

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ  
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.333  
DOI 10.17816/transsyst20239244-56

© А.А. Лисов, А.Г. Возмилов, Н.Ю. Кулева, А.И. Согрин, Р.А. Закиров,  
Р.Ю. Илимбетов  
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)  
(Челябинск, Россия)

## ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

**Цель:** выбор тягового электродвигателя для грузового электротранспорта, работающего в условиях Арктики.

**Методы:** Для решения поставленной цели были рассмотрены основные характеристики существующих видов электродвигателей постоянного и переменного тока, а также приведены данные об использовании того или иного типа двигателей в современном электротранспорте.

**Результаты:** Сравнительный анализ наиболее распространенных двигателей привел к 2 основным лидерам – синхронному двигателю с постоянными магнитами (СДПМ) и асинхронному двигателю (АД). Оба типа двигателей в полной мере подходят для решения поставленной цели. Однако, как выяснилось в последствии СДПМ чаще применяется для легкового транспорта, в то время как АД в большинстве случаев используется для более тяжелого транспорта.

**Заключение:** В результате анализа было решено, что для электротранспорта, работающего в условиях Арктики, наиболее оптимальным вариантом в качестве тягового электродвигателя стоит использовать асинхронный двигатель.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, электротранспорт специального назначения, Арктика.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS  
Field – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov, A.G. Vozmilov, N.Yu. Kuleva, A.I. Sogrin, R.A. Zakirov,  
R.Yu. Ilimbetov  
South Ural State University (NRU)  
(Chelyabinsk, Russia)

## SELECTION OF A TRACTION ELECTRIC MOTOR FOR ARCTIC ELECTRIC TRANSPORT

**Aim:** selection of a traction motor for electric freight transport operating in the Arctic.

**Methods:** To achieve this aim, the main characteristics of existing types of DC and AC electric motors were considered, as well as data on the use of one or another type of motor in modern electric vehicle.

**Results:** A comparative analysis of the most common motors has led to 2 main leaders - a permanent magnet synchronous motor (PMSM) and an induction motor (IM). Both types of motors are fully suitable for solving the aim. However, as it turned out later, PMSM is more often used for light vehicles, while IM in most cases is used for heavier vehicles.

**Conclusion:** As a result of the analysis, it was decided that for electric transport operating in the Arctic, the best option is to use an induction motor as a traction motor.

**Key words:** traction electric motor, special-purpose electric transport, Arctic.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают транспортные средства (ТС), которые в своем составе имеют тяговый электропривод (ТЭП). Электротранспорт стал бурно развиваться не только из-за экономических и экологических причин, но и благодаря развитию аккумуляторных батарей (АКБ), увеличения емкости АКБ и скорости их зарядки, уменьшению массогабаритных показателей и стоимости. Электромобили могут применяться как в городской среде, так и вне ее. Решение транспортных задач вне городской среды часто связано с передвижением в районах со слаборазвитой или разрушенной дорожной сетью [1–3]. При эксплуатации ТС по дорогам общего пользования, снежной целине или по местности с грунтами со слабой несущей способностью ТЭП, например, служит дополнительным источником механической энергии, увеличивающим крутящий момент колес необходимый для преодоления препятствий и подъемов.

В нашем случае, разрабатываемая в рамках комплексного проекта по разработке высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации колесная машина высокой проходимости «Арктический автопоезд с транспортируемым функциональным модулем» имеет в своем составе активный привод, состоящий из генератора, накопителя электрической энергии и электрического двигателя для привода ведущего моста.

Работа электродвигателя грузового транспорта в Арктических условиях представляет особые вызовы из-за экстремально низких температур, сильных ветров, а также наличия снега и льда. Для обеспечения надежной работы электродвигателя в таких условиях следует учитывать следующие специфические требования.

*Термическая защита.* Электродвигатель должен быть способен работать в широком диапазоне температур, включая экстремально низкие значения (до минус 50 °C).

*Защита от влаги, коррозии и льда.* В Арктической зоне влажность и наличие льда являются обычными явлениями. Влажная и соленая атмосфера Арктики может вызывать коррозию и повреждения электродвигателя.

*Сопротивление вибрации.* Грузовой транспорт в Арктике сталкивается с неровностями дорог и другими сложными условиями, которые могут привести к сильным вибрациям.

*Низкая мощность пуска.* Желательно, чтобы двигатель имел как можно меньший пусковой ток для экономии заряда АКБ.

*Энергоэффективность.* В условиях Арктики доступ к энергии может быть ограниченным. Поэтому электродвигатель должен быть энергоэффективным, чтобы снизить потребление электроэнергии и обеспечить более длительное время работы от ограниченного источника энергии.

Кроме того, не менее важными показателями являются желательна низкая стоимость, высокая надежность и высокий КПД в широком диапазоне скоростей [4–6].

## ОБЗОР ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На Рис. 1 приведены различные типы тяговых двигателей переменного и постоянного тока, которые потенциально могут быть применены в качестве тяговых для ТС. В связи с развитием силовых электронных коммутационных устройств и аппаратных средств стало возможным применение в качестве тяговых машины с дискретной коммутацией [7–11].

Данные машины обычно ассоциируются с двумя основными типами: бесщеточными двигателями постоянного тока (БДПТ) и вентильными реактивными электродвигателями (ВРД) [7, 8]. Машины этой категории работают по принципу машин постоянного тока, но с коммутацией при помощи специального инвертора [10].

### *Двигатели постоянного тока*

У двигателей данного типа очень простой механизм регулирования скорости, который может быть реализован посредством обычной широтно импульсной модуляции (ШИМ) [12]. Ранее за счет наличия простого принципа регулирования скорости и малой развитости полупроводниковой техники они были широко распространены в электрифицированной транспортной отрасли, в частности, для трамваев и троллейбусов [7, 8]. Однако наличие щеточно-коллекторного узла делает работу двигателей постоянного тока менее надежной и невозможной без периодического обслуживания, поэтому данное решение не будет оптимальным для ТС,

находящихся в сложных климатических условиях. Кроме того, эти двигатели довольно громоздки, обладают низким КПД, низкой надежностью (из-за щеточно-коллекторного узла), и имеют низкую удельную мощность [13–17]. Поэтому применение двигателей данного типа не рекомендуется как для современного легкого электротранспорта, так и для грузового, в том числе специального назначения, работающего в условиях Арктики.

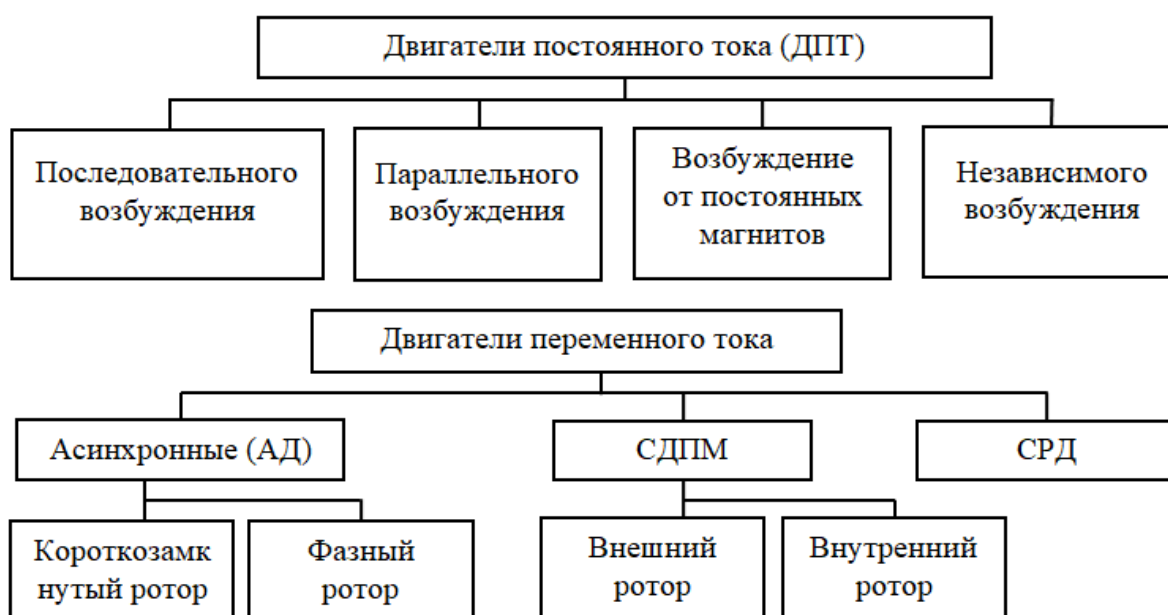


Рис 1. Тяговые двигатели постоянного и переменного тока для ТС

Источник: составлено авторами

### *Асинхронные двигатели*

Асинхронные двигатели (АД) являются одними из наиболее широко используемых тяговых двигателей благодаря своим ключевым характеристикам, таким как низкая цена, низкие требования к обслуживанию и простота подключения при наличии трехфазной сети питания [5, 7, 8, 16–19]. В АД потери в меди ротора зависят от скольжения двигателя. Высокоэффективные АД предназначены для работы с величиной скольжения менее 3 %, что дает меньшие потери в сердечнике ротора [20].

Стоит отметить, что конкуренцию асинхронным двигателям составляют синхронные двигатели с постоянными магнитами из-за наличия у последних более высокой удельной мощности, высокого КПД и меньших потерь в роторе. Еще одним недостатком асинхронных двигателей является наличие нелинейной механической характеристики, которая сильно подвержена влиянию величины питающего напряжения как показано на Рис. 2. Если применить к двигателям данного типа требования, предъявленные к электротранспорту, работающему в Арктических

условиях, то он сможет удовлетворить большинству из них, кроме пункта о низкой мощности пуска.

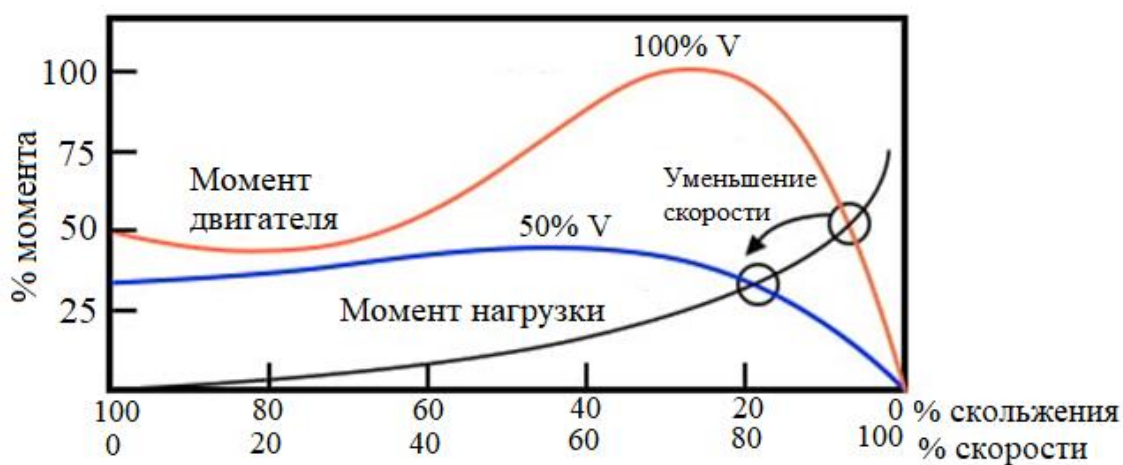


Рис. 2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Источник: составлено авторами

### *Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ)*

У двигателей данного типа на роторе находятся постоянные магниты и при помощи датчиков Холла, а также системы управления с силовыми ключами (инвертора) происходит переключение обмоток статора, которое создает вращающееся магнитное поле, за которым следует ротор двигателя. Постоянные, в особенности редкоземельные, магниты обеспечивают высокую удельную мощность, небольшой вес и объем двигателя, а также высокую эффективность работы за счет снижения потерь в роторе [21]. Также эти двигатели обладают достаточной жесткостью естественной характеристики (Рис. 3) и относительной линейностью характеристик, по сравнению с асинхронным двигателем (Рис. 2).

Основными особенностями СДПМ являются:

- высокая эффективность и компактность за счет использования высокоэнергетических постоянных магнитов [15, 22];
- легкость охлаждения за счет отсутствия тока у ротора, нагревающейся частью является только статор [22];
- низкие эксплуатационные расходы, большой срок службы и надежность за счет отсутствия щеток и механических коммутаторов [8, 23];
- низкий уровень шума, поскольку не требуются механические щетки или контактные кольца [8, 22].

Данные двигатели имеют самый высокий КПД среди всех двигателей, доступных сегодня [21, 24]. Однако стоит отметить некоторые недостатки, которые включают в себя высокую стоимость из-за присутствия

редкоземельных магнитов, которые также могут размагничиваться под действием высоких температур [8, 20, 22] и обязательное наличие полупроводникового инвертора.

Данный тип двигателей с одной стороны отлично подходит для целей Арктического транспорта, но с другой он намного дороже АД.

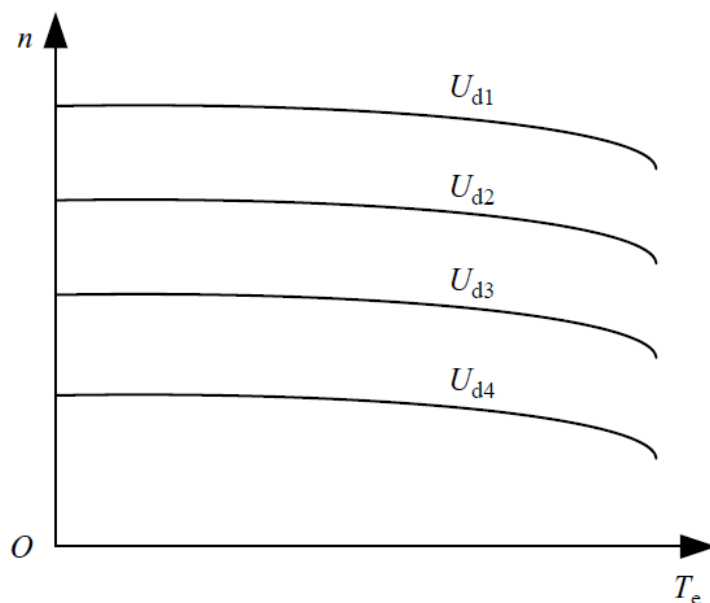


Рис. 3. Механическая характеристика BLDC-двигателя с постоянными магнитами ( $U_{d1} > U_{d2} > U_{d3} > U_{d4}$ )

Источник: [21]

### *Вентильный реактивный электродвигатель (ВРД)*

Ротор и статор ВРД выполнены в виде пакетов листов магнитомягкого материала. На роторе ВРД отсутствуют обмотки и постоянные магниты. Фазные обмотки находятся только на статоре. Для уменьшения трудоемкости изготовления катушек обмотки статора могут изготавливаться отдельно, а затем надеваться на полюсы статора. Простота изготовления позволяет достичь высокой надежности, устойчивости к рабочим температурам и высокого диапазона скоростей [25]. Режим постоянной мощности может быть увеличен до 6–7 раз от базовой скорости [26]. Характеристики СРД в основном зависят от конструкции полюсов ротора и требуют некоторого компромисса между постоянной мощностью и постоянным крутящим моментом [27].

Конструкция и основные варианты использования ВРД хорошо объяснены в [28, 29], из этих же исследований можно выделить несколько особенности данных двигателей:

- простая конструкция ротора без использования магнитов или обмоток, что отлично подходит для высокоскоростных приложений,



относительно легко охлаждается и обладает нечувствительностью к высокой температуре окружающей среды;

- невысокая цена (на уровне асинхронных двигателей).

Стоит отметить, что разработка и управление ВРД довольно сложна и как в случае с СДПМ невозможна без использования специального инвертора и датчиков положения ротора. Сильное влияние также оказывает насыщение наконечников полюсов и краевой эффект полюсов и пазов [8]. Шум, пульсация крутящего момента и вибрация являются основными проблемами этих двигателей, особенно на высоких скоростях, поскольку работа основана на последовательном возбуждении диаметрально противоположных обмоток статора.

На низкой скорости шум в основном возникает из-за резонансов, вызванных пульсацией крутящего момента, и может быть уменьшен путем соответствующего профилирования форм сигналов фазового тока [27]. При высокой скорости вращения этот шум возникает из-за резонансов радиальной вибрации [30].

Если сравнивать с ранее приведенными двигателями, то явного преимущества для электротранспорта специального назначения, он не имеет. Поэтому для принятия окончательного решения следует подробнее рассмотреть АД и СДПМ.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АД И СДПМ

Выбор тягового электродвигателя основывается на нескольких факторах, включая ограничения транспортного средства, эксплуатационные требования и тип источников энергии [1, 8, 31, 32]. При проектировании привода электромобиля необходимо учитывать следующие моменты:

- тип напряжения питания тягового двигателя и способ управления им;
- максимальные возможности по скоростным характеристикам и диапазону уровней напряжения и тока в системе;
- количество тяговых электродвигателей и одно- или многоступенчатой трансмиссии в гибридной системе;
- тип накопителя энергии и его максимальная энергоемкость.

Если опираться на результаты исследований [13, 14, 18, 33], то можно прийти к выводу, что в общем случае для современного электротранспорта по удельным показателям мощности, цены, надежности и сложности управления наиболее лучшим образом подходят ранее рассмотренные АД и СДПМ.

Поскольку однозначный ответ в выборе двигателя не был получен, то на основе исследований [34–38] была составлена Табл. 1, отображающая тип двигателя, используемого в качестве тягового для легкового электротранспорта, для тяжелых кроссоверов и коммерческих

микроавтобусов и, наконец для автобусов и грузовых транспортных средств.

Из данных в Табл. 1 видно очевидное преобладание СДПМ - двигателей для легковых седанов и хетчбэков, в то время как на тяжелых кроссоверах уже чаще применяется асинхронный двигатель специального исполнения. Для коммерческого транспорта, такого как автобусы, а также для тяжелых грузовых транспортных средств в абсолютном большинстве используется асинхронный двигатель.

Таблица 2. Тяговые двигатели, применяемые для электромобилей и гибридов

Производитель	Модель	Тяговый двигатель
Nissan	Tino, Leaf, Altra	СДПМ
Honda	Insight, Accord, Civic	СДПМ
Toyota	Prius C & V	СДПМ
Toyota	Highlander, Avalon	СДПМ
Toyota	Camry	СДПМ
Ford	Fusion SE Hybrid	СДПМ
Ford	C Max Hybrid SEL	СДПМ
Hyundai	Blueon	СДПМ
Chevrolet	Volt & Energi	СДПМ
Renault	Kangoo	АД
Chevrolet	Silverado	АД
Daimler Chrysler	Durango	АД
Tesla	Roadster	АД
Honda	Fit EV	АД
Toyota	Reva4	АД
REVA	NXR	АД
Ford	Focus Electric	АД
Ford	Transit Connect	АД
GM	EV1	АД
BMW	X5	АД
Volkswagen	e-Crafter	СДПМ
Volvo	FM Electric (грузовик)	АД
ЛиАЗ	ЛиАЗ-6274.20 «e-Citymax 18» (автобус)	АД
КАМАЗ	КАМАЗ-6282 (автобус)	АД
VolgaBus	Ситиритм 12 ELF	АД

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, сравнительный анализ наиболее распространенных двигателей привел к двум основным лидерам – синхронному двигателю с постоянными магнитами и асинхронному двигателю.

Как было сказано ранее, тяговый электропривод, работающий в тяжелых арктических условиях, должен обладать рядом защит от внешних условий и высокой ремонтпригодностью. Оба типа двигателей в полной мере подходят для данных задач в виду возможности исполнения закрытого корпуса и простоты конструкции.



Обзор применяемых в электротранспорте двигателей показал, что СДПМ чаще применяется для легкового транспорта, в то время как асинхронный двигатель используется для более тяжелого транспорта.

Вышеперечисленные факты, а также более привлекательная цена позволяют заключить, что для поставленной цели наиболее оптимальным вариантом в качестве тягового электродвигателя стоит использовать асинхронный двигатель.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации» с использованием мер государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по Соглашению №075-11-2021-058 от 25.06.2021г. (Идентификатор государственного контракта 000000S407521QLY0002) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и Акционерным обществом «Автомобильный завод «УРАЛ» в кооперации с Главным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». НИОКТР выполнен в организации Главного исполнителя НИОКТР.

**Авторы заявляют, что:**

1. у них нет конфликта интересов;
2. настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Chan CC, Bouscayrol A, Chen K. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. IEEE transactions on vehicular technology. 2009;2;59(2):589-98. doi: 10.1109/TVT.2009.2033605

2. Ehsani M, Rahman KM, Toliyat HA. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 1997 Feb;44(1):19-27. doi: 10.1109/41.557495
3. Boldea I, Tutelea LN, Parsa L, Dorrell D. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014 Jan 21;61(10):5696-711. doi: 10.1109/TIE.2014.2301754
4. Hashemnia N, Asaei B. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. In 2008 18th International Conference on Electrical Machines 2008 Sep 6 (pp. 1-5). IEEE. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157
5. Zeraoulia M, Benbouzid ME, Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular technology*. 2006 Nov 13;55(6):1756-64. doi: 10.1109/TVT.2006.878719
6. Yildirim M, Polat M, Kürüm H. A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. In 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition 2014 Sep 21 (pp. 218-223). IEEE. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715
7. Finch JW, Giaouris D. Controlled AC electrical drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008 Jan 31;55(2):481-91. doi: 10.1109/TIE.2007.911209
8. Ehsani M, Gao Y, Emadi A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. CRC press; 2003.
9. Vas P. Sensorless vector and direct torque control. Oxford,[Eng.]; New York: Oxford University Press; 1998.
10. Abu-Rub H, Iqbal A, Guzinski J. High performance control of AC drives with Matlab/Simulink. John Wiley & Sons; 2021 Apr 6.
11. Leonhard W. Controlled AC drives, a successful transition from ideas to industrial practice. *Control Engineering Practice*. 1996 Jul 1;4(7):897-908. doi: 10.1016/0967-0661(96)00087-1
12. Gupta V. Working and analysis of the H-bridge motor driver circuit designed for wheeled mobile robots. In 2nd International Conference on Advanced Computer Control 2010 Mar 27. 2010;3:441-444. IEEE. doi: 10.1109/ICACC.2010.5486818
13. Chang L. Comparison of AC drives for electric vehicles-a report on experts' opinion survey. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 1994;9(8):7-11. doi: 10.1109/62.311235
14. Zeraoulia M, Benbouzid ME, Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular technology*. 2006;13;55(6):1756-64. doi: 10.1109/62.311235
15. Chan CC. An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*. 1993;81(9):1202-13. doi: 10.1109/5.237530
16. De Santiago J, Bernhoff H, Ekergård B, Eriksson S, Ferhatovic S, Waters R, Leijon M. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on vehicular technology*. 2011;61(2):475-84. doi: 10.1109/TVT.2011.2177873
17. Lungoci CM, Georgescu M, Calin MD. Electrical motor types for vehicle propulsion. In 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2012 May 24. 2012:635-640. IEEE. doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231985

18. Chan CC. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2002;90(2):247-75. doi: 10.1109/5.989873
19. Pellegrino G, Vagati A, Boazzo B, Guglielmi P. Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. *IEEE Transactions on industry applications*. 2012 Nov 15. 2012;48(6):2322-32. doi: 10.1109/TIA.2012.2227092
20. Bilgin B, Emadi A. Electric motors in electrified transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system. *IEEE Power Electronics Magazine*. 2014 Jun 23. 2014;1(2):10-7. doi: 10.1109/MPEL.2014.2312275
21. Miller TJ, Rabinovici R. Back-EMF waveforms and core losses in brushless DC motors. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. 1994 May 1. 1994;141(3):144-54. doi: 10.1049/ip-epa:19941080
22. Emadi A, editor. *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. CRC press; 2017 Dec 19.
23. Nian X, Peng F, Zhang H. Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014 Jan 14. 2014;61(10):5798-808. doi: 10.1109/TIE.2014.2300059
24. Jahns TM. Motion control with permanent-magnet AC machines. *Proceedings of the IEEE*. 1994 Aug. 1994;82(8):1241-52. doi: 10.1109/5.301686
25. Kiyota K, Sugimoto H, Chiba A. Comparing electric motors: An analysis using four standard driving schedules. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2014 Apr 23. 2014;20(4):12-20. doi: 10.1109/MIAS.2013.2288380
26. Rahman KM, Fahimi B, Suresh G, Rajarathnam AV, Ehsani M. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. *IEEE transactions on industry applications*. 2000 Jan. 2000;36(1):111-21. doi: 10.1109/28.821805
27. Zhu ZQ, Howe D. Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2007 Apr 30. 2007;95(4):746-65. doi: 10.1109/JPROC.2006.892482
28. Miller TJ, editor. *Electronic control of switched reluctance machines*. Elsevier; 2001 May 18.
29. Miller TJ. Switched reluctance motors and their control. 1993 Jan.
30. Cameron DE, Lang JH, Umans SD. The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1992 Nov. 1992;28(6):1250-5. doi: 10.1109/28.175275
31. Rajashekara K. Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*. 2013 Apr 23. 2013;1(1):3-10.
32. Hesla E. Electric propulsion [history]. *IEEE Industry applications magazine*. 2009 Jun 12. 2009;15(4):10-3.
33. Kumar L, Jain S. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Jan 1. 2014;29:924-40. doi: 10.1016/j.rser.2013.09.014
34. Возмилов А.Г., Урманов В.Г., Лисов А.А., Илимбетов Р. Ю. Разработка и моделирование пропорционально-интегрального регулятора для электронного дифференциала электротрактора сельскохозяйственного назначения // Вестник Башкирского Государственного Аграрного Университета. – 2022. – №. 2(62). – С. 119–124. [Vozmilov AG, Urmanov VG, Lisov AA, Ilimbetov RYu. Development and simulation of the proportional and integral regulator for the

- electronic differential of an electric farm tractor. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2022;2(62):119-124 (Russ., Engl.]. doi: 10.31563/1684-7628-2022-62-2-119-124
35. Gozálvarez J, Sepulcre M, Bauza R. IEEE 802.11 p vehicle to infrastructure communications in urban environments. *IEEE Communications Magazine*. 2012 May 7. 2017;50(5):176-83. doi: 10.1109/MCOM.2012.6194400
36. Kenney JB. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States. *Proceedings of the IEEE*. 2011 Jun 16. 2011;99(7):1162-82. doi: 10.1109/JPROC.2011.2132790
37. Maddox J, Sweatman P, Sayer J. Intelligent vehicles+ infrastructure to address transportation problems—a strategic approach. In 24th international technical conference on the enhanced safety of vehicles (ESV) 2015 Jun.
38. Конев В.В., Карнаухов Н.Н., Мерданов Ш.М., Половников Е.В. Электрический привод строительно-дорожных машин // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 3(101). – С. 65–73. [Konev VV, Karnaukhov NN, Merdanov ShM, Polovnikov EV. Electric drive of road construction machines. *Architecture, Construction, Transport*. 2022;3(101):65-73. (In Russ.)]. doi: 10.31660/2782-232X-2022-3-65-73

**Сведения об авторах:**

**Лисов Андрей Анатольевич**, аспирант;

eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

**Возмилов Александр Григорьевич**, профессор, д.т.н;

eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;

E-mail: vozmiag@rambler.ru

**Кулева Надежда Юрьевна**, научный сотрудник;

eLibrary SPIN: 2385-8383; ORCID: 0000-0002-6609-1115;

E-mail: kulevani@susu.ru

**Согрин Андрей Игоревич**, доцент, к.т.н;

eLibrary SPIN: 8424-0573; ORCID: 0000-0001-7042-3664;

E-mail: sogrinai@susu.ru

**Закиров Рамиль Агзамович**, доцент, к.т.н;

eLibrary SPIN: 6877-0902; ORCID: 0009-0002-8330-1062;

E-mail: zakirovra@susu.ru

**Илимбетов Рафаэль Юрикович**, доцент, к.т.н;

eLibrary SPIN: 8465-5500; ORCID: 0000-0003-1634-9242;

E-mail: ilimbay@yandex.ru

**Information about the authors:**

**Andrey A. Lisov**, postgraduate student;

eLibrary SPIN 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

**Alexander G. Vozmilov**, Professor, Doctor of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;  
E-mail: vozmiag@rambler.ru

**Nadezhda Yu. Kuleva**, Research associate;  
eLibrary SPIN: 2385-8383; ORCID: 0000-0002-6609-1115;  
E-mail: kulevani@susu.ru

**Andrey I. Sogrin**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 8424-0573; ORCID: 0000-0001-7042-3664;  
E-mail: sogrinai@susu.ru

**Ramil A. Zakirov**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 6877-0902; ORCID: 0009-0002-8330-1062;  
E-mail: zakirovra@susu.ru

**Rafael Yu. Ilimbetov**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 8465-5500; ORCID: 0000-0003-1634-9242;  
E-mail: ilimbay@yandex.ru

#### **Цитировать:**

Лисов А.А., Возмилов А.Г., Кулева Н.Ю. и др. Выбор тягового электродвигателя для Арктического электротранспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 44–56. doi: 10.17816/transsyst20239244-56

#### **To cite this article:**

Lisov AA, Vozmilov AG, Kuleva NYu, et al. Selection of a traction electric motor for Arctic electric transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):44-56. doi: 10.17816/transsyst20239244-56