

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569208>

Оригинальное исследование



# Исследование методов повышения энергоэффективности с учётом режимов работы тягового электропривода методами виртуального математического моделирования

А.В. Климов<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Инновационный центр «КАМАЗ», Москва, Российская Федерация;<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Вопрос повышения экологичности колёсных транспортных средств является одним из самых актуальных на данный момент, в связи с чем, наиболее популярным техническим решением становится применение электро-транспорта с тяговыми аккумуляторными батареями на борту. Однако, ёмкость батарей по-прежнему остается относительно невысокой, поэтому эффективность применения зависит от подбора наиболее оптимальных компонентов тягового энергетического оборудования и применения наиболее совершенных алгоритмов управления тяговым электроприводом. Поэтому весьма важно разрабатывать методы позволяющие на всех стадиях проектирования, производства и эксплуатации добиваться максимума энергоэффективности.

**Цель работы** — разработка теоретических основ и методов повышения энергоэффективности колёсных транспортных средств на стадии проектирования с применением виртуального математического моделирования.

**Материалы и методы.** Исследование выполнено в программном комплексе Matlab Simulink.

**Результаты.** В статье приводятся теоретические основы методов повышения с использованием математического моделирования виртуальной эксплуатации цифрового двойника машины в Matlab Simulink.

**Заключение.** Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных методов при разработке перспективных колёсных транспортных средств.

**Ключевые слова:** режимы работы; тяговый электропривод; распределение вероятностей; математическое моделирование; виртуальная эксплуатация; эффективность.

## Как цитировать:

Климов А.В. Исследование методов повышения энергоэффективности с учётом режимов работы тягового электропривода методами виртуального математического моделирования // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 1. С. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569208>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569208>

Original Study Article

# Study of methods of energy efficiency improvement considering operation modes of traction electric drive with use of the methods of virtual mathematical modelling

Alexander V. Klimov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Currently, the problem of making wheeled vehicles more environmentally-friendly is one of the most relevant, as using electric vehicles with on-board traction batteries becomes the most popular technical solution. However, the batteries capacity remains relatively low, so efficiency of using them depends on selection the most optimal components of traction electric equipment and implementing the most advanced algorithms of traction electric drive control. Therefore, development of the methods helping to achieve maximal energy efficiency at all stages of design, manufacturing and operation is highly important.

**AIM:** Development of fundamentals and methods of improvement of wheeled vehicles energy efficiency at the design stage with the use of virtual mathematical modelling.

**METHODS:** The study was conducted with the MATLAB/Simulink software package.

**RESULTS:** Theoretical basis of the improvement methods with the use of mathematical modelling of virtual operation of the vehicle's digital twin in the MATLAB/Simulink is given in the paper.

**CONCLUSIONS:** The practical value of the study lies in ability of using the proposed methods in development of prosperous wheeled vehicles.

**Keywords:** operation modes; traction electric drive; probability distribution; mathematical modelling; virtual operation; efficiency.

## To cite this article:

Klimov AV. Study of methods of energy efficiency improvement considering operation modes of traction electric drive with use of the methods of virtual mathematical modelling. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(1):65–73. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569208>

Received: 09.09.2023

Accepted: 01.12.2023

Published online: 15.03.2024

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос экологических норм и требований, предъявляемых к транспортному средству, является наиболее актуальным и серьезным. В связи с этим, электрифицированные транспортные средства с тяговой аккумуляторной батареей на борту предлагаются в качестве альтернативы автомобилям с двигателем внутреннего сгорания.

Немаловажным вопросом использования транспорта во всех отраслях народного хозяйства нашей страны и в мире является эффективность преобразования энергии системы хранения в механическую на валу тяговых электродвигателей, которая зависит от условий эксплуатации. Исходя из этого, выбираются наиболее оптимальные компоненты тягового энергетического оборудования и разрабатываются наиболее совершенные алгоритмы управления тяговым электроприводом для реализации энергоэффективного движения. Всё чаще можно увидеть применение колёсных машин с экологичным тяговым электрическим приводом.

Эти транспортные средства имеют ограниченный пробег на одной зарядке, что ограничивает их повсеместное применение. А требования потребителей к данному ключевому потребительскому свойству всё больше ужесточаются. Немаловажно также снижать совокупную стоимость владения такой техникой. Для этого разработчикам необходимо рассматривать различные методы увеличения пробега, одним из которых является снижение потерь энергии. Поэтому работы по повышению энергоэффективности колёсных транспортных средств являются весьма актуальными. Особенно важно задумываться над этим уже на ранних стадиях создания транспортного средства.

## ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Колёсное транспортное средство является энергоэффективным, если оно имеет энергоэффективные агрегаты

и системы, управляющие ими, обеспечивая энергоэффективные режимы работы, минимизируя потери энергии.

При организации энергоэффективного управления тяговым электрическим приводом ведущих колёс колёсного транспортного средства необходимо иметь информацию о величине момента сопротивления движению на ведущих колёсах, которая определяется решением дифференциального уравнения, описывающего динамику привода

$$J\dot{\omega} = M_t - M_r,$$

где  $J$  — приведенный к валу тягового электродвигателя момент инерции вращающихся частей привода;  $\omega$  — угловая скорость вращения вала электродвигателя;  $M_t$  и  $M_r$  — тяговый электромагнитный момент и момент сопротивления на валу электродвигателя, соответственно [1].

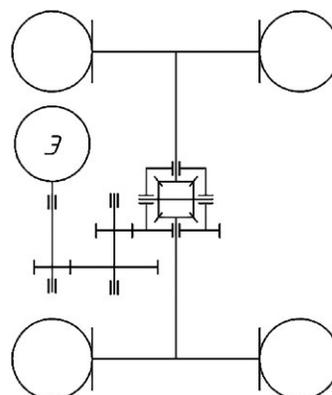
В работе [2] рассматривается метод разработки наблюдателя момента сопротивления, построенного на основе квадратичных интегральных критериев качества, содержащих координаты объекта и управления [3, 4] и теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) [5]. Методами имитационного математического моделирования работы наблюдателя в системе управления при движении колёсной машины (рис. 1) с использованием цифрового двойника транспортного средства [6–8] определено, что достигается приемлемая точность прогнозирования после затухания переходных процессов, вызванных стартом или остановкой машины. Основные характеристики исследуемого объекта приведены в табл. 1.

Общий вид имитационной математической модели движения цифрового двойника транспортного средства показан на рис. 2.

Тем самым, зная момент сопротивления на ведущих колёсах, появляется возможность оптимальным образом управлять тяговым крутящим моментом на валу электродвигателей, избегая неэффективных режимов функционирования.



a



b

Рис. 1. Общий вид транспортного средства (а) и схема привода (б).  
Fig. 1. Main view of the vehicle (a) and the drivetrain diagram (b).

**Таблица 1.** Технические характеристики транспортного средства**Table 1.** Technical specification of the vehicle

Параметр	Значение
Колёсная формула	4x2
Полная масса, кг:	8100
– на передняя ось, кг	3100
– на задний мост, кг	5000
Габаритные размеры:	
Высота, м	2,40
Ширина, м	2,45
Колесная база автомобиля, м	4,475
Колея управляемой оси, м	1,710
Колея ведущего моста, м	1,650
Радиус качения шины, мм	215/75 R17,5

Тяговый крутящий момент при построении системы управления приводом можно оценивать с помощью энергетического метода с высокой точностью и быстродействием [5, 10, 11]. В основу этого метода положено уравнение мгновенного баланса активной мощности электрических машин:

$$P(t) = M_t(t)\omega(t) + P_{cn}(t),$$

где  $P(t)$  — потребляемая электрическая мощность;  $P_{cn}(t)$  — суммарные потери мощности;  $M_t(t)$  — механический крутящий момент на валу двигателя;  $\omega(t)$  — угловая скорость вала ротора электродвигателя.

Оценивая электромагнитный момент и зная момент сопротивления, появляется возможность вычислить КПД привода для определения стратегии управления, корректируя режим работы и исключая излишние потери [12].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Чтобы использовать в конструкции транспортных машин энергоэффективные агрегаты и системы необходимо, чтобы их характеристики максимально соответствовали условиям эксплуатации. Эта задача наиболее актуальна на стадиях проектирования, так как именно тогда закладываются базовые характеристики транспортного средства и его компонентов. Допустив ошибку на этом этапе, инженер не сможет создать энергоэффективную конкурентоспособную машину. Наибольший интерес может иметь тяговый электрический привод,

т.к. именно в нём происходят основные потери в тяговой цепи от системы хранения энергии до ведущего колеса. Актуальна также разработка методик по определению характеристик компонентов или требований к ним, позволяющих, впоследствии, при их применении создавать энергоэффективные технические решения.

Метод исследования эксплуатационных режимов может базироваться на статистическом изучении функционирования агрегатов и систем с применением виртуального цифрового двойника, проектируемого транспортного средства (рис. 2), и с использованием базовых циклов движения или циклов движения, полученных от заказчика или потребителя.

Зачастую заказчику или потребителю по ряду причин сложно максимально полно описать эксплуатационные режимы, в которых он использует технику. Поэтому разработчики имеют на начальном этапе всего лишь требования по максимальному пробегу, скорости и возможно о типе дорог. В этом случае можно использовать стандартизованные циклы.

Для транспортных средств, используемых в сельском хозяйстве в основном свойственно движение с невысокими скоростями. Пример зависимости скорости движения колёсной машины показан рис. 3.

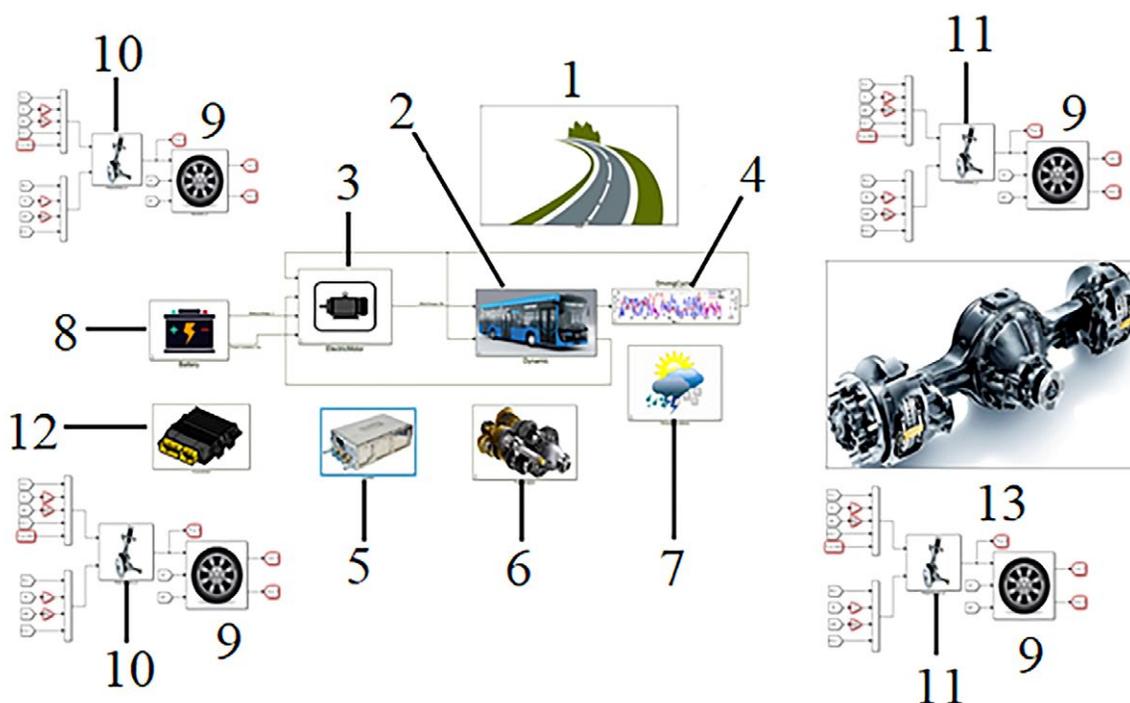
Согласно рис. 4 наиболее вероятен скоростной режим в диапазоне 20–35 км/ч. Кроме того, большую долю времени транспортное средство вообще не движется (скорость 0 км/ч).

Имея в распоряжении такой цикл движения, проведя виртуальную эксплуатацию методом имитационного математического моделирования с применением модели (рис. 2), разработчик получает базу данных эксплуатационных режимов. После статистической обработки которой определяются наиболее вероятные режимы работы.

В случае исследуемого объекта (рис. 1), распределение плотностей вероятности для тягового электрического привода приведены на рис. 5, 6. На ранних стадиях проектирования рационально рассматривать следующие параметры работы: частота вращения, крутящий момент, мощность на ведущей оси или ведущих колёсах, что позволяет определить как эквивалентные режимы нагружения трансмиссии, так и её ключевые параметры, как, например, передаточное число [13].

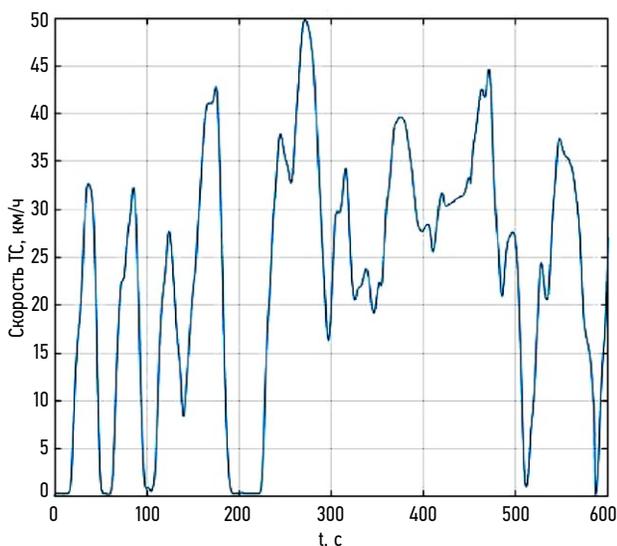
Согласно рис. 5 для исследуемого транспортного средства (рис. 1) наиболее вероятные частоты вращения ведущих колёс находятся в диапазоне от 150 до 225 об/мин при максимуме в 350 об/мин. Вал двигателя имеет наиболее вероятные частоты вращения 1434–2151 об/мин при 3346 об/мин движении на максимальной эксплуатационной скорости 52 км/ч.

Для тягового электрического привода можем видеть (рис. 6), что на колёсах присутствует как положительный тяговый крутящий момент, так и отрицательный — рекуперативный, соответствующий режиму

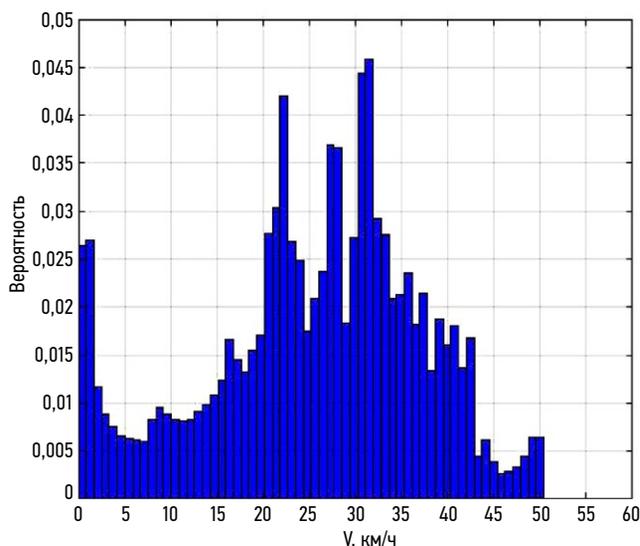


**Рис. 2.** Имитационная модель движения транспортного средства в Matlab Simulink: 1 — опорное основание; 2 — блок динамики движения; 3 — тяговые электродвигатели; 4 — цикл движения; 5 — тяговые инверторы; 5 — трансмиссия; 7 — климатические условия; 8 — система хранения электрической энергии; 9 — колесо; 10 — передняя подвеска; 11 — задняя подвеска; 12 — система управления; 13 — балка заднего моста.

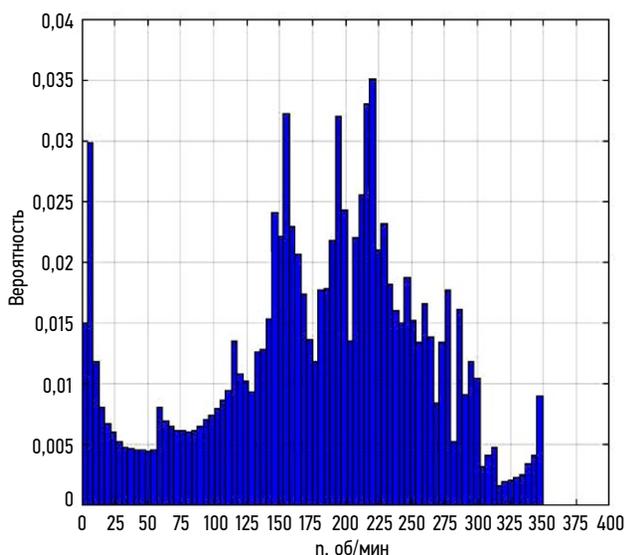
**Fig. 2.** The simulation model of vehicle motion in the MATLAB/Simulink: 1 — ground surface; 2 — the vehicle dynamics block; 3 — traction electric motors; 4 — a driving cycle; 5 — inverters; 6 — drivetrain; 7 — climatic conditions; 8 — an electricity storage system; 9 — a wheel; 10 — front suspension; 11 — rear suspension; 12 — a control system; 13 — a rear axle.



**Рис. 3.** Зависимости скорости движения колёсной машины.  
**Fig. 3.** Time-domain motion velocity of a wheeled vehicle.

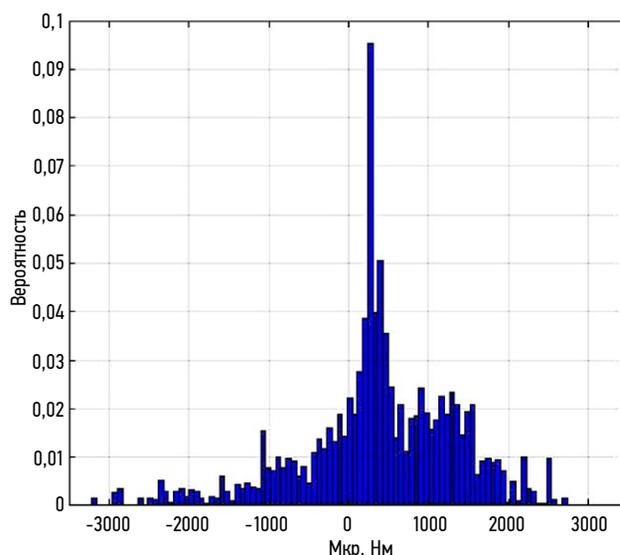


**Рис. 4.** Распределение плотности вероятности скорости движения.  
**Fig. 4.** Probability density distribution of motion velocity.



**Рис. 5.** Распределение плотности вероятности частоты вращения колеса.

**Fig. 5.** Probability density distribution of wheel rotation velocity.



**Рис. 6.** Распределение плотности вероятности крутящего момента на колёсах.

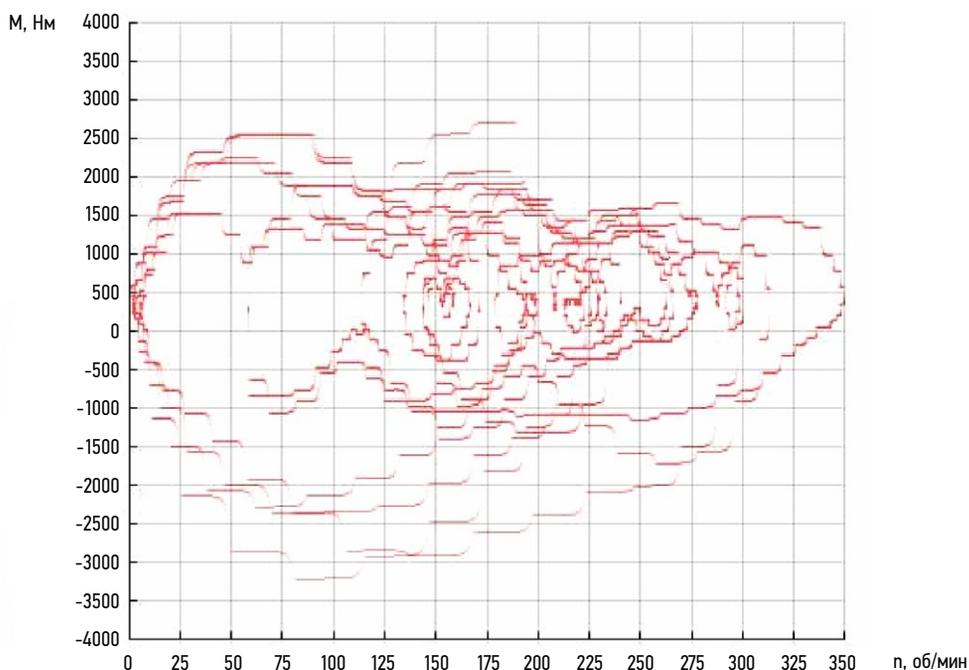
**Fig. 6.** Probability density distribution of torque at wheels.

электродинамического торможения. Наиболее вероятное значение тягового крутящего момента находятся в диапазоне от 260 до 520 Нм и от 1000 до 1500 Нм при максимальных значениях 2660 Нм, что соответствует крутящему моменту на валу двигателя с учётом  $U_{TP}=9,56$  и предварительно принятого КПД трансмиссии 95% диапазонам 28,6–57,3 Нм и 110,1–165,2 Нм. Рекуперативный момент на колесе наиболее имеет вероятное значение в диапазоне до 1100 Нм при максимальных значениях 3200 Нм и на валу двигателя 109,3 Нм.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Распределение рабочих точек привода приведенных к ведущим колесам показаны на рис. 7.

Далее по известным формулам [1, 6] требуется определить максимальные требуемые характеристики двигателя:  $n_{ном}$  — максимальную частоту вращения, для обеспечения кинематической скорости движения,



**Рис. 7.** Распределение рабочих точек, приведенных к колесу.

**Fig. 7.** Distribution of operation points of torque at driving wheels.

$N_{\max}$  — максимальной мощности, для обеспечения максимальной потребителю скорости движения, например, для движения машины по шоссе,  $M_{\max}$  — максимального крутящего момента, в тяговом режиме для преодоления максимальных дорожных сопротивлений, в рекуперативном, для обеспечения замедлений в процессе электродинамического торможения.

Для рассматриваемого транспортного средства максимальная скорость составляет 90 км/ч, частота вращения колеса составит 685 об/мин, то частота вращения двигателя  $n_{\text{ном}} = 6520$  об/мин, а с учётом запаса в 10% 7172 об/мин. Максимальный крутящий момент на колесе требуемый для преодоления максимального дорожного сопротивления — подъема в 25% составит 7725 Нм, а на валу двигателя 850 Нм.

Далее следует определить тип тягового электродвигателя привода, исходя из обеспечения максимума КПД, в наиболее вероятных эксплуатационных режимах. В работе [14] приведены типовые характеристики эффективности электродвигателей, с помощью которых можно определить требуемый тип двигателя.

После определения областей наиболее вероятного функционирования, максимальных требуемых параметров, следует определить тип приводного двигателя. Путём наложения распределения рабочих точек (рис. 9) на типовые характеристики можно заключить, что для привода ведущих колёс колёсного транспортного средства, используемого в сельском хозяйстве наиболее пригоден синхронно-реактивный двигатель IPM, поскольку зона максимума его КПД находится в области низких и средних скоростей крутящих моментов, что позволяет максимизировать энергоэф-фективность.

## ВЫВОДЫ

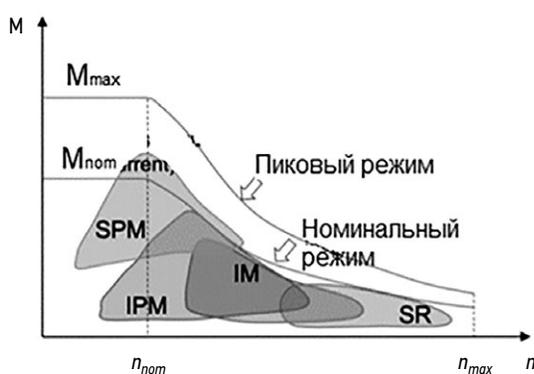
Рассмотрены методы повышения энергоэффективности колесных транспортных средств за счёт применения наблюдателей в системе управления, а также применения энергоэффективных агрегатов и систем.

Предложен метод по определению ключевых характеристик и типа тягового электрического привода с учётом особенностей эксплуатации реальных транспортных объектов с применением имитационного математического моделирования путём виртуальной эксплуатации цифрового двойника.

Анализ режимов работы показывает, что тяговый электрический привод колёсной транспортной машины, эксплуатируемой в сельском хозяйстве, работает в основном в зоне частичных характеристик в диапазоне частот вращения до  $n_{\text{ном}}$  и крутящего момента до  $M_{\text{ном}}$ .

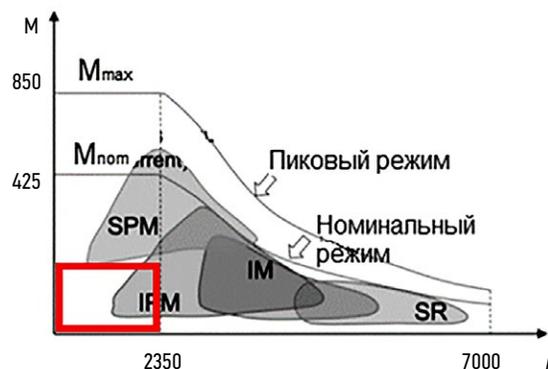
Установлено, что для рассматриваемых машин наиболее энергоэффективным техническим решением является синхронно-реактивный двигатель IPM, поскольку зона максимума его КПД находится в области низких и средних скоростей крутящих моментов, что позволяет максимизировать его энергоэффективность.

Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных методов повышения энергоэффективности и предложенного метода определения ключевых характеристик и типа электродвигателя для разработки системы управления тягового привода транспортных машин, а также для их диагностики.



**Рис. 8.** Типовая электромеханическая характеристика тягового электродвигателя и зоны наибольшего КПД для различных типов электродвигателей: SPM — синхронный с постоянными магнитами; IPM — синхронно-реактивный с постоянными магнитами; IM — асинхронный; SR — вентильно-индукторный.

**Fig. 8.** Typical electromechanical performance diagram of a traction electric motor and areas of the highest efficiency of various types of electric motors: SPM — permanent-magnet synchronous motors; IPM — internal permanent magnet motors; IM — induction motors; SR — switched reluctance motors.



**Рис. 9.** Рабочие точки привода, наложенные на типовую характеристику двигателей.

**Fig. 9.** The operating points combined with the typical performance diagram of electric motors.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад автора.** А.В. Климов — разработка теоретических основ, разработка метода, разработка математической модели, проведение математического моделирования, проведение расчётов поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений. Автор подтверждает соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (автор внёс существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочёл и одобрил финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка математической модели эксплуатации шасси (трансмиссии, ходовой части и механизмов управления) в статическом и динамическом состоянии и создание на ее основе цифрового двойника платформы легкового автомобиля» (шифр: FZRR-2023-0007).

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author's contribution.** A.V. Klimov — development of theoretical fundamentals, development of the method, building of the mathematical model, performing simulations, search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript, creating images. The author confirms the compliance of their authorship with the international ICMJE criteria (the author made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

**Competing interests.** The author declares that he has not competing interests.

**Funding source.** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the "Development of the mathematical model of chassis operation (transmission, chassis and control mechanisms) in static and dynamic state and creation on its basis of a digital twin of a passenger car platform" project).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1989.
2. Климов А.В. Синтез адаптивного наблюдателя момента сопротивления на валу тягового электродвигателя // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 2. С. 99–105. (In Russ). EDN VKZKOY doi: 10.17816/0321-4443-119856
3. Андриященко В.А. Теория систем автоматического управления: уч. пособие. Л.: Ленинградский ун-т, 1990.
4. Алиев Ф.А., Ларин В.Б., Науменко К.И. и др. Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления. Киев: Наукова думка, 1978.
5. Иванов В.А., Фалдин Ф.В. Теория оптимальных систем автоматического управления. М.: Наука, 1981.
6. Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. и др. Проектирование полноприводных колесных машин: уч. для вузов; В 3 т. Т. 3. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
7. Полунгян А.А., Фоминых А.Б., Староверов Н.Н. Динамика колесных машин: уч. пособие. Ч. 1. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013.
8. Жилейкин М.М., Котиев Г.О. Моделирование систем транспортных средств: учебник. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.
9. Алиев Ф.А., Ларин В.Б., Науменко К.И. и др. Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления. Киев: Наукова думка, 1978.

10. Келлер А., Сергеевский Ю.Н. Прямое измерение момента в электроприводе. В кн.: Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП–2014. Саранск, 07–09 октября 2014 г. Саранск, 2014. С. 58–62.
11. Smolin V., Topolskaya I., Gladyshev S. Energy Method for Torque Control of a Synchronous Traction Motor // SAE Technical Paper. 2018. doi: 10.4271/2018-01-0766
12. Жилейкин М.М., Климов А.В., Масленников И.К. Алгоритм формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающий энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса // Известия МГТУ "МАМИ". 2022. Т. 16, № 1. С. 51–60. EDN ELJNKK doi: 10.17816/2074-0530-100232
13. Климов А.В., Ухов И.В., Рябцев Ф.А. и др. Об эквивалентных режимах работы трансмиссий транспортных средств с тяговым электроприводом // Научные исследования: итоги и перспективы. 2020. Т. 1, № 1. С. 61–68. EDN ERYJZI doi: 10.21822/2713-220X-2020-1-1-61-68
14. Shao L., Karci A., Tavernini D., et al. Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles - A Review // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 116900-116913. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993235

## REFERENCES

1. Litvinov AS, Farobin YaE. *Car: Theory of performance properties*. Moscow: *Mashinostroenie*; 1989. (In Russ).
2. Klimov AV. Synthesis of an adaptive observer of the resistance torque at a shaft of a traction electric motor. *Tractors and*

*Agricultural Machinery*. 2023;90(2):99–105. (In Russ). EDN VKZK0Y  
doi: 10.17816/0321-4443-119856

3. Andryushchenko VA. *Theory of automatic control systems: textbook. allowance*. Leningrad: Leningradskiy un-t; 1990. (In Russ).

4. Aliev FA, Larin VB, Naumenko KI, et al. *Optimization of linear time-invariant control systems*. Kyiv: Naukova dumka; 1978. (In Russ).

5. Ivanov VA, Faldin FV. *Theory of optimal automatic control systems*. Moscow: Nauka; 1981. (In Russ).

6. Afanasyev BA, Belousov BN, Zheglov LF, et al. *Design of all-wheel drive wheeled vehicles: textbook. for universities*; In 3 vols. Vol. 3. Moscow: MGTU im NE Baumana; 2008. (In Russ).

7. Polungyan AA, Fominykh AB, Staroverov NN. *Dynamics of wheeled vehicles: textbook. allowance*. Part 1. Moscow: MGTU im NE Baumana; 2013. (In Russ).

8. Zhileikin MM, Kotiev GO. *Modeling of vehicle systems: textbook*. Moscow: MGTU im NE Baumana; 2020. (In Russ).

9. Aliev FA, Larin VB, Naumenko KI, et al. *Optimization of linear time-invariant control systems*. Kyiv: Naukova dumka; 1978. (In Russ).

10. Keller A, Sergeevsky YuN. Direct measurement of torque in an electric drive. In: *Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2014. Saransk, October 07–09, 2014*. Saransk; 2014:58–62. (In Russ).

11. Smolin V, Topolskaya I, Gladyshev S. Energy Method for Torque Control of a Synchronous Traction Motor. *SAE Technical Paper*. 2018. doi: 10.4271/2018-01-0766

12. Zhileykin MM, Klimov AV, Maslennikov IK. Control signal algorithm of the accelerator pedal providing an effective energy consumption by an electrobus traction gear. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2022;16(1):51–60. (In Russ). EDN ELJNKK  
doi: 10.17816/2074-0530-100232

13. Klimov AV, Ukhov IV, Ryabtsev FA, et al. On equivalent operating modes of transmissions of vehicles with electric traction drive. *Nauchnye issledovaniya: itogi i perspektivy*. 2020;1(1):61–68. (In Russ). EDN ERYJZI doi: 10.21822/2713-220X-2020-1-1-61-68

14. Shao L, Karci A, Tavernini D, et al. Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles – A Review. *IEEE Access*. 2020;8:116900–116913. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993235

## ОБ АВТОРЕ

**Климов Александр Владимирович,**

канд. техн. наук,

руководитель службы электрифицированных автомобилей;

доцент Перспективной инженерной школы электротранспорта;

адрес: Российская Федерация, 121205, Москва,

Инновационный центр Сколково, ул. Большой бульвар, д. 62;

ORCID: 0000-0002-5351-3622;

eLibrary SPIN: 7637-3104;

e-mail: klimmanen@mail.ru

## AUTHOR'S INFO

**Aleksander V. Klimov,**

Cand. Sci. (Engineering),

Head of the Electric Vehicles Service; Associate Professor

of the Advanced Engineering School of Electric Transport;

address: 62 Bolshoy boulevard, Skolkovo Innovation center,

143026 Moscow, Russian Federation;

ORCID: 0000-0002-5351-3622;

eLibrary SPIN: 7637-3104;

e-mail: klimmanen@mail.ru