной автоматической трансмиссии. Рассматриваемый электродвигатель обладает крутящим моментом с самых низких оборотов и поддерживает его практически во всём диапазоне частоты вращения, необходимой для движения транспортного средства. Наглядно это показывают графики крутящего момента двигателей одинаковой мощности ДВС и электрического с постоянными магнитами. Графики приведены на рисунках (1) и (2).

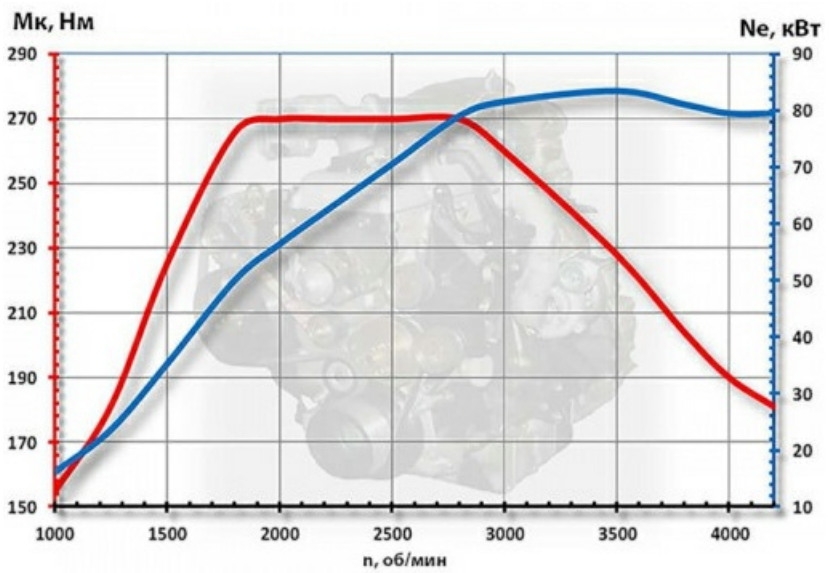

Рис. 1. Графики изменения крутящего момента и мощности ДВС [7]

Двигатель внутреннего сгорания достигает максимального крутящего момента начиная только с 2000 оборотов в минуту. Обладание высоким крутящим моментом с самых низких оборотов даёт электродвигателю с постоянными магнитами неоспоримое преимущество.

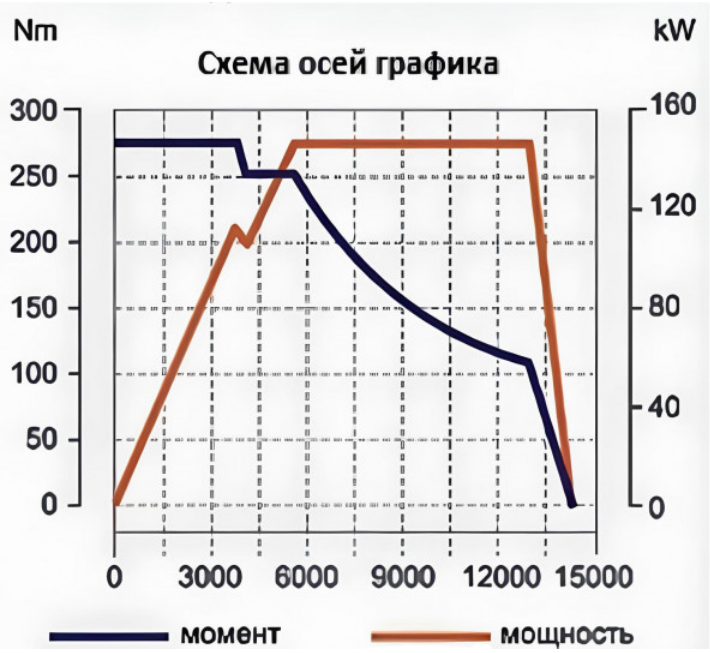

Рис. 2. Графики изменения крутящего момента и мощности электродвигателя [8]

В Петрозаводском государственном университете разработан внутриколёсный электродвигатель для полноприводного четырёхколёсного транспортного средства с четырьмя внутриколёсными электродвигателями. Мощность 4-х электродвигателей соответствует мощности двигателя экспортного варианта полноприводного автомобиля ВАЗ 21215 со следующими техническими характеристиками[9]:

- максимальная мощность – 48 кВт (69 л. с.) при 4600 об/мин;
- максимальный крутящий момент – 121 Нм при 2200 об/мин.

С учётом передаточных чисел и кпд трансмиссии:

$M_{кол} = M_{дв} \cdot i_{КП4} \cdot i_{РК} \cdot i_{ГП} \cdot \eta$,

где $M_{кол}$ – момент на колёсах автомобиля;

$i_{КП4}$ – передаточное число 4-й передачи;

$i_{РК}$ – передаточное число раздаточной коробки;

$i_{ГП}$ – передаточное число главной передачи;

η – КПД трансмиссии;

$M_{кол} = 121 \cdot 1 \cdot 1{,}2 \cdot 3{,}9 \cdot 0{,}88 \approx 500$ Н м

Для обеспечения заданной мощности и крутящего момента используются 4 электродвигателя мощностью

N =12 кВт х 4 = 48 кВт и крутящим моментом

M =1000 Нм х 4 = 4000 Нм. Заметное преимущество перед ДВС для начала движения, движения с минимальными скоростями, в том числе по пересечённой местности и для интенсивного разгона.

Устройство внутриколёсного электродвигателя с внешним ротором с постоянными магнитами можно рассмотреть на 3D-модели двигателя, разработанного в Петрозаводском государственном университете.

Статор изготавливается наборным из пластин трансформаторной стали и жёстко соединяется через барабан с неподвижной осью, вокруг которой вращаются в подшипниках ступицы с болтами крепления колеса, и тормозным диском, соединённые двумя крышками с внешним ротором с постоянными магнитами (рисунки 3 и 4). Модель выполнена в программе Компас-3D [Тишкевич: 361].

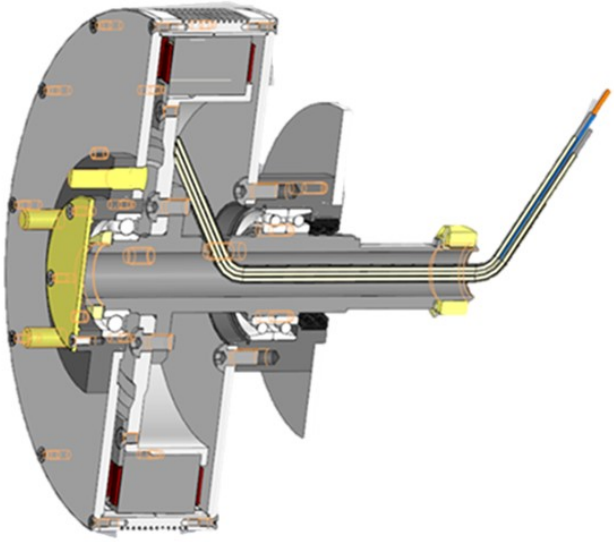

Рис. 3. Разрез мотора. 3D-модель автора

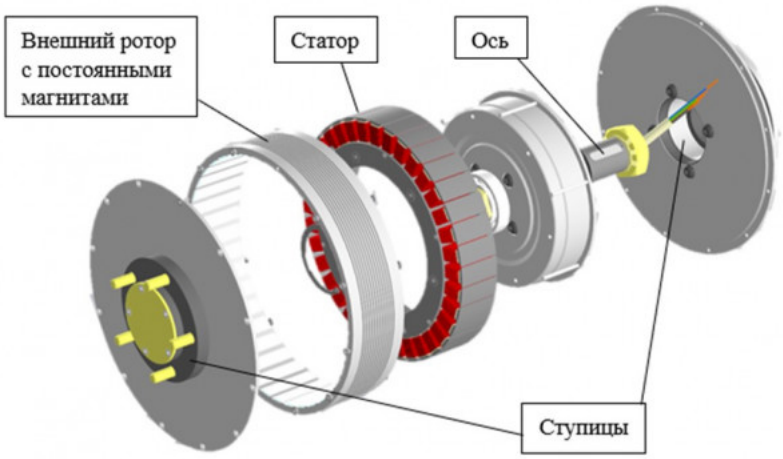

Рис. 4. Сборочные единицы и детали мотора [Тишкевич: 361]

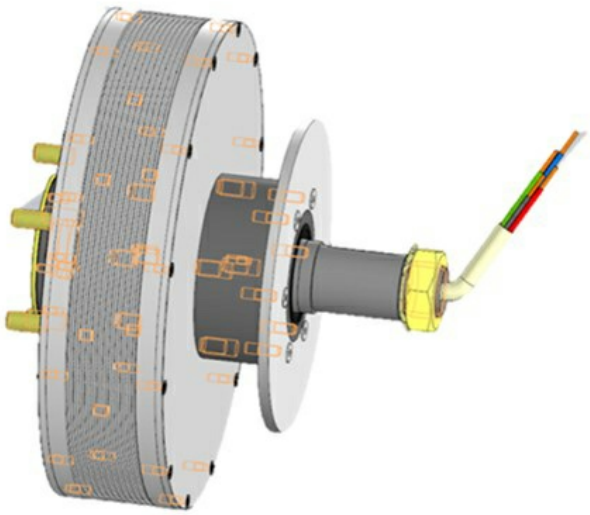

Рис. 5. Общий вид [Тишкевич: 361]

Мощность данного электродвигателя – 12 кВт при средних 100 об/мин, крутящий момент 1000 Нм с самых низких оборотов, напряжение питания 96 В.

* * * * *

В результате работы были изучены материалы для изготовления постоянных магнитов, их сплавы и соединения, рассмотрены свойства современных постоянных

магнитов и области их применения. Выявлены преимущества постоянных магнитов из редкоземельных материалов по сравнению с ферритовыми магнитами, преимущества электродвигателя с внешним ротором с постоянными магнитами по сравнению с асинхронными электродвигателями, а также с ДВС такой же мощности. Представлен разработанный в Петрозаводском государственном университете внутриколёсный электродвигатель для транспортных средств. Результаты работы могут быть использованы при проектировании современных электродвигателей.

Примечания

[1] Мощность неодимовых магнитов в двигателях // Magnets.ru: инф. сайт. 2025, 25 декабря. URL: https://magnets.ru/article/moshhnost-neodimovyx-magnitov-v-dvigateliax (дата обращения 22.02.2026).

[2] *Луйи Ши*. Неодимовые магниты в двигателях дронов // Tengye: инф. сайт. 2024, 13 декабря. URL: https://tymagnets.com/ru/неодимовые-магниты-в-двигателях-дронов/ (дата обращения 22.02.2026).

[3] *Джона Джин*. Революционная эффективность: двигатели BLDC и сила постоянных магнитов // Tengye: инф. сайт. 2023, 19 марта. URL: https://tymagnets.com/ru/революционная-эффективность-двигателей-bldc-и-мощность-постоянных-магнитов/ (дата обращения 28.02.2026).

[4] *Klimensky*. Изобретение неодимового магнита: как Масато Сагава и Джон Кроат изменили современный мир // Хабр: инф. сайт. 2023, 21 июля. URL: https://habr.com/ru/companies/vstack/articles/748864/ (дата обращения 16.02.2026).

[5] Борьба магнитов: ферритовый VS неодимовый // Дзен: инф. сайт. 2019, 28 декабря. URL: https://dzen.ru/a/Xgce8V1sSwCy20h2 (дата обращения 20.02.2026).

[6] Двигатели с постоянными магнитами: характеристики и перспективы // Inner engineering: инф. сайт. 2025, 9 апреля. URL: https://inner.su/articles/dvigateli-s-postoyannymi-magnitami/?ysclid=mlxollbqcp510322786 (дата обращения 22.02.2026).

[7] *Дикарев А.Ю*. BMW X2 – крутим бензиновые и дизельные моторы // Drive2.ru: инф. сайт. 2023, 11 ноября. URL: https://www.drive2.ru/l/660967018064787372/ (дата обращения 28.02.2026).

[8] Мотоциклы ДВС и BLDC на одном графике мощности и момента (ИЖ vs QS 273 \ QS 138) // Электротранспорт: инф. сайт. 2021, 8 февраля. URL: https://electrotransport.ru/index.php?topic=63079.0 (дата обращения 28.02.2026).

[9] Технические характеристики и габариты НИВА 21213; 21214; 2131 // Niva-Lada 4x4: сайт. 2016, 22 марта. URL: https://niva-lada4x4.ru/tehnicheskie-harakteristiki-i-gabarity-niva-21213-21214-2131.html (дата обращения 28.02.2026).

Список литературы

Осадчий В.В. Структура системы управления 4-х приводной силовой установкой для электрических транспортных средств / В.В. Осадчий, Е.С. Назарова, В.В. Брылистый // Проблемы региональной энергетики. 2019. № S1-2(41). С. 65-73. DOI: 10.5281/zenodo.3239150

Саляхиев Р.Р. Современные направления развития систем электропривода в сфере электромобилей / Р.Р. Саляхиев, И.И. Вильданов // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ (Казань, 5–6 декабря 2023 года). Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. С. 315-318.

Сафин А.Р. Моделирование двигателя электромобиля для оценки эффективности замены редкоземельных на ферритовые магниты / А.Р. Сафин, Ю.Р. Кадырмятов, Т.И. Петров, В.Р. Басенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2025. Т. 25, № 4. С. 39-46. DOI: 10.14529/power250405

Тишкевич А.А. Проект управляемого внутриколёсного электродвигателя с внешним ротором // Научно-исследовательская работа обучающихся и молодых учёных: мат-лы 77-й Всеросс. научной конф. обучающихся и молодых учёных, посв. 85-летию ПетрГУ и 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Петрозаводск: ПетрГУ, 2025. С. 359-362.

Шумов Ю.Н. Энергосберегающие электрические машины (обзор зарубежных разработок) / Ю.Н. Шумов, А.С. Сафонов // Электричество. 2015. № 4. С. 45-57.

Artem A. TISHKEVICH	master's degree, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russia), artemfin18@gmail.com

BENEFITS OF USING RARE EARTH MAGNETS IN ELECTRIC MOTORS DESIGN

Scientific adviser:
Yulia V. Yanuk
Reviewer:
Aleksandr A. Kuzmenkov
Paper submitted on: 03/10/2026;
Accepted on: 03/29/2026;
Published online on: 03/29/2026.

Abstract. The article discusses materials used for manufacturing permanent magnets, alloys and compounds of these materials, as well as the properties of magnets intended for electric motors. The characteristics of an electric motor with magnets made of rare earth metals and an internal combustion engine of the same power are compared. The article presents a design of an internal-wheeled electric motor with an external rotor with permanent magnets is presented. The study aims to identify and substantiate the advantages of using rare earth magnets in electric motors design for potential improvement of their performance characteristics. The findings can be useful both for scientific community and technicians involved in electric motors development and production.

Keywords: permanent magnet, magnetic force, electric motor, torque, internal combustion engine

For citation: Tishkevich, A. A. Benefits of Using Rare Earth Magnets in Electric Motors Design. StudArctic Forum. 2026, 11 (1): 32–39.

References

Osadchyy V.V., Nazarova E.S., et al. Control system structure of the 4th drive power installations. *Problems of the Regional Energetics*, 2019, No. 1-2 (41), pp. 65-73. DOI: 10.5281/zenodo.3239150 (In Russ.)

Salyakhiev R.R., Vildanov I.I. Contemporary trends in the development of electric drive systems for electric vehicles. *XXVII All-Russian postgraduate and master's scientific seminar dedicated to the Power Engineer's Day and the 55th anniversary of KSPEU (Kazan, December 5–6, 2023)*. Kazan, Kazan State Power Engineering University, 2023, pp. 315-318. (In Russ.)

Safin A.R., Kadyrmyatov Yu.R., et al. Modelling an electric vehicle motor to assess the efficiency of replacing rare earth magnets with ferrite magnets. *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2025, Vol. 25, No. 4, pp. 39-46. DOI: 10.14529/power250405 (In Russ.)

Tishkevich A.A. Project of a controlled in-wheel electric motor with an external rotor. *Research work of students and young scientists: proceedings of the 77th All-Russian (with international participation) scientific conference of students and young scientists dedicated to the 85th anniversary of PetrSU and the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War*, Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2025, pp. 359-362. (In Russ.)

Shumov Yu.N., Safonov A.S. Energy-saving electric machines (a review of foreign developments). *Electricity*, 2015, No. 4, pp. 45-57. (In Russ.)