

УДК 621.313.333.2

**АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В
ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ ПРОБЛЕМЫ И БУДУЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ****Альмохамад Али,**

магистрант,

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), РФ, г. Москва

e-mail: almohamad1994@yandex.ru

Юшкевич Устинья Кирилловна,

аспирант,

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), РФ, г. Москва

e-mail: uyk567@gmail.com

Аннотация

Рассмотрено применение асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в электромобилях, их преимущества, проблемы и будущие тенденции. Освещается проблема недостаточной эффективности асинхронных двигателей и предложены новые методы ее улучшения. Исследуется роль прогнозирующих моделей в управлении частотой вращения асинхронного двигателя в электромобилях и повышении эффективности.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, короткозамкнутый ротор, электромобили, эффективность, управление, прогнозирующие модели, тяговый электропривод, энергоэффективность.

**SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS IN ELECTRIC VEHICLES
CHALLENGES AND FUTURE TRENDS****Almohamad Ali,**

Master's student,

Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Russian Federation, Moscow

e-mail: almohamad1994@yandex.ru

Yushkevich Ustinya Kirillovna,

postgraduate student,

Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Russian Federation, Moscow

e-mail: uyk567@gmail.com

ABSTRACT

Application of squirrel cage induction motors in electric vehicles, their advantages, problems and future trends are considered. The problem of insufficient efficiency of induction motors is highlighted and new methods of its improvement are proposed. The role of predictive models in controlling induction motor speed in electric vehicles and improving efficiency is investigated.

Keywords: induction motors, squirrel cage rotor, electric vehicles, efficiency, control, predictive models, traction electric drive, energy efficiency.

Введение

Расширение спектра возможностей экономии топлива в автотранспортных средствах (АТС) отрасли и улучшение экологической ситуации стимулируют создание новых форм альтернативного топлива. Использование современных видов транспортных средств (ТС), таких как электромобили, является эффективным способом решения данных проблем. Электромобили обладают значительными преимуществами в плане безопасности, излучаемого шума и экологической чистоты по сравнению с автомобилями с двигателями внутреннего сгорания.

В настоящее время в мире внимание уделяется разработке и производству электрических транспортных средств (ЭТС) с характеристиками, подобным традиционным автомобилям. Одним из приоритетных направлений развития электроэнергетического комплекса является создание большегрузного и пассажирского транспорта на электрической тяге. Для такого вида транспорта необходимо наличие электрического тягового привода с определенными основными характеристиками такими как:

- высокая мгновенная мощность;
- высокая удельная мощность;
- высокий крутящий момент на низких скоростях для пуска и подъема;
- широким диапазоном скоростей, включая области постоянного крутящего момента и постоянной мощности;
- высокой эффективностью в широком диапазоне скоростей и крутящего момента;
- высокой эффективностью рекуперативного торможения;
- высокой надежностью и безотказностью при различных условиях эксплуатации транспортного средства;
- разумной стоимостью.

Поэтому выбор правильного тягового электропривода (ЭП) и метода управления являются ключевыми факторами в электромобилях, кроме того, эффективное управление энергопотреблением также играет важную роль

Преимущества и недостатки асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель успешно применялся во многих электромобилях, особенно в начале их производства, например, в Tesla Model S 2012 и в Model X 2015 [5-6], благодаря Диапазон скоростей АД шире и более доступен по сравнению с двигателями на постоянных магнитах, так как магнитное поле АД полностью создаётся электромагнитной индукцией, что исключает необходимость учёта размагничивания В постоянных магнитах (ПМ) при изменении скорости[8]. из-за своей простой конструкции, надёжности, устойчивости к

отказам, минимальным требованиям к обслуживанию, низкой стоимости и способности работать в сложных условиях окружающей среды [4, 6-9]. Управление характеристикой «крутящий момент - скорость», как показано на рисунке 1, можно осуществлять с помощью векторных методов управления, разделяя управление крутящим моментом и магнитным полем. Диапазон скоростей можно расширить, ослабляя поток в области постоянной мощности. обладает отличной способностью к перегрузке, обеспечивая максимальный крутящий момент на низких скоростях при максимальном токе инвертора. [6-9] Таким образом, АД стал экономически выгодным решением для двигателей электромобилей.

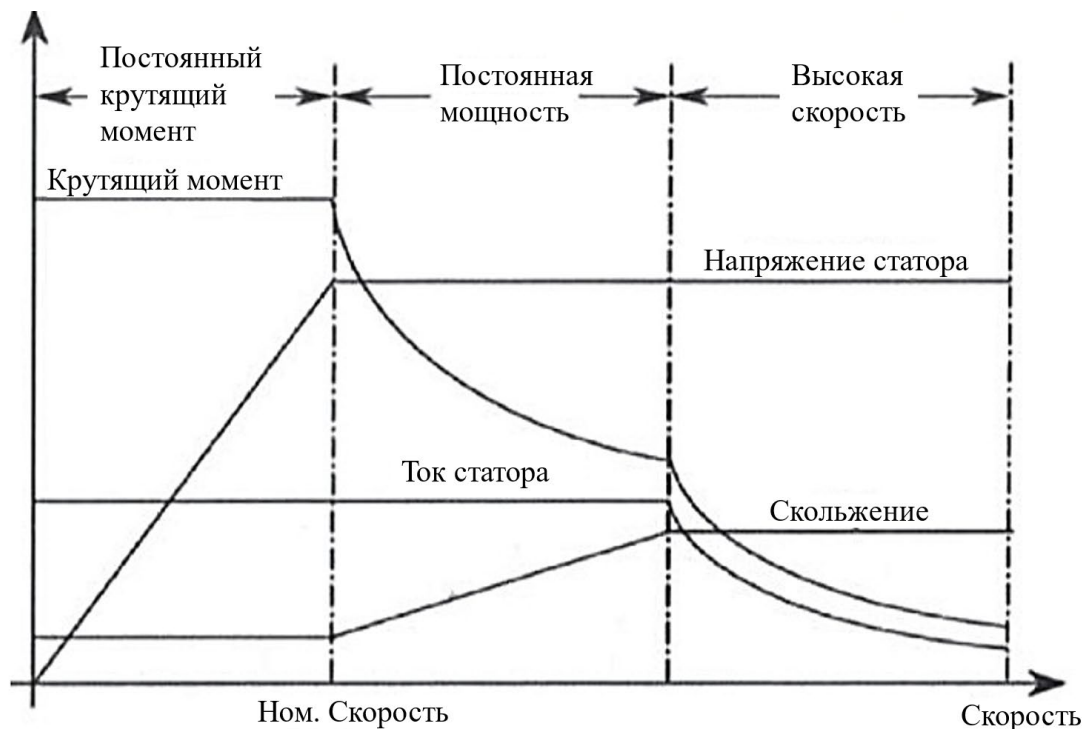


Рисунок 1. Различные характеристики асинхронных двигателей.

Асинхронные двигатели (АД), применяемые в электромобилях, сталкиваются с набором проблем. Их эффективность ниже, из-за высоких потерь, по сравнению с другими двигателями, что негативно влияет на запас хода электромобилей. Эта недостаточная эффективность ограничивает использование АД в электромобилях, которые требуют максимальные эффективные приборы и ограничивает тоже длительность времени работы АКБ и их срок службы [4, 6-9].

Асинхронный электродвигатель в электромобилях, связанный с регулируемой частотой вращения, представляет собой сложный объект для автоматического управления. Это обусловлено его нелинейной структурой, наличием перекрёстных связей и тем, что некоторые состояния, такие как токи и потокосцепления ротора, не могут быть измерены напрямую [2-3]. К тому же любые изменения в параметрах схемы замещения двигателя влияют на статические и динамические характеристики электромеханической системы [2].

Таблица 1

Преимущества и недостатки асинхронных двигателей (АД) в электромобиле

В мире электромобилей использование асинхронного двигателя сократилось из-за определённых недостатков, связанных с его применением в этих транспортных средствах. В 2021 году лишь 14% всех электромобилей были оснащены асинхронными двигателями [1]. Однако, несмотря на это, стоит отметить, что большинство производимых автомобилей относится к легковым автомобилям. Это говорит о том, что асинхронные двигатели все ещё играют важную роль в промышленности грузовых автомобилей и городских автобусах. Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование асинхронного двигателя в электромобилях будет продолжаться, несмотря на существующие сложности и недостатки.

В связи с высокими потерями и низкой эффективностью асинхронного двигателя, учёные и исследователи предложили ряд методов для улучшения его эффективности. Достижение более высокой эффективности асинхронного двигателя (АД) возможно путём минимизации потерь и увеличения коэффициента мощности. К основным потерям относятся электрические потери (потери в меди), магнитные (потери в сердечнике) и механические потери [6]. Потери в меди и потери в сердечнике составляют большую часть общего объёма потерь. Таким образом, снижение этих потерь и увеличение коэффициента мощности могут способствовать повышению эффективности работы АД. Один из

Преимущества АД	Недостатки АД
Широкий и доступный диапазон скоростей	Низкая эффективность
Магнитное поле полностью создаётся электромагнитной индукцией	высокие потери
Простая конструкция, надёжность, устойчивость к отказам	сложный объект для автоматического управления
Минимальные требования к обслуживанию	Большой вес и габариты по сравнению с другими двигателями
низкая стоимость	-
Способность работать в сложных условиях окружающей среды	-

предложенных методов заключается в снижении потерь путём использования прямого управления моментом для создания энергоэффективной системы для тягового электропривода [1]. Учитывая, что система прямого управления моментом характеризуется высокой быстродействием, устойчивостью к неточностям в информации о состоянии параметров двигателя, её использование представляется наиболее целесообразным для реализации алгоритмов, направленных на энергоэффективное управление тяговым электроприводом с асинхронными двигателями.

Предлагаемый метод предусматривает оптимизацию задания потокосцепления статора в соответствии с заданным моментом двигателя. Это делается с целью минимизации тока статора и увеличения энергоэффективности в системе прямого управления моментом асинхронного двигателя. Путём нахождения алгоритма, который определяет оптимальный угол между моментобразующими векторами ток статора и потокосцепление статора, в связи с тем, что в структуре системы прямого управления моментом имеется контур регулирования потокосцепления статора.

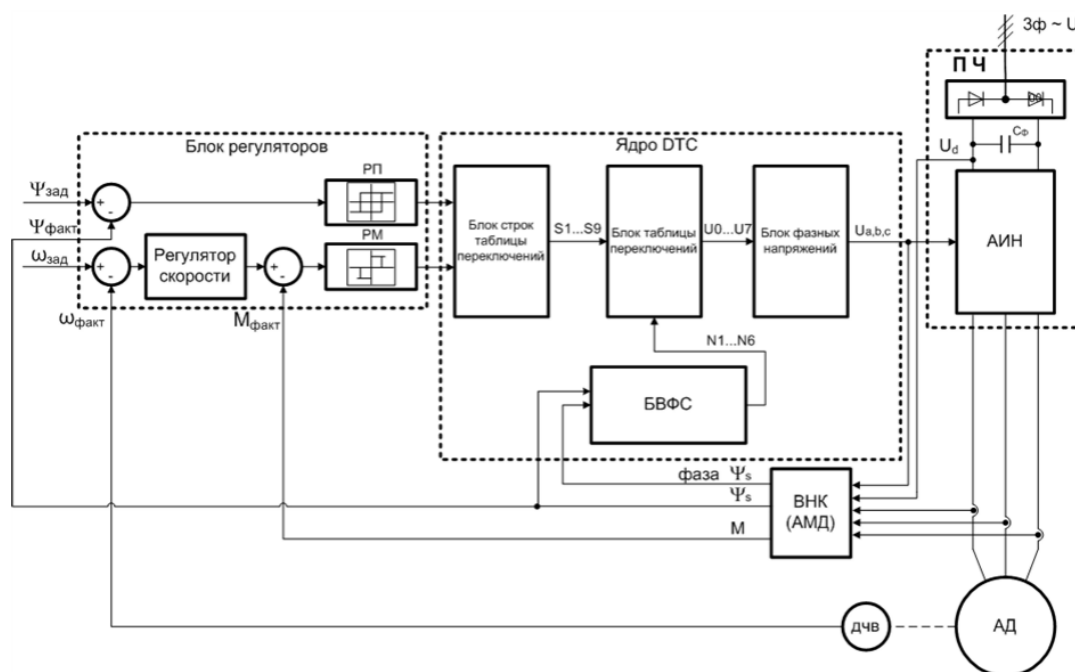


Рисунок 6 - Функциональная схема системы электропривода с прямым управлением [1].

На рисунке 6 показано, Система электропривода с прямым управлением моментом состоит из следующих основных блоков:

регуляторы (регулятор скорости, регулятор момента, регулятор потокосцепления статора);

таблица переключений;

вычислитель фазового сектора; - формирователь фазных напряжений (по таблице переключений);

адаптивная модель двигателя (АМД - вычислитель ненаблюдаемых координат АД)

[1].

После проведения необходимых вычислений и экспериментов, исследователь смог достичь снижения тока статора до 46% от исходного значения при режимах малых нагрузок и скоростях двигателя, близких к номинальной скорости вращения. В результате коэффициент полезного действия двигателя увеличивается на 12%.

Таким образом можно делать вывод о том, что Метод управления асинхронным двигателем играет важную роль в снижении потерь и, следовательно, требуемого тока, что, в свою очередь, повышает энергоэффективность асинхронного двигателя.

Управление с прогнозирующей моделью

Развитие ТС приводит к постоянному увеличению требований к качеству работы современных систем автоматического управления ЭП. Для эффективного решения управленческих задач необходимо разработать новые алгоритмы и системы управления, которые должны быть простыми в принципах организации и функционирования

На данный момент системы автоматического регулирования преимущественно создаются на основе классических методов теории автоматического управления (ТАУ), что приводит к использованию традиционных пропорционально-интегральных (ПИ)

регуляторов. Это связано с простотой структуры и высокой надёжностью таких регуляторов, что делает их популярными для стабилизации различных объектов. Однако их недостатком является необходимость перенастройки при изменении рабочих точек из-за возмущений. ПИ-регуляторы могут быть неэффективными для процессов с переменными параметрами, запаздыванием, нелинейностями и помехами. Сложности с настройкой ПИ-регуляторов часто приводят к тому, что они не работают в оптимальном режиме.

Один из современных формализованных подходов к анализу и синтезу систем управления, основанный на математических методах оптимизации, это технология управления динамическими объектами с использованием прогностических моделей. Этот подход стал широко применяться в начале 60-х годов для управления процессами и оборудованием в нефтехимической и энергетической промышленности. Использование этой технологии позволило отказаться от использования ПИ-регуляторов, так как математическая сложность процессов привёл к затруднению применения традиционных методов синтеза.

Одним из ключевых преимуществ управления на основе прогнозирующих моделей (УПМ) является относительная простота базовой схемы формирования обратной связи. Это позволяет эффективно управлять сложными системами с множеством связей и нелинейностей, оптимизировать процессы в режиме реального времени с учётом ограничений на управляющие действия и состояния, а также учитывать неопределённости и возмущения.

Электромобили (ЭМ) работают в условиях постоянно меняющихся климатических, нагрузочных и электромагнитных воздействий, что требует постоянной подстройки параметров регуляторов. Для обеспечения стабильности работы ЭП таких систем необходимо использование наблюдателей, которые оценивают текущие значения параметров двигателя, скорости, регуляторов скорости/момента, потокосцепления ротора и токов, чтобы поддерживать их на заданном уровне.

Следовательно, можно сказать, что использование прогнозирующих моделей для управления частотой вращения асинхронного двигателя в электромобилях является наиболее подходящим решением проблем. Связанные с повышением эффективности и получением высоких механических показателей.

Прицеп работы УПМ как показано в рисунок 7 объясняется так что на каждом шаге работы алгоритма выполняется следующая последовательность действий:

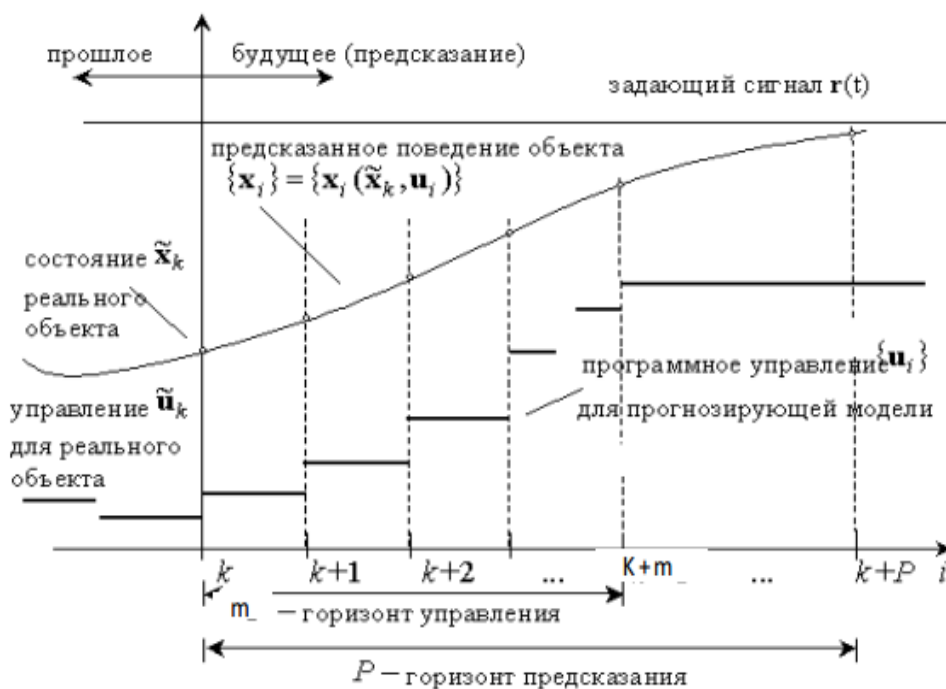


Рисунок 7- К пояснению идеи управления с прогнозирующей моделью [2]

Прогнозирование значений выходных сигналов объекта управления на P шагов вперёд. Прогноз формируется как функция от предстоящих значений управляющих воздействий на m следующих шагах и оценки текущего состояния объекта, которая определяется с помощью наблюдателя состояния.

Подстановка построенного выражения прогноза в заданный показатель качества управления. В результате определяется зависимость показателя качества от будущих значений управляющего воздействия.

Оптимизация значения показателя качества управления для определения будущей траектории управляющего воздействия.

Первое управляющее воздействие из заданной траектории на горизонте управления поддаётся на объект управления [2].

Таким образом, УПМ представляет собой сложную и гибкую систему, позволяющую эффективно управлять различными объектами в реальном времени.

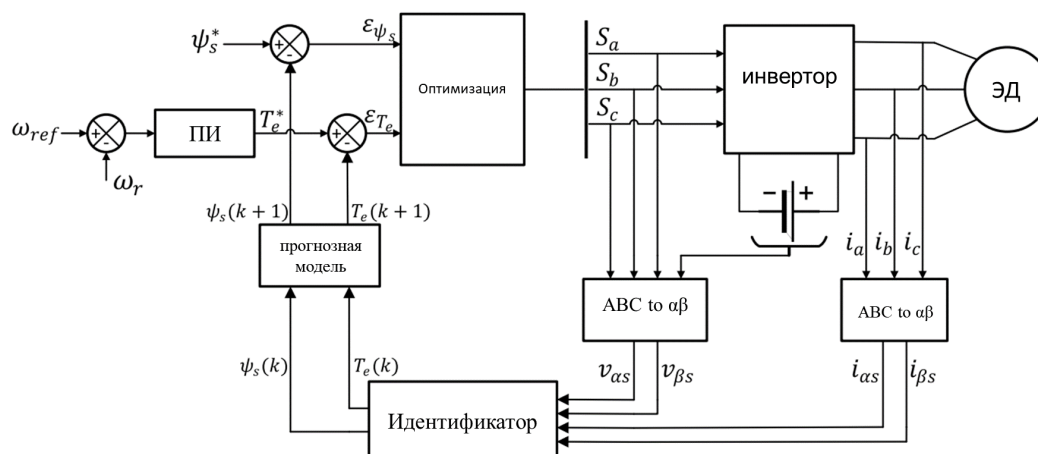


Рисунок 8 - Структурная схема Прямое управление моментом на основе прогнозирующей моделью.

Из Структурной схемы прямого управления моментом (рисунок 8) на основе прогнозирующей моделью можно отметить, что таблица переключения, присутствующая в классическую систему прямого управления моментом, заменяется алгоритмом онлайн-оптимизации [1]. Кроме того, оценка определённой целевой функции используется для выбора вектора напряжения в систему прямого управления моментом на основе прогнозирующей модели. электромагнитный момент, поток статора и скорость вращения ротора используются для прогнозирования будущего поведения управляющих переменных, так и целевая функция для оптимизации выходного управления. Этот метод также предоставляет различные преимущества, например включают простую концепцию управления, прямое включение нелинейностей в модель управления и лёгкую реализацию методологии управления. Применение прямого управления моментом на основе прогнозирующей модели может значительно улучшить работу системы управления, снижая пульсации момента, потока и частоту переключения.

Заключение

Для повышения энергоэффективности электрооборудования и электромобилей исследователи и учёные активно разрабатывают различные инновационные методы управления. Одним из ключевых направлений является прямое управление крутящего момента, которое позволяет оптимизировать потребление энергии и достигать максимальной эффективности работы двигателя.

Прогнозирующие модели играют важную роль в этом процессе, поскольку они позволяют предсказывать поведение электродвигателя и оптимизировать его работу на всех этапах. Благодаря этим моделям можно достигать оптимальных динамических характеристик, учитывая различные условия эксплуатации, такие как старт, торможение и изменение нагрузки.

Инновационные методы управления и прогнозирующей модели делают возможным достижение высокой энергоэффективности, что способствует улучшению экологической ситуации и снижению потребления энергии.

Список литературы:

1. De Klerk, M. L., & Saha, A. K. (2021). A comprehensive review of advanced traction motor control techniques suitable for electric vehicle applications. *IEEE Access*, 9, 125080125108. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3110736>
2. Диаб Ахмед Абделхамид Заки Векторное управление асинхронными электроприводами на основе прогностических моделей: дис. кандидата 05.09.03. - НОВОСИБИРСК, 2014. - 195 с.
3. Конохов, Д. В. Энергоэффективное прямое управление моментом асинхронных тяговых электродвигателей: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: Диссертация на соискание кандидата технических наук / Конохов, Д. В. ; . - Брянск, 2018. - 138 с.
4. Тойлыбаев А.Е., Сейімхан С. Электромобиль - транспорт будущего // *Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.* 2018. № 5(50). URL: [http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5902\[1\]](http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5902[1])
5. Trends in electric cars // *Global EV Outlook 2024*: сайт. - URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars> (дата обращения: 20.05.2024) [2]
6. Z. Wang, T. W. Ching, S. Huang, H. Wang and T. Xu, "Challenges Faced by Electric Vehicle Motors and Their Solutions," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 5228-5249, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045716.
7. Yıldırım, Merve & Polat, Mehmet & Kurum, H.. (2014). A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014. 218-223. 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715.
8. G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo and P. Guglielmi, "Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2322-2332, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2227092.
9. D. G. Dorrell, M. Popescu, L. Evans, D. A. Staton and A. M. Knight, "Comparison of permanent magnet drive motor with a cage induction motor design for a hybrid electric vehicle," *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -, Sapporo, Japan, 2010, pp. 1807-1813, doi: 10.1109/IPEC.2010.5543566

References:

1. De Klerk, M. L., & Saha, A. K. (2021). A comprehensive review of advanced traction motor control techniques suitable for electric vehicle applications. *IEEE Access*, 9, 125080125108. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3110736>
2. Diab Ahmed Abdelhamid Zaki Vector control of asynchronous electric drives based on predictive models: Ph.D. thesis 05.09.03. - NOVOSIBIRSK, 2014. - 195 с.
3. Konokhov, D. V. energy efficient direct torque control of asynchronous traction electric motors: specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems" : dissertation for a Ph. : Dissertation for a candidate of technical sciences / Konokhov, D. V. ; . - Bryansk, 2018. - 138 с.

4. Toylybaev A.E., Seyimkhan S. Electric car - transportation of the future // Universum: Technical Sciences: electronic scientific journal. 2018. no. 5(50). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5902> [1]
5. Trends in electric cars // Global EV Outlook 2024: website. - URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars> (date of reference: 20.05.2024) [2]
6. Z. Wang, T. W. Ching, S. Huang, H. Wang and T. Xu, "Challenges Faced by Electric Vehicle Motors and Their Solutions," in IEEE Access, vol. 9, pp. 5228-5249, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045716.
7. Yıldırım, Merve & Polat, Mehmet & Kurum, H. (2014). A review of comparison of types of electric motors and drives used for electric vehicles. 16th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control, PEMC 2014. 218-223. 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715.
8. G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, and P. Guglielmi, "Comparison of induction and synchronous PM motors for electric vehicle applications including design examples," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 6, pp. 2322-2332, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2227092.
9. D. G. Dorrell, M. Popescu, L. Evans, D. A. Staton, and A. M. Knight, "Comparison of a permanent magnet drive motor and a cage induction motor for a hybrid electric vehicle," The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -, Sapporo, Japan, 2010, pp. 1807-1813, doi: 10.1109/IPEC.2010.5543566.