

УДК 629.3.07

EDN: JGTLWK

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЕМ И ЗАМЕДЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОБУСА ПОСРЕДСТВОМ ПЕДАЛИ ХОДА

А.В. Климов

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: klimmanen@mail.ru

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

Представлены теоретические основы построения алгоритма однопедального управления движением электробуса и результаты виртуального исследования, подтверждающего его энергоэффективность. Методом имитационного математического моделирования исследованы закономерности определения уставок крутящего момента тягового электропривода с помощью только педали хода. Для этого формируются уставки запрашиваемого момента электродвигателя с учетом скорости движения, а также других условий и характеристик транспортного средства. Реализация такого закона позволяет водителю снизить энергопотребление за счет управления машиной, позволяющего двигаться по инерции (накатом) и максимально использовать рекуперативное торможение с минимальным задействованием рабочей тормозной системы. Исследование выполнено в программном комплексе *Matlab Simulink*. Предложенный закон тягового и рекуперативного крутящего момента тягового электропривода, режима выбега для разработки системы управления тягового привода может быть использован для повышения энергоэффективности электротранспорта.

Ключевые слова: энергоэффективность, однопедальное управление, тяговый режим, режим рекуперации, движение накатом, математическое моделирование, педаль хода, удельный расход энергии.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Климов, А.В. Исследование эффективности алгоритма управления ускорением и замедлением электробуса посредством педали хода // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 1. С. 107-117. EDN: JGTLWK

STUDY OF EFFECTIVENESS OF CONTROL ALGORITHM FOR ACCELERATION AND DECELERATION OF ELECTRIC BUS USING ACCELERATOR PEDAL

A.V. Klimov

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: klimmanen@mail.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the theoretical basis for development an algorithm for single pedal control of the movement of an electric bus and the results of a virtual study confirming its energy efficiency. The patterns of determining the torque settings of a traction electric drive using only the accelerator pedal were studied using the method of mathematical simulation modeling. The settings for the requested electric motor torque were formulated taking into account the speed of movement, as well as other conditions and characteristics of the vehicle. The implementation of this law allows the driver to reduce energy consumption by controlling the vehicle, allowing it to move by inertia (coasting) and make maximum use of regenerative braking with minimal use of the braking system. The study was carried out using the *Matlab Simulink*. The proposed law of traction and regenerative torque of a traction electric drive, coasting mode for the development of a traction drive control system can be used to increase the energy efficiency of electric vehicles.

Key words: energy efficiency, single-pedal control, traction mode, recovery mode, rolling motion, mathematical modeling, pedal stroke, specific energy consumption.

FOR CITATION: A.V. Klimov. Study of effectiveness of control algorithm for acceleration and deceleration of electric bus using accelerator pedal. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 1. Pp. 107-117. EDN: JGTLWK

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция к применению в различных отраслях народного хозяйства аккумуляторных колесных транспортных средств с тяговым электрическим приводом ведущих колес [<https://kamaz.ru>]. Они оснащены перезаряжаемой системой хранения электрической энергии (тяговой аккумуляторной батареей) и тяговым электрическим приводом ведущих колес. Одной из основных характеристик является здесь величина автономного пробега на одной зарядке перезаряжаемой системы хранения электрической энергии. Применительно к электротранспортным средствам постоянно ужесточаются требования к потребительским свойствам, поскольку потребители и эксплуатирующие организации стремятся снизить совокупную стоимость владения. Снижение стоимости эксплуатации при росте начальной стоимости является весьма актуальным. Этот параметр можно минимизировать, снижая удельного расхода энергии $W_{\text{сум}}$, кВтч/км, увеличивая при этом автономный пробег и снижая потребность в зарядке системы хранения энергии и затраты на осуществление перевозок.

Важным направлением повышения показателей дальности хода является применение агрегатов с высокой эффективностью. Поэтому в конструкции разработчиками применяются все более энергоемкие перезаряжаемые источники энергии, в том числе, в различных сочетаниях – более прогрессивные электроприводы [1, 2]. Вторым способом является применение алгоритмов и методов управления агрегатами, позволяющими минимизировать потери энергии. Ведутся различные работы по снижению потерь энергии в цепи ее передачи от системы хранения к ведущим колесам. К таковым также можно отнести алгоритмы управления тяговым электроприводом, осуществляющие наиболее энергоэффективный переход из одного состояния в другое при движении по соответствующему запросу [3].

Развитием данного подхода к управлению транспортным средством является создание алгоритмов, позволяющих использовать только педаль хода, что, наряду с повышением энергоэффективности, позволяет улучшить эргономику управления и комфорт пассажиров. Многие исследователи осуществляют разработку систем управления движением, использующим в качестве органа управления только одну педаль – педаль хода (акселератора) [4-16]. В данных работах реализуются способы управления с помощью применения ресурсоемких методов на основе нейросетевых технологий и искусственного интеллекта. Такие методы не позволяют реализовать их на основе бортовых блоков управления. Поэтому разработка способов управления, обеспечивающих высокую энергоэффективность, не будучи при этом сложными, является актуальной задачей. Как правило, для тягового электропривода свойственна короткая цепь механической трансмиссии с низкими демпирующими свойствами, слабо демпирующая воздействия от дороги, что, наряду с высокими динамическими свойствами тягового двигателя, высокой его перегрузочной способностью при изменении режима может привести к повышенным динамическим нагрузкам в трансмиссии из-за резких ударных воздействий при быстром переходе с тягового режима на рекуперативный и наоборот.

Зависимости запрашиваемого крутящего момента от положения педали хода при различных скоростях движения

Процесс движения колесной машины можно разделить на три типовых режима: тяговый, тормозной и режим движения по инерции – накатом (рис. 1). При управлении только педалью хода движение транспортного средства в том или ином режиме определяется степенью нажатия на педаль h_{dr} и условиями движения. При высокой степени нажатия на педаль реализуется тяговый режим, при отпускании – движение накатом или торможение [18].

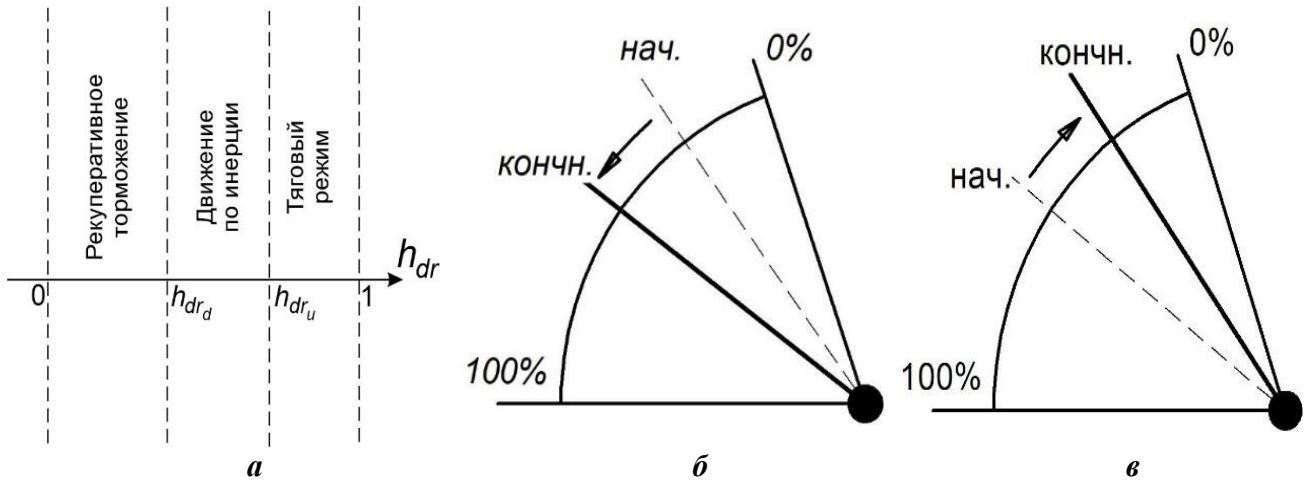


Рис. 1. Основные принципы управления [18]:

*а – режимы движения машины в зависимости от степени нажатия на педаль хода;
 б – при нажатии на педаль; в – при отпускании педали*

Fig. 1. Basic control principles [18]:

*a – vehicle driving modes depending on the degree of pressure on the accelerator pedal;
 б – when pressing the pedal; в – when releasing the pedal*

В зоне тяги $h_{dr_u} < h_{dr} \leq 1$ крутящий момент на валу электродвигателя $M_{кр} > 0$ в зоне $0 < h_{dr} \leq h_{dr_d}$ рекуперативного торможения $M_{кр} < 0$, в зоне $h_{dr_d} < h_{dr} \leq h_{dr_u}$ движения по инерции $M_{кр} = 0$. Значения степени нажатия на педаль хода, характеризующей левую границу тягового режима, определяется по формуле (1) [17]:

$$h_{dr_u} = \frac{Mg \left[f_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0,1} \cos \alpha + \sin \alpha \right] + c_x F_{лоб} \rho \frac{V^2}{2} r_{к0}}{M_{max}(\omega)}, \quad 1)$$

где M – масса колесной машины, кг; α – уклон дороги, c_x – коэффициент сопротивления воздуха; ρ – плотность воздуха, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с², v – скорость машины, м/с; v_0 – скорость на которой коэффициент сопротивления качению равен f_0 , м/с; f_0 – коэффициент сопротивления качению; $r_{к0}$ – радиус качения колеса, м; $F_{лоб}$ – лобовая площадь, м²; $M_{max}(\omega)$ – максимальный крутящий момент, реализуемый тяговым электродвигателем, в зависимости от частоты вращения вала ротора, Нм.

Значение левой границы зоны наката можно определить по формуле (2) [17]:

$$h_{dr_d} = h_{dr_u} + 0,1 \left(\frac{V}{V_{max}} \right), \quad 2)$$

где V_{max} – максимальная скорость движения колесной машины, км/ч.

Уставки крутящих моментов на валу тягового электродвигателя для различных режимов определяются по формулам (3-6), а характеристики должны соответствовать графику на рис. 2.

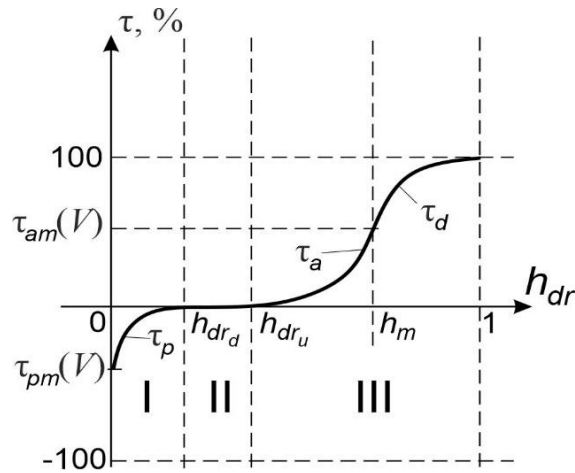


Рис. 2. График задания уставки крутящего момента на валу ТЭД [18]:

$\tau_{pm}(V)$ – максимальное значение рекуперативного момента; $\tau_{am}(V)$ – максимальное значение тягового момента; $h_m(V)$ – положение педали акселератора, при котором становится доступным запрос максимального тягового момента

Fig. 2. Dependence for setting the torque on the traction electric motor shaft [18]:

$\tau_{pm}(V)$ – maximum value of regenerative torque; $\tau_{am}(V)$ – maximum value of traction torque; $h_m(V)$ – accelerator pedal position at which the request for maximum traction torque becomes available

Значение максимальной уставки рекуперативного момента на валу двигателя определяется по формуле (3) [17]:

$$\tau_{pm} = \frac{r_{ко}}{M_{\max}(\omega)n_g} \left[-a_x M - Mgf_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0,1} - c_x F_{\text{лоб}} \rho \frac{V^2}{2} \right], \quad (3)$$

где a_x – продольное ускорение машины, м/с²; n_g – число ведущих колес.

Значение уставки рекуперативного момента в тормозном режиме определяется по формуле (4) [18]:

$$\tau_p = a \left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_d}} \right)^2 + b \left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_d}} \right) + c, \quad (4)$$

где a , b и c – коэффициенты аппроксимации.

На рис. 2 величина степени нажатия на педаль хода h_m определяет режим, позволяющий запрашивать максимально возможный крутящий момент в тяговом режиме. Величина уставки крутящего момента для тягового режима при степени нажатия на педаль от h_{dr_u} до h_m определяется по формуле (5) [18]:

$$\tau_a = d \left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_u}} \right)^n + e \left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_u}} \right) + f, \quad (5)$$

где d , e , f – коэффициенты аппроксимации.

Величина уставки крутящего момента для степени нажатия на педаль хода от h_m до полного нажатия определяется по формуле (6) [18]:

$$\tau_d = kh_{dr}^2 + lh_{dr} + m, \quad (6)$$

где k , l , m – коэффициенты аппроксимации. На рис. 3 показана реализация зависимостей уставок крутящего момента для различных режимов и условий движения транспортного средства в зависимости от скорости движения [17].

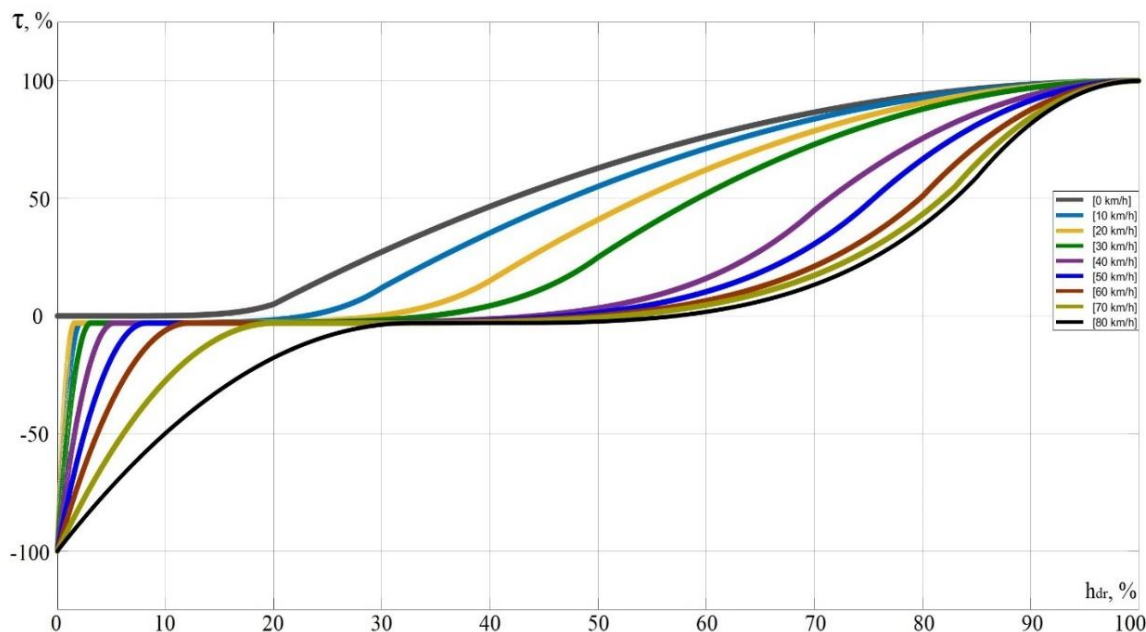


Рис. 3. Зависимости запрашиваемого крутящего момента от положения педали акселератора при различных скоростях движения машины [18]

Fig. 3. Dependence of the requested torque on the position of the accelerator pedal at various vehicle speeds [18]

Исследование функционирования алгоритма управления с помощью педали хода при виртуальной эксплуатации с помощью имитационного моделирования

С целью определения эффективности однопедального алгоритма управления проведены расчетные исследования с применением математического имитационного моделирования в среде *MatLab*. Общий вид имитационной модели динамики движения транспортного средства [18] показан на рис. 4. Модель оснащена имитационными моделями тягового электрического привода [19], перезаряжаемой системы хранения электрической энергии, системой управления. С помощью имитационной математической модели транспортного средства [18] (рис. 4) проведено исследование движения транспортного средства, управляемого с помощью только педали хода в условиях схожих с эксплуатационными. Исследовательский цикл движения показан на рис. 4 [20].

Исследование эффективности и работоспособности разработанного алгоритма однопедального управления [17] проводились на опорном основании «сухой асфальт» (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном скольжении $\mu_{max} = 0,80$). Виртуальным испытаниям подвергалось транспортное средство, оснащенное системой формирования управляющего сигнала со стороны педали хода, а также для сравнения машина с классическим способом управления с двухпедальным прямым управлением крутящим моментом от педали хода, а тормозным моментом от педали тормоза.

На рис. 6-10 приведены основные параметры движения машины с прямым управлением моментом тяговых электродвигателей от педали хода. На рис. 11-13 представлены те же зависимости для варианта, оснащенного системой формирования управляющего сигнала со стороны только педали хода.

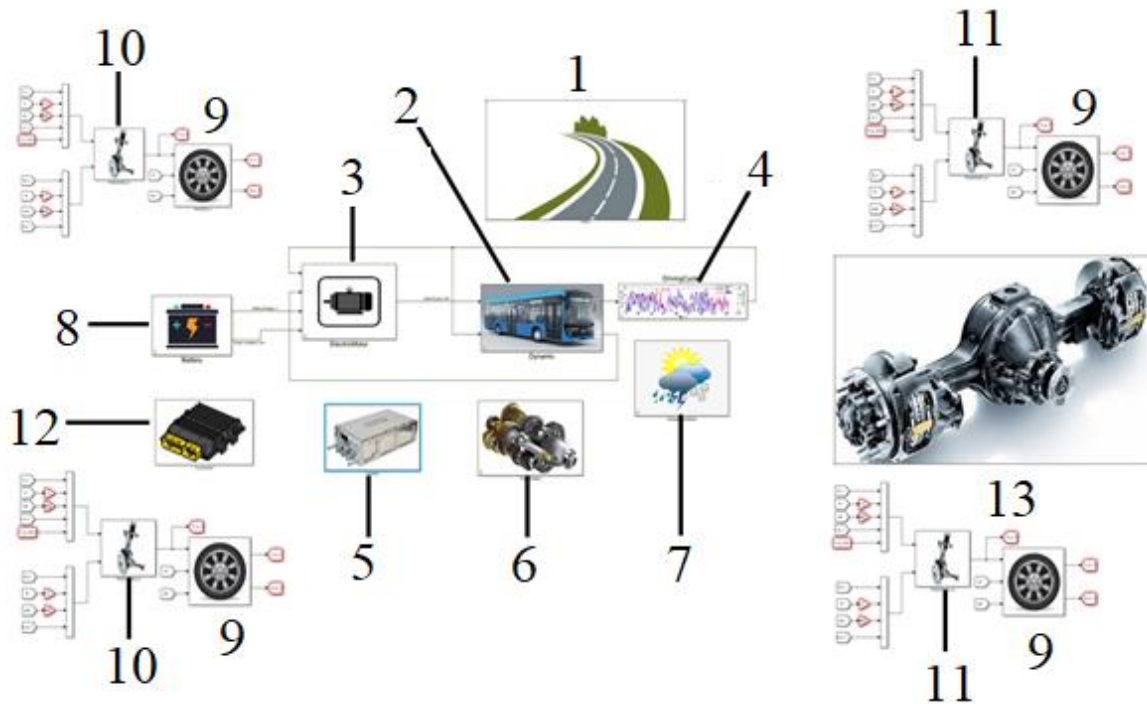


Рис. 4. Общий вид имитационной математической модели [18, 19]:

1 – опорное основание; 2 – блок динамики движения; 3 – тяговые электродвигатели; 4 – цикл движения; 5 – тяговые инверторы; 6 – 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. 4. General view of the simulation mathematical model [18, 19]:

1 – support base; 2 – motion dynamics block; 3 – traction electric motors; 4 – movement cycle; 5 – traction inverters; 6 – transmission; 7 – climatic conditions; 8 – electrical energy storage system; 9 – wheel; 10 – front suspension; 11 – rear suspension; 12 – control system; 13 – rear axle beam

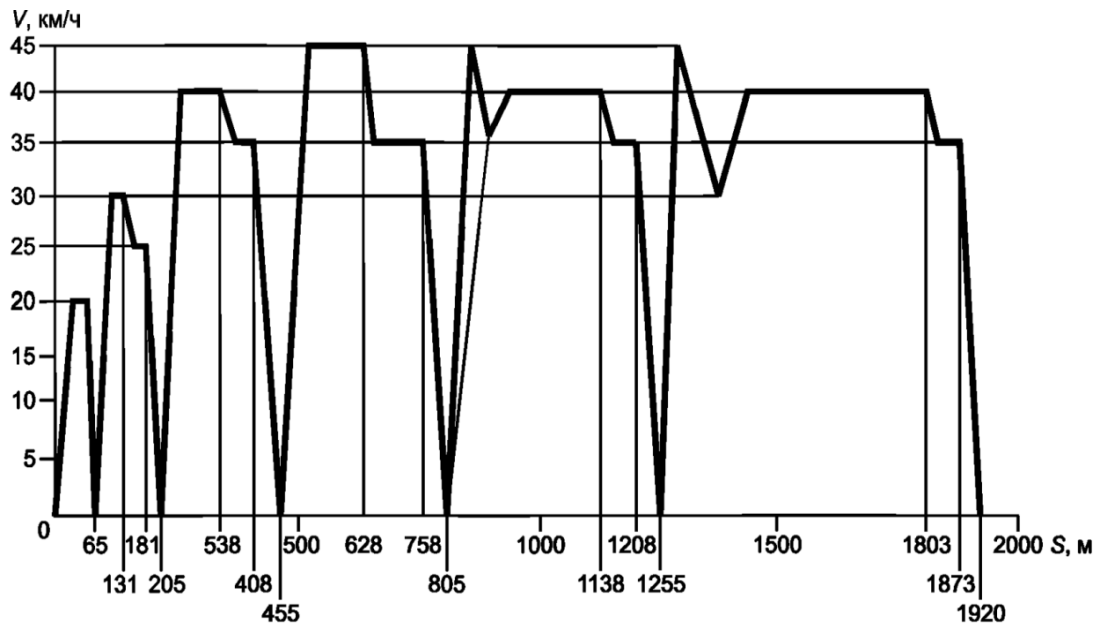


Рис. 5. Схема цикла движения [ГОСТ Р 54810-2011]

Fig. 5. Motion cycle diagram [GOST R 54810-2011]

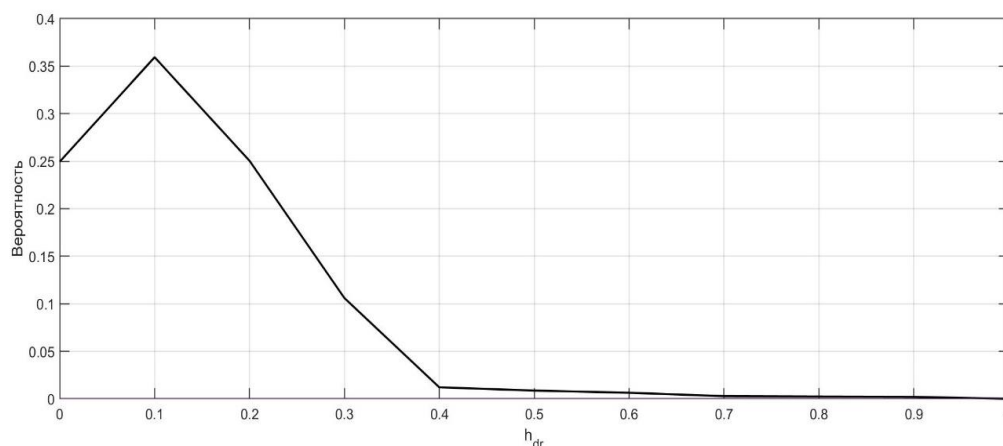


Рис. 6. Плотность вероятности положения педали акселератора для варианта с прямым управлением моментом (двухпедальное управление)

Fig. 6. Probability density of the accelerator pedal position for the option with direct torque control (two pedal control)

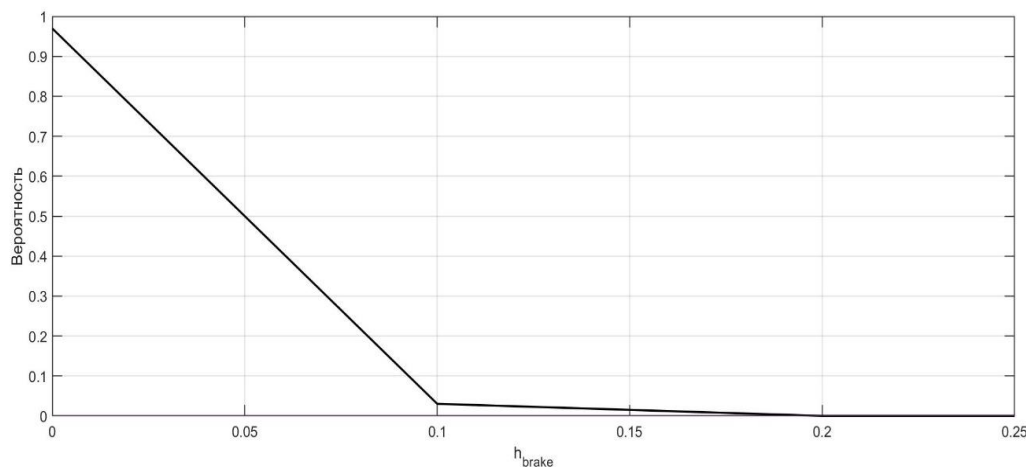


Рис. 7. Плотность вероятности положения педали тормоза для варианта с прямым управлением моментом (двухпедальное управление)

Fig. 7. Probability density of the brake pedal position for the option with direct torque control (two pedal control)

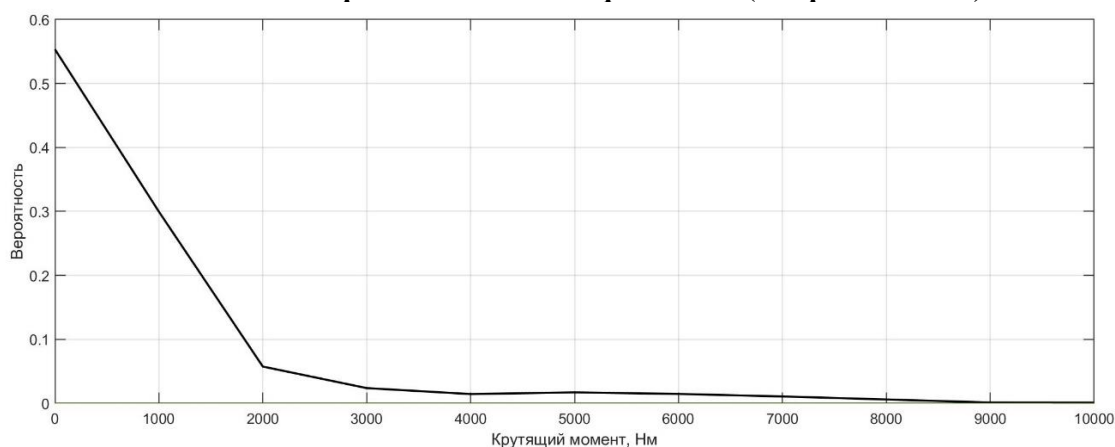


Рис. 8. Плотность вероятности крутящего момента на ведущем колесе для варианта с прямым управлением (двухпедальное управление)

Fig. 8. Probability density of torque on the drive wheel for the option with direct control (two-pedal control)

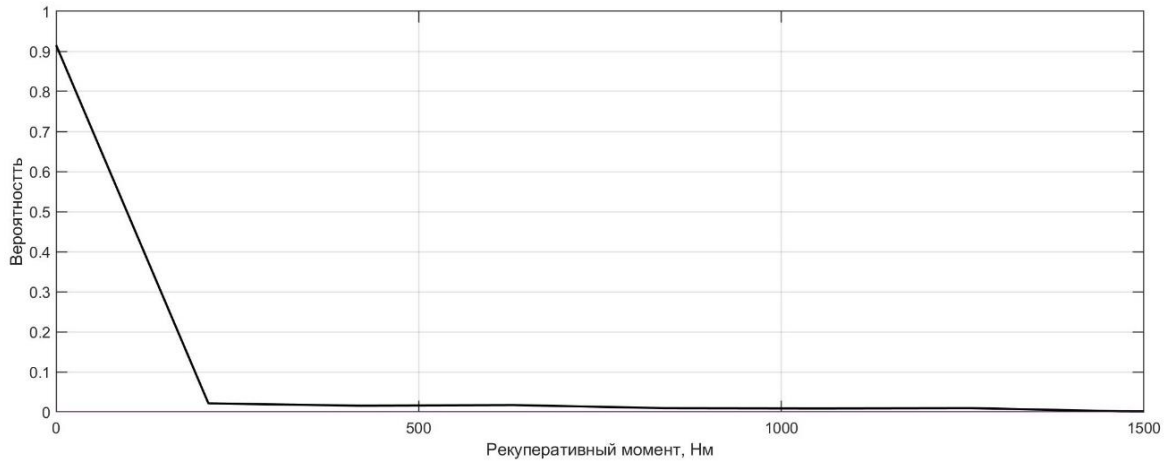


Рис. 9. Плотность вероятности рекуперативного момента на ведущем колесе для варианта с прямым управлением моментом (двухпедальное управление)

Fig. 9. Probability density of regenerative torque on the drive wheel for the option with direct torque control (two pedal control)

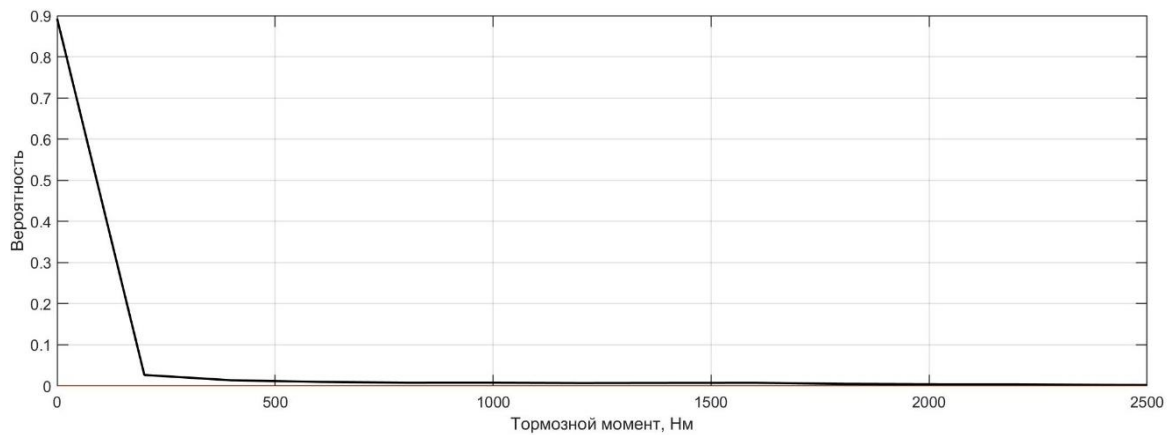


Рис. 10. Плотность вероятности тормозного момента на ведущем колесе для варианта с прямым управлением моментом (двухпедальное управление)

Fig. 10. Probability density of the braking torque on the drive wheel for the option with direct torque control (two pedal control)

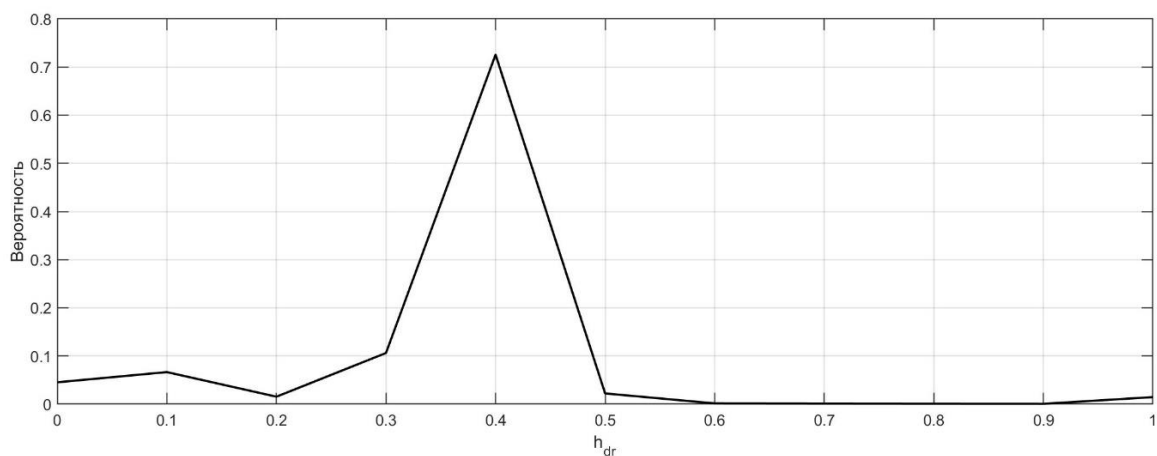


Рис. 11. Плотность вероятности положения педали хода для варианта однопедального управления

Fig. 11. Probability density of the accelerator pedal position for the single pedal control option

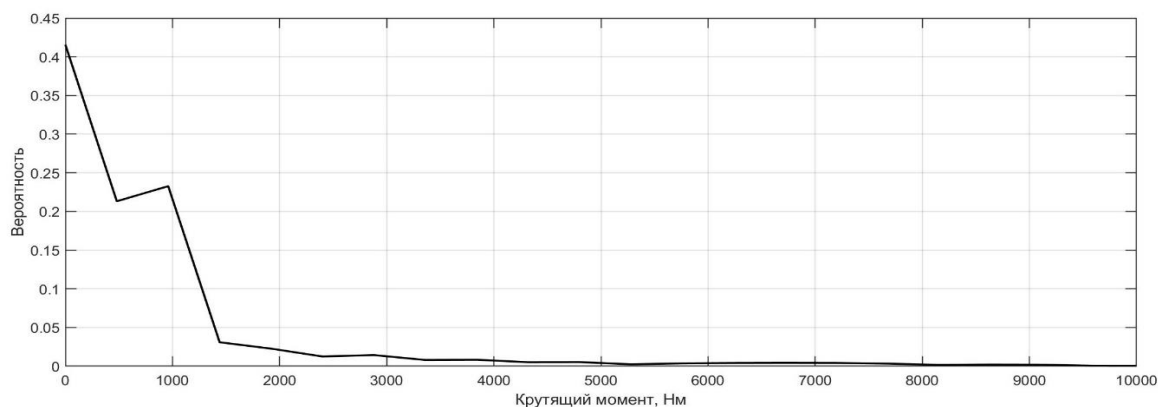


Рис. 12. Плотность вероятности крутящего момента на ведущем колесе для варианта однопедального управления

Fig. 12. Probability density of the torque on the drive wheel for the single pedal control option

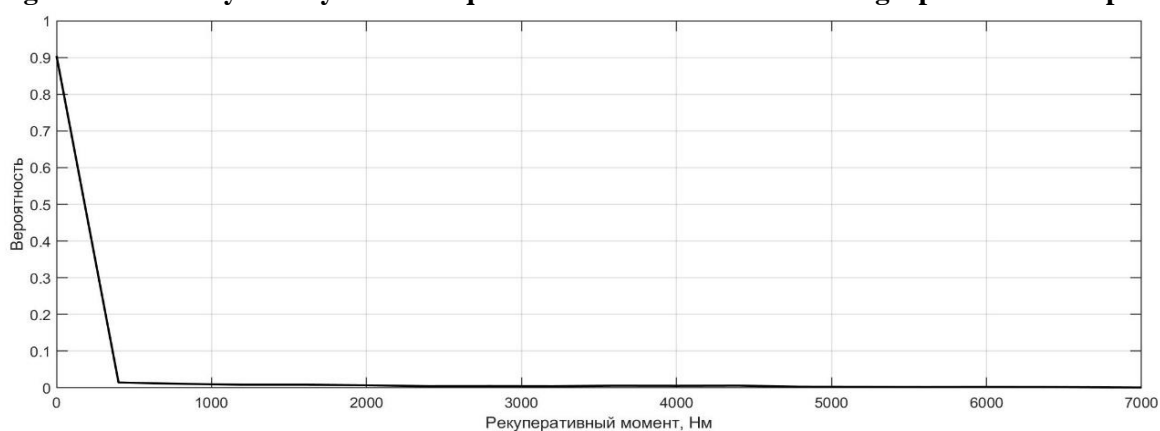


Рис. 13. Плотность вероятности рекуперативного момента на ведущем колесе для варианта однопедального управления

Fig. 13. Probability density of the regenerative torque on the drive wheel for the single pedal control option

Исследование энергоэффективности алгоритма управления с помощью педали хода при виртуальной эксплуатации с помощью имитационного моделирования

Энергоэффективность алгоритмов управления тяговым электроприводом будем оценивать по показателю удельной мощности: суммарной $W_{\text{сум}}$, которая затрачивается на движение за один километр пробега:

$$W_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{L} \int_0^t M_{ki} \omega_{ki} dt, \tag{7}$$

и рекуперативной $W_{\text{рек}}$, которая вырабатывается тяговыми электродвигателями в генераторном режиме работы и возвращается в тяговую аккумуляторную батарею за один километр пробега:

$$W_{\text{рек}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{L} \int_0^t M_{\text{рек}i} \omega_{ki} dt, \tag{8}$$

В формулах (7) и (8) L – пройденный путь, M_{ki} – полный момент на i -м ведущем колесе; $M_{\text{рек}i}$ – рекуперативный момент на i -м ведущем колесе; ω_{ki} – угловая скорость вращения i -го ведущего колеса. Суммарная средняя удельная мощность для двух вариантов управления

тяговым приводом в городском цикле движения показана на рис. 14, рекуперативная средняя удельная мощность – на рис. 15.

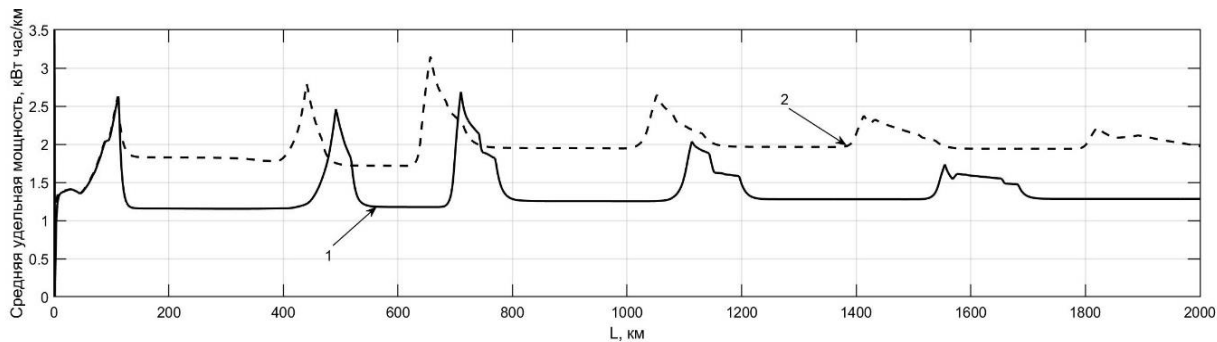


Рис. 14. Суммарная удельная мощность, затрачиваемая на движение в исследуемом цикле за один километр пробега:

1 – с однопедальным управлением; 2 – с прямым управлением моментом

Fig. 14. The total specific power spent on movement in the studied cycle per kilometer of travel:

1 – with single pedal control; 2 – with direct torque control

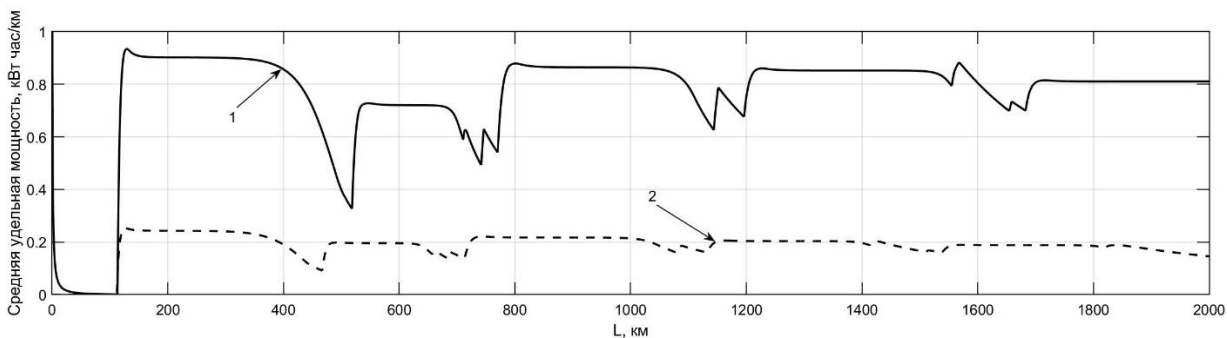


Рис. 15. Рекуперативная удельная мощность, затрачиваемая на движение в исследуемом цикле за один километр пробега:

1 – с однопедальным управлением; 2 – с прямым управлением моментом

Fig. 15. Regenerative specific power spent on movement in the studied cycle per kilometer of travel:

1 – with single pedal control; 2 – with direct torque control

Выводы

Анализ параметров движения транспортного средства с различными алгоритмами управления тяговым электроприводом показывает, что в случае, когда транспортное средство оснащено системой формирования управляющего сигнала со стороны педали хода, существенно расширяется диапазон использования педали (до 50 % от полного хода), в то время как для варианта с прямым управлением моментом основной вес приходится на 10 % и далее снижается практически до нуля на 40 % полного хода. При этом диапазоны изменения крутящих и рекуперативных моментов на ведущих колесах практически идентичны.

Удельные энергозатраты для варианта с однопедальным управлением меньше на 17...35 % (в зависимости от режима движения) по сравнению с вариантом с прямым управлением моментом тяговых электродвигателей. При этом удельная мощность рекуперации для варианта с однопедальным управлением в среднем на 300 % больше, чем для варианта с прямым управлением моментом тяговых электродвигателей, что приводит к тому, что рабочая тормозная система практически не задействована в первом случае, что дополнительно ведет к экономии ее ресурса.

Библиографический список

1. **Климов, А.В.** О некоторых конструктивных особенностях и видах транспортных тяговых электрических двигателей / А.В. Климов, В.Г. Чиркин, А.М. Тишин // Автомобильная промышленность. 2021. № 7. С. 15-21.
2. **Климов, А.В.** Различные виды тяговых синхронных двигателей для городских условий эксплуатации / А.В. Климов, А.М. Тишин, В.Г. Чиркин // Грузовик. 2021. № 6. С. 3-7.
3. **Жилейкин, М.М.** Алгоритм формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающий энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса / М.М. Жилейкин, А.В. Климов, И.К. Масленников // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 1. С. 51-60. DOI: 10.17816/2074-0530-100232
4. **Бутарович, Д.О.** Алгоритм управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора / Д.О. Бутарович, Г.И. Скотников, А.В. Эраносян // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4.
5. **Wen, He** et al. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm. Energy Procedia. 2018. 152. Pp. 624-629.
6. **Yongqiang, Zhao** et al. A research on evaluation and development of single-pedal function for electric vehicle based on PID. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1605.
7. **Hongwen He** et al. An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle. Applied Energy. 2020. 259. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114172
8. **Zhang J.** et al. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car. Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng 2012;226(10): Pp. 1289-302.
9. **Guo J.** et al. Regenerative braking strategy for electric vehicles // Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2009: pp. 864-868.
10. **Xu Guoqing,** Li Weimin, Xu Kun, et al. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J]. Energies, 2011, 4(9): pp. 1461-1477.
11. **Zhang J.** et al. Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus[J]. Energy Conversion & Management, 2013, 76(76):1117-1124.
12. **Wang J.W.** et al. Spatially Piecewise Fuzzy Control Design for Sampled-Data Exponential Stabilization of Semi-linear Parabolic PDE Systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018.
13. **Zhang Kangkang** et al. A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-wheel Drive Battery Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2015, (02): pp. 125-131.
14. **Lv C.** et al. Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles. Energy Conversion and Management, 2015. 92 Pp. 469-482.
15. **Kulas, R.A.,** Rieland, H., and Pechauer, J., "A System Safety Perspective into Chevy Bolt's One Pedal Driving," SAE Technical Paper 2019-01-0133, 2019, DOI: 10.4271/2019-01-0133
16. **Wang, J.,** Besselink, I. J. M., van Boekel, J. J. P., & Nijmeijer, H. (2015). Evaluating the energy efficiency of a one pedal driving algorithm. 1-10. Paper presented at 2015 European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Brussels, Belgium.
17. **Климов, А.В.** Способ управления индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колес многоколесного транспортного средства / А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков, М.М. Жилейкин [и др.]: патент № 2797069 С1 Российская Федерация, МПК В60К 17/12, В60L 15/20, В60L 3/10.: № 2023103483: заявл. 16.02.2023: опубл. 31.05.2023. – EDN QAUBVR.
18. **Жилейкин, М.М.** Моделирование систем транспортных средств: учебник / М.М. Жилейкин, Г.О. Котиев. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 280 с.
19. **Бирюков, В.В.** Тяговый электрический привод: учеб. пособие / В.В. Бирюков, Е.Г. Порсев. — Новосибирск: изд-во НГТУ, 2018 – 314 с.

*Дата поступления
в редакцию: 04.12.2023*

*Дата принятия
к публикации: 25.01.2024*