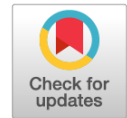


УДК 629.33

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-100232>

Оригинальное исследование



Алгоритм формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающий энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса

М.М. Жилейкин, А.В. Климов, И.К. Масленников

Инновационный центр «КАМАЗ», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для электробусов, которых сейчас все больше становится на дорогах крупных населенных пунктов, особенно актуальна задача повышения энергоэффективности движения на городском маршруте (который предполагает наличие остановок и ограничение времени движения между ними) в силу ограничений емкости бортовых источников энергии.

Цель работы. Создание алгоритма формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающего энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса.

Методы. Предложен новый метод формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, отличающийся тем, что обеспечивает работу системы «тяговый электродвигатель – преобразователь частоты» в зоне повышенного коэффициента полезного действия и ограничивает скорость нарастания уровня управляющего воздействия при резком нажатии на педаль акселератора водителем.

Результаты. Анализ результатов работы электробуса в городском цикле движения показывает, что потребляемая в процессе движения электробуса, оснащенного системами энергосбережения, суммарная осредненная электрическая мощность на 8,2% меньше, чем в случае движения электробуса, не оснащенного системами энергосбережения, в тех же условиях. Среднее значение КПД системы «тяговый привод – преобразователь частоты» электробуса, оснащенного системами энергосбережения, увеличен на 4,5%. Время движения по маршруту электробуса, оснащенного системами энергосбережения, увеличилось на 27 секунд, что является приемлемым результатом. В магистральном цикле экономия электроэнергии обеспечивалась только за счет работы противобуксовочной системы. За все время движения электробуса экономия электроэнергии составила 2,6%.

Заключение. Предложен новый метод формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, отличающийся тем, что обеспечивает работу системы «тяговый электродвигатель – преобразователь частоты» в зоне повышенного коэффициента полезного действия и ограничивает скорость нарастания уровня управляющего воздействия при резком нажатии на педаль акселератора водителем.

Ключевые слова: тяговый электропривод; городской электробус; энергоэффективное потребление электроэнергии.

Для цитирования:

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.
DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-100232>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-100232>

Original study article

Control signal algorithm of the accelerator pedal providing an effective energy consumption by an electrobus traction gear

Mikhail M. Zhileykin, Aleksandr V. Klimov, Ivan K. Maslennikov

KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: At the present moment there become more electrobuses in big towns, and the problem of the increasing their energy efficiency is actual in intertown traffic (that assumes stops and time limitation among stops) because of the limited on-board capacitors.

AIMS: Development of the control signal algorithm of the accelerator pedal providing an effective energy consumption by an electrobus traction gear.

METHODS: The new method for control signal formation of the accelerator pedal is proposed. It has a feature that provides the system operation “traction gear – frequency converter” in zone of the increased efficiency factor and limits the velocity of control signal level growing when a driver tromps gas.

RESULTS: Analysis of the electrobus operation results in intertown traffic shows, that the aggregate average electric capacity, consumed at electrobus operating equipped with the energy saving systems, is less by 8,2% than at electrobus operating without energy-saving systems at the same conditions. The average efficiency factor of the “traction gear – frequency converter” system of an electrobus equipped with energy-saving systems has been increased by 4.5%. The time of driving on the route of an electrobus equipped with energy saving systems increased by 27 seconds that is an acceptable result. Energy saving in linehaul operation was provided only by an antislip system operation. During the total time driving of the electrobus energy saving was 2.6%.

CONCLUSIONS: A new method for generating a control signal from the side of the accelerator pedal is proposed, which differs in that it ensures the operation of the “traction motor – frequency converter” system in the zone of increased efficiency and limits the rate of increase in the level of the control action when the driver abruptly presses the accelerator pedal.

Keywords: traction gear; city electrobus; effective energy consumption.

Cite as:

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. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-100232>

Received: 06.02.2022

Accepted: 16.03.2022

Published: 15.04.2022

ВВЕДЕНИЕ

Для электробусов, которых сейчас все больше становится на дорогах крупных населенных пунктов, особенно актуальна задача повышения энергоэффективности движения на городском маршруте (который предполагает наличие остановок и ограничение времени движения между ними) в силу ограничений емкости бортовых источников энергии [1–6]. В работе [7] разработан метод определения закона движения электробуса по маршруту с целью повышения его энергоэффективности. Представленный метод расчета основывается на классическом дискретном варианте метода динамического программирования Беллмана, в ходе работы которого определяются значения функции Беллмана для каждого возможного состояния электробуса на маршруте. Значения функции Беллмана представляют собой минимальные величины энергии, которые необходимо затратить на перемещение из рассматриваемой точки пространства в конечную. С использованием рассчитанных значений строится энергоэффективный закон движения электробуса на рассматриваемом участке маршрута. Недостатком предложенного подхода является невозможность для наземного городского транспорта жестко выдерживать график движения по маршруту, что характерно скорее для воздушного и рельсового наземного транспорта.

Целью работы является разработка алгоритма формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающего энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА СО СТОРОНЫ ПЕДАЛИ АКСЕЛЕРАТОРА

Рассмотрим реализацию управляющего воздействия h_{dr} со стороны педали акселератора, на которую воздействует водитель. Сигнал h_{dr} изменяется в диапазоне от нуля (педаль отпущена) до единицы (педаль полностью нажата). Процесс управления тяговым электродвигателем (ТЭД) при нажатии на педаль акселератора можно представить в виде траектории изображающей точки на поле моментных характеристик электродвигателя (рис. 1).

Рассмотрим один случай управления $h_{dr-1} \rightarrow h_{dr-2}$, $h_{dr-1} < h_{dr-2}$ (показано пунктирной стрелкой на рис. 1). Водитель нажимает педаль за достаточно короткий промежуток времени, и изображающая точка на рис. 1 должна переместиться из положения 1 в положение 2. Однако траектория 1→2 не является рациональной

с точки зрения энергоэффективной работы ТЭД + преобразователь частоты (ПЧ), т. к. изображающая точка поднимается вертикально вверх, где расположена зона пониженного КПД. Пример зависимости значений КПД (%) синхронного тягового электродвигателя с преобразователем частоты от частоты вращения ротора и крутящего момента на валу приведен на рис. 2.

Для обеспечения энергоэффективного перехода определимся, что означает пришедшее с педали акселерометра задание $h_{dr-1} \rightarrow h_{dr-2}$, $h_{dr-1} < h_{dr-2}$. Уровень нажатия педали h_{dr-1} соответствует моментной характеристике А тягового электродвигателя (рис. 1), уровень нажатия h_{dr-2} – моментной характеристике Б. Следовательно, задание $h_{dr-1} \rightarrow h_{dr-2}$, $h_{dr-1} < h_{dr-2}$ означает необходимость совершить переход с одной моментной характеристики на другую, причем для $h_{dr-1} < h_{dr-2}$ такой переход возможен только вправо и вверх (кривая В на рис. 1), т. к. при увеличении степени нажатия на педаль акселерометра обороты двигателя будут расти. Тем не менее мы можем управлять траекторией перехода В, т. к. эту линию следует прокладывать в области наиболее высоких значений КПД.

Пересечение траектории В и характеристики Б (конечная точка перехода – точка 3) должно находиться в зоне максимального КПД. При этом достаточно обеспечить пролегание траектории перехода В в некоторой области высоких КПД, не решая задачу оптимизации методами динамического программирования, т. к. сам переход достаточно быстротечен по времени и большого выигрыша в энергоэффективности такая оптимизация не даст.

Введем новую систему декартовых координат (M^*, ω^*) с началом в точке 1 (рис. 1). Сформулируем задачу оптимального энергоэффективного перехода как задачу минимизации удельного нарастания тягового усилия [8]. Критерий качества управления

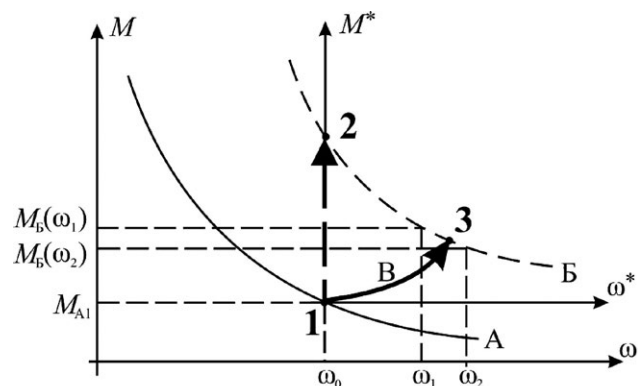


Рис. 1. Принцип формирования траектории оптимального перехода изображающей точки при нажатии на педаль акселератора.

Fig. 1. Path formation concept for optimal transition of a representative point at depressing of accelerator.

Выражения для траектории оптимального перехода в системе координат (M^*, ω^*)

$$M^* = (\sqrt{2} - 1)\omega^*; \quad (4)$$

$$M^* = (1 - \sqrt{2})\omega^*. \quad (5)$$

Вариант (5) нереализуем, т.к. изображающая точка на рис. 1, как уже было сказано, может перемещаться только вправо и вверх. Таким образом, оптимальной траекторией является вариант (4).

Выражение (4) в системе координат (M, ω) можно получить заменой переменных $M = M^* + M_{A1}$, $\omega = \omega^* + \omega_0$. Управляющее воздействие h_{dr} со стороны педали акселератора рассчитывается так:

$$h_{dr} = \frac{M(\omega)}{M_{\max}(\omega)}, \quad (6)$$

где $M_{\max}(\omega)$ – максимальный доступный крутящий момент для угловой скорости вала ω .

Перепишем (4) с учетом (6).

$$M_{\max}(\omega)h_{dr} = (\sqrt{2} - 1)(\omega - \omega_0).$$

После приведения подобных членов получим

$$h_{dr} = \frac{\sqrt{2} - 1}{M_{\max}(\omega)}\omega - \frac{\sqrt{2} - 1}{M_{\max}(\omega)}\omega_0. \quad (7)$$

Управление (7) можно реализовать, ограничивая скорость изменения управляющего параметра h_{dr} величиной

$$\frac{\sqrt{2} - 1}{M_{\max}(\omega)}.$$

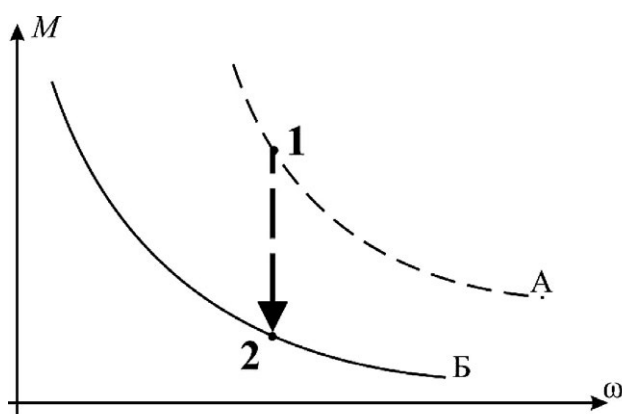


Рис. 3. Принцип формирования траектории оптимального перехода изображающей точки при отпускании педали акселератора.

Fig. 3. Path formation concept for optimal transition of a representative point at throttle lift off.

Рассмотрим второй случай управления $h_{dr_1} \rightarrow h_{dr_2}$, $h_{dr_1} > h_{dr_2}$ (показано пунктирной стрелкой на рис. 3). Ввиду особенностей расположения зон КПД синхронного тягового электродвигателя с преобразователем частоты (рис. 2) наиболее энергоэффективным будет управление, показанное на рис. 3: переход из точки 1 в точку 2 осуществляется в реальном темпе времени со скоростью отпускания водителем педали акселератора. При этом изображающая точка всегда попадает в зону с наиболее высоким КПД.

ПРОВЕРКА МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТСПОСОБНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ПРОТИБУКВОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОБУСА

Критерии работоспособности и эффективности

В качестве критериев энергоэффективности примем следующие показатели.

1. Суммарная осредненная активная электрическая мощность W_m , потребляемая тяговыми электродвигателями в течение тестового заезда электробуса:

$$W_m = \sum_{i=1}^n \int_0^t |U_{Si}| |I_{Si}| \cos \varphi_i dt,$$

где t – время тестового заезда электробуса; $|U_{Si}|$ – среднеквадратическое значение суммарного вектора напряжения статора i -го ТЭД; $|I_{Si}|$ – среднеквадратическое значение суммарного вектора тока статора i -го ТЭД; φ_i – угол между векторами тока и напряжения статора i -го ТЭД; n – количество тяговых электродвигателей.

2. Суммарная осредненная электрическая мощность W_{PBS} рекуперации, возвращаемая тяговыми электродвигателями в батарею в течение тестового заезда электробуса:

$$W_{PBS} = \sum_{i=1}^n \int_0^t M_{PBSi} \omega_{ki} \eta(M, \omega) dt,$$

где M_{PBSi} – рекуперативный момент i -го ТЭД; ω_{ki} – угловая скорость вращения ротора i -го ТЭД; $\eta(M, \omega)$ – коэффициент полезного действия i -й системы «тяговый электродвигатель – преобразователь частоты».

3. Суммарное осредненное значение КПД в течение тестового заезда электробуса (для движения в городском или пригородном режимах):

$$\eta_m = \frac{1}{t} \int_0^t \eta(M, \omega) dt.$$

Объект испытаний

В качестве объекта испытаний был принят электробус КАМАЗ-6282, технические характеристики которого приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены технические характеристики синхронного электродвигателя, который использовался в качестве тягового привода.

Условия проведения испытаний

Исследование эффективности и работоспособности всех разработанных алгоритмов управления тяговым синхронным электроприводом электробуса проводились в следующих режимах.

1. Движение в городском цикле [9] для АТС категорий М3 классов I и II (городские и пригородные автобусы, используемые для перевозки пассажиров, имеющие, помимо места водителя, более восьми мест для сидения, максимальная масса которых превышает 5 тонн).
2. Движение в магистральном цикле [9] для АТС категорий М3 класса II (пригородные автобусы, используемые

для перевозки пассажиров, имеющие, помимо места водителя, более восьми мест для сидения, максимальная масса которых превышает 5 тонн).

Проводилось исследование движения электробуса на твердом опорном основании «сухой асфальт» (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном скольжении $\mu_{\text{сmax}}=0,80$). Отметим, что под термином «опорное основание» понимается только твердая недеформируемая опорная поверхность, представляющая собой поле неровностей, спектральные характеристики которого соответствуют дорогам городского поселения [10].

Математическая модель движения электробуса представлена в работе [11], модель синхронного тягового электродвигателя – в [12].

Виртуальным испытаниям подвергался электробус, оснащенный следующими энергосберегающими системами:

- противобуксовочной системой [11];

Таблица 1. Технические характеристики электробуса КАМАЗ-6282**Table 1.** KAMAZ-6282 electrobus performance

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Полная масса электробуса, кг	18 000
2.	Распределение полной массы по осям, кг	6400 / 11 600
3.	Габариты ДхШхВ, мм	12 350 x 2550 x 2770
4.	Колесная база, мм	6170
5.	Колея передняя, мм	2120
6.	Колея задняя, мм	1845
7.	Шины	275/70 R22,5
8.	Передняя подвеска	независимая, пневматическая
9.	Задний мост	портальный с пневмоэлементами

Таблица 2. Технические характеристики синхронного ТЭД**Table 2.** Synchronous traction gear performance

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Номинальная мощность, кВт	109
2.	Номинальный крутящий момент, Нм	260
3.	Среднеэффективное значение потребляемого тока при номинальном крутящем моменте, А	163
4.	Номинальная частота вращения ротора, об/мин	4000
5.	Напряжение питания, В	640
6.	Число пар полюсов	5
7.	Активное сопротивление обмоток статора, Ом	0,01476
8.	Коэффициент полезного действия, %	97
9.	Несущая частота ШИМ, Гц	10 000

- системой формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора;
- системой регулирования токов в системе векторного управления синхронного двигателя с постоянными магнитами с целью обеспечения максимального тягового момента [12].

В качестве базы для сравнения использовался такой же электробус, не оснащенный всеми этими системами.

Городской цикл движения

На рис. 4 и 5 приведены основные параметры движения электробуса, оснащенного энергосберегающими системами управления электроприводом.

Численные значения критериев энергоэффективности по итогам заезда в городском режиме движения приведены в табл. 3.

Анализ результатов электробуса в городском цикле движения показывает, что потребляемая в процессе движения электробуса, оснащенного системами энергосбережения, суммарная осредненная электрическая мощность на 7,63% меньше, чем в случае движения электробуса, не оснащенного системами энергосбережения, в тех же условиях. Кроме того, суммарная осредненная электрическая мощность W_{PBS} рекуперации, возвращаемая тяговыми электродвигателями в батарею в течение тестового заезда электробуса с ПБС,

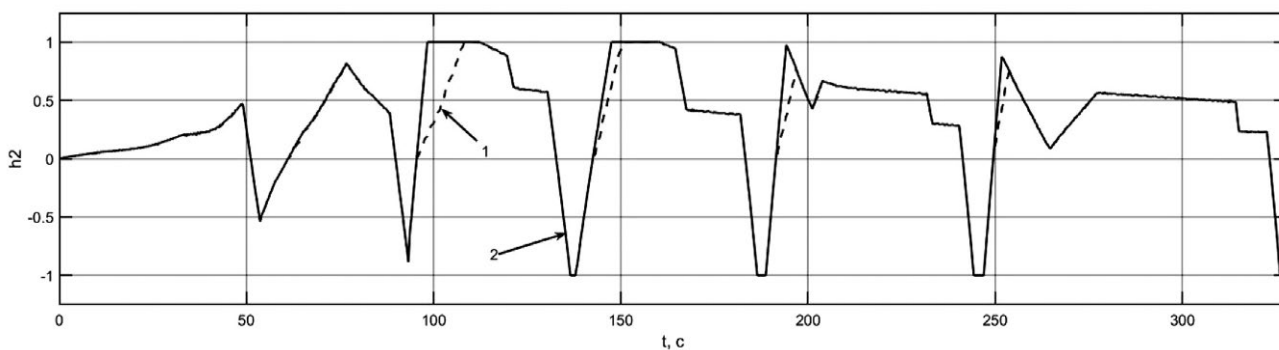


Рис. 4. Изменение во времени параметра h_{dr} для электробуса, оснащенного системами энергосбережения: 1 – сигнал регулятора; 2 – сигнал с педали акселератора.

Fig. 4. Time change of parameter h_{dr} for an electric bus equipped with energy saving systems: 1 – regulator signal; 2 – signal from the accelerator pedal.

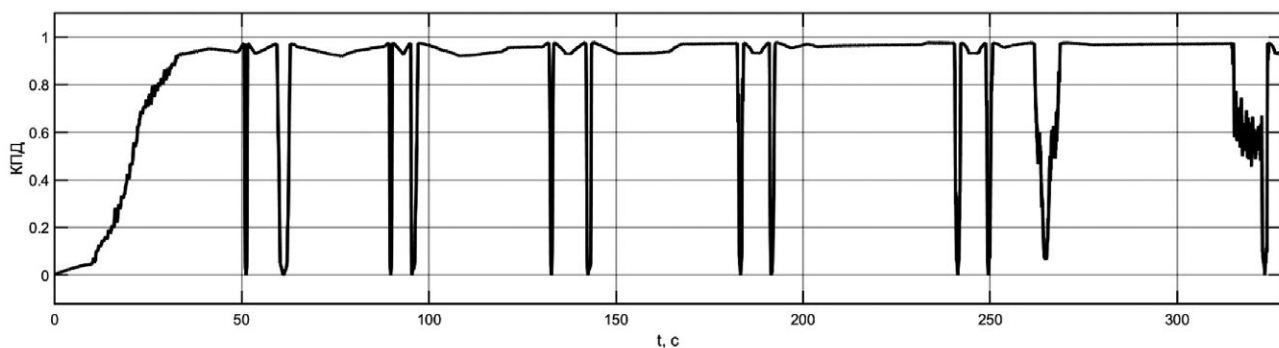


Рис. 5. Изменение КПД системы «электродвигатель – преобразователь частоты» во времени электробуса, оснащенного системами энергосбережения.

Fig. 5. Change in the efficiency of the “electric motor - frequency converter” system over time of an electric bus equipped with energy saving systems.

Таблица 3. Численные значения критериев энергоэффективности по итогам заездов

Table 3. Efficiency criteria values on turning results

№	Критерий	С системой	Без системы
1	W_m , кВт	86,0	93,1
2	W_{PBS} , кВт	0,48	–
3	η_m	0,862	0,817

составила 0,48 кВт. Таким образом, в городском цикле движения суммарная экономия за счет снижения энергопотребления и за счет возврата части энергии обратно в батарею при рекуперативном подтормаживании ведущих колес составила 8,2% от суммарной осредненной электрической мощности W_m , потребляемой тяговыми электродвигателями электробуса, не оснащенного системами энергосбережения. Среднее значение КПД системы «тяговый привод – преобразователь частоты» электробуса, оснащенного системами энергосбережения, увеличен на 4,5%. Время движения по маршруту электробуса, оснащенного системами энергосбережения, увеличилось на 27 секунд, что является приемлемым результатом.

Магистральный цикл движения

Результаты моделирования показали, что при движении по магистральному циклу движения система формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора не была задействована, о чем свидетельствуют циклограммы изменения сигнала с педали акселератора и сигнала регулятора h_{dr} (рис. 6). Как видно из графиков на рис. 6, эти сигналы совпадают.

В магистральном цикле экономия электроэнергии обеспечивалась только за счет работы противобуксовочной системы. За все время движения электробуса суммарная осредненная потребляемая электрическая мощность W_m составила 66 кВт, суммарная осредненная электрическая мощность W_{PBS} рекуперации, возвращаемая тяговыми электродвигателями в батарею, составила 1,7 кВт. Экономия электроэнергии составила 2,6%.

ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора,

отличающийся тем, что обеспечивает работу системы «тяговый электродвигатель – преобразователь частоты» в зоне повышенного коэффициента полезного действия и ограничивает скорость нарастания уровня управляющего воздействия при резком нажатии на педаль акселератора водителем.

2. Анализ результатов электробуса в городском цикле движения показывает, что потребляемая в процессе движения электробуса, оснащенного системами энергосбережения, суммарная осредненная электрическая мощность на 8,2% меньше, чем в случае движения электробуса, не оснащенного системами энергосбережения, в тех же условиях. Среднее значение КПД системы «тяговый привод – преобразователь частоты» электробуса, оснащенного системами энергосбережения, увеличен на 4,5%. Время движения по маршруту электробуса, оснащенного системами энергосбережения, увеличилось на 27 секунд, что является приемлемым результатом.
3. В магистральном цикле экономия электроэнергии обеспечивалась только за счет работы противобуксовочной системы. За все время движения электробуса экономия электроэнергии составила 2,6%.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. М.М. Жилейкин – разработка алгоритма работы противобуксовочной системы электробуса; А.В. Климов – проверка стабилизирующих качеств противобуксовочной системы; И.К. Масленников – анализ энергосберегающих качеств противобуксовочной системы. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

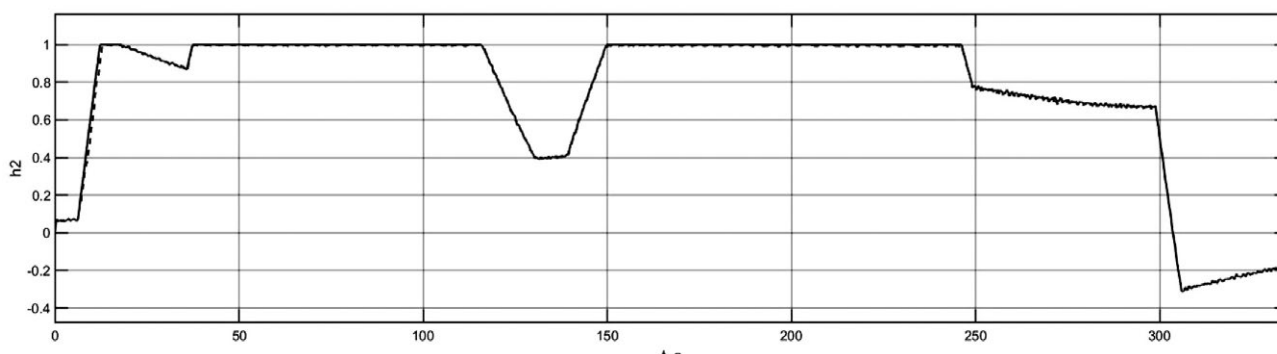


Рис. 6. Изменение во времени параметра h_{dr} для электробуса, оснащенного системами энергосбережения: 1 – сигнал регулятора; 2 – сигнал с педали акселератора.

Fig. 6. Factor h_{dr} time-history for an electrobus equipped with energy-saving systems: 1 – signal of a regulator; 2 – accelerator pedal.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. Zhileykin M.M. – development of algorithm of traction control system of electric buses; Klimov A.V. – check of stabilizing qualities of traction control

system; Maslennikov I.K. – analysis of energy-saving qualities of traction control system. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work (according to international ICMJE criteria).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhan W., Liu C., Chan C.-Y., Tomizuka M. A non-conservatively defensive strategy for urban autonomous driving. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC); 2016 November 01–04; Rio de Janeiro, Brazil. P. 459–464.
2. Paden B., Cap M., Yong S.Z., et al. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2016. Vol. 1, N 1. P. 33–55. doi: 10.1109/tiv.2016.2578706
3. Qian X., de La Fortelle A., Moutarde F. A hierarchical Model Predictive Control framework for on-road formation control of autonomous vehicles. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV); 2016 June 19–22; Gothenburg, Sweden. P. 376–381.
4. Kuwata Y., Karaman S., Teo J., et al. Real-Time Motion Planning With Applications to Autonomous Urban Driving // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2009. Vol. 17, N 5. P. 1105–1118. doi: 10.1109/tcst.2008.2012116
5. Chang C.S., Sim S.S. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms // IEE Proceedings – Electric Power Applications. 1997. Vol. 144, N 1. P. doi: 10.1049/ip-epa:19970797
6. Kotiev G.O., Butarovich D.O., Kositsyn B.B. Energy efficient motion control of the electric bus on route // IOP Conference

Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 315. doi: 10.1088/1757-899x/315/1/012014

7. Бутарович Д.О., Косицын Б.Б., Котиев Г.О. Метод разработки энергоэффективного закона управления электробусом при движении по городскому маршруту // Труды МАМИ. 2017. № 2. С. 16–27.

8. Иванов В.А., Медведев В.С. Математические основы теории оптимального и логического управления: учеб. пособие. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.

9. ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> Дата обращения: 13.06.2022.

10. Афанасьев Б.А. Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов; В 3 т. / под ред. А.А. Полуняна. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.

11. Жилейкин М.М., Котиев Г.О. Моделирование систем транспортных средств: учебник. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2020.

12. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2015.

REFERENCES

1. Zhan W, Liu C, Chan C-Y, Tomizuka M. A non-conservatively defensive strategy for urban autonomous driving. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC); 2016 November 01–04; Rio de Janeiro, Brazil. P. 459–464.
2. Paden B, Cap M, Yong SZ, et al. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2016;1(1):33–55. doi: 10.1109/tiv.2016.2578706
3. Qian X, de La Fortelle A, Moutarde F. A hierarchical Model Predictive Control framework for on-road formation control of autonomous vehicles. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV); 2016 June 19–22; Gothenburg, Sweden. P. 376–381.
4. Kuwata Y, Karaman S, Teo J, et al. Real-Time Motion Planning With Applications to Autonomous Urban Driving. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2009;17(5):1105–1118. doi: 10.1109/tcst.2008.2012116
5. Chang CS, Sim SS. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*. 1997;144(1). doi: 10.1049/ip-epa:19970797

6. Kotiev GO, Butarovich DO, Kositsyn BB. Energy efficient motion control of the electric bus on route. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;315. doi: 10.1088/1757-899x/315/1/012014

7. Butarovich DO, Kositsyn BB, Kotiev GO. A method for developing an energy-efficient law controlling the electric bus city route. 2017;(2):16–27. (In Russ).

8. Ivanov VA, Medvedev VS. *Matematicheskie osnovy teorii optimal'nogo i logicheskogo upravleniya: ucheb. posobie*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2011. (In Russ).

9. GOST R 54810-2011. Motor vehicles. Fuel economy. Test methods. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> Accessed: Jun 13, 2022. (In Russ).

10. Afanas'ev BA, Polungyan AA, editor. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin: uchebnik dlya vuzov; V 3 t*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2008. (In Russ).

11. Zhileikin MM, Kotiev GO. *Modelirovanie sistem transportnykh sredstv: uchebnik*. Moscow: Izda-tel'stvo MGTU im. N.E.Bauman; 2020. (In Russ).

12. Anuchin AS. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Izdatel'skii dom MEI; 2015. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

***Жилейкин Михаил Михайлович,**

д-р техн. наук,
руководитель группы инженерных расчетов;
адрес: Россия, 143026, Москва,
Инновационный центр Сколково, ул. Большой бул., 62;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8851-959X>;
eLibrary SPIN: 6561-3300;
e-mail: ZhileykinMM@kamaz.ru

Климов Александр Владимирович,

канд. техн. наук,
руководитель службы электрифицированных автомобилей;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5351-3622>;
eLibrary SPIN: 7637-3104;
e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

Масленников Иван Константинович,

ведущий инженер-программист
служба электрифицированных автомобилей;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-0098>;
eLibrary SPIN: 5320-2940;
e-mail: MaslennikovIK@kamaz.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS INFO

***Mikhail M. Zhileykin,**

Dr. Sci. (Engin.),
Head of the Engineering Calculations Group;
address: 62 Bolshoy Boulevard, Innovation center Skolkovo,
Moscow, 143026, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8851-959X>;
eLibrary SPIN: 6561-3300;
e-mail: ZhileykinMM@kamaz.ru

Aleksandr V. Klimov,

Cand. Sci. (Engin.),
Head of the Electric Vehicles Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5351-3622>;
eLibrary SPIN: 7637-3104;
e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

Ivan K. Maslennikov,

Lead Software Engineer
Electric Vehicles Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-0098>;
eLibrary SPIN: 5320-2940;
e-mail: MaslennikovIK@kamaz.ru

* Corresponding author