

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-115039>

Оригинальное исследование



# Метод рационального индивидуального управления тяговыми электродвигателями электропортального моста при движении в повороте

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

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В последние годы в мировой автомобильной промышленности проявляется повышенный интерес к тяговому электроприводу на безрельсовых транспортных средствах, среди которых электромобили, электробусы и электрогрузовики, где применяются различные схемы привода. Одной из распространенных схем привода является индивидуальный тяговый электропривод, часто встречающийся на современных электробусах. Индивидуальный тяговый электропривод обладает такими преимуществами, как надежность в сохранении тяговых или тормозных усилий в случае выхода из строя одного из двигателей, компактное размещение двигателей, низкий уровень пола по всей длине салона и адаптация работы тягового электропривода к дорожным условиям. Последний пункт перечисленных преимуществ требует разработки сложной системы управления.

**Цель работы** — разработка алгоритма распознавания «рыскания» и формирование алгоритма конструирования регулятора, предназначенного для перераспределения крутящих моментов.

**Материалы и методы.** Моделирование работы алгоритма распознавания «рыскания» при имитационных испытаниях в программном пакете *MATLAB&Simulink*. Выводятся основные зависимости с последующим получением фазовой переменной для корректной работы оптимального регулятора.

**Результаты.** Разработан алгоритм распознавания «рыскания», формирующего перераспределение крутящих моментов между ведущими колесами. Представлен алгоритм конструирования оптимального регулятора. Введены такие понятия, как теоретический и фактический параметры движения. Проводится имитационное моделирование пространственного движения электробуса в программном пакете *MATLAB&Simulink*, показывающее работоспособность и эффективность разработанной системы. Научной новизной является формирование оптимального регулятора, благодаря которому осуществляется перераспределение крутящих моментов.

**Заключение.** Практическая ценность разработки и исследования заключается в возможности применения алгоритма и закона управления для транспортных средств, оборудованных индивидуальным тяговым электроприводом.

**Ключевые слова:** электробус; тяговый электропривод; перераспределение моментов; алгоритм.

## Как цитировать:

Антонян А.В. Метод рационального индивидуального управления тяговыми электродвигателями электропортального моста при движении в повороте // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 1. С. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-115039>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-115039>

Original study article

# The method of efficient individual control of electric traction motors of an electric portal axle during cornering

Akop V. Antonyan<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> KAMAZ Innovation Center LLC, Skolkovo Innovation Center, Moscow, Russian Federation;<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** In recent years, the global automotive industry has shown increased interest in electric traction drive for road vehicles, including electric cars, electric buses and electric trucks, where various drive layouts are used. One of the most widespread drive layouts is an individual electric traction drive, which is often used in modern electric buses. The individual electric traction drive has such advantages as reliability in sustaining traction or braking forces in case of failure of one of the engines, compact placement of engines, low floor level along the entire length of the cabin and adaptation of the electric traction drive to road conditions. The last point of the mentioned advantages requires the development of an advanced control system.

**AIMS:** Development of the yaw recognition algorithm and formation of the algorithm for designing a torque redistribution regulator.

**METHODS:** Modeling of the operation of the yaw recognition algorithm is carried out during simulation tests in the MATLAB/Simulink software package. The main dependencies are derived, followed by obtaining a phase variable, for the correct operation of the optimal controller.

**RESULTS:** The yaw recognition algorithm, which forms the torque redistribution between the driving wheels, is developed, an algorithm for designing an optimal regulator was developed, such concepts as theoretical and actual motion parameters are introduced. Simulation modeling of the spatial movement of an electric bus is carried out in the MATLAB/Simulink software package, showing the operability and efficiency of the developed system. The scientific novelty is the formation of the optimal regulator, making torque redistribution possible.

**CONCLUSIONS:** The practical value of the development and research lies in the possibility of applying the algorithm and the control law for vehicles equipped with the individual electric traction drive.

**Keywords:** *electric bus; electric traction drive; torque redistribution; algorithm.*

## To cite this article:

Antonyan AV. The method of efficient individual control of electric traction motors of an electric portal axle during cornering. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(1):77–85. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-115039>

Received: 06.12.2022

Accepted: 01.04.2023

Published online: 15.04.2023

## ВВЕДЕНИЕ

В период с 2010 по 2020 годы в мировой автомобильной промышленности стал проявляться повышенный интерес к тяговому электроприводу на электромобилях и автомобилях с комбинированной силовой установкой. Перед автомобильными инженерами стоит задача применить тяговый электропривод не только на легковых автомобилях, но и на большегрузных транспортных средствах, в том числе на электробусах. Среди крупных безрельсовых городских транспортных средств тяговый электропривод встречался на троллейбусах. В них в большинстве случаев применялась классическая схема привода, где использовались карданная передача и межколесный дифференциал. Преимуществом такой схемы является простота и унификация с конструкцией автобуса. Существенным недостатком является занимаемое электродвигателем пространство в салоне и невозможность перераспределения крутящих моментов между ведущими колесами, что особенно актуально при трогании на скользкой опорной поверхности. Поэтому наибольший интерес вызывают схемы с индивидуальным приводом колес, которые лишены недостатков, присущих классическим схемам. Примером применения подобных схем могут выступать электрические порталы ведущие мосты.

На сегодняшний день известно три производителя электрических порталов ведущих мостов *ZahnradFabrik* [1], *HanDe* [2] и *Allison* [3]. Схема привода подразумевает жесткую кинематическую связь между ротором электродвигателя и ведущим колесом. Его преимуществом является надежность в сохранении тяговых или тормозных усилий в случае выхода из строя одного из двигателей [4], компактное размещение двигателей, низкий уровень пола по всей длине салона и адаптация работы тягового электропривода к дорожным условиям, особенно — к условиям сцепления колеса с дорогой [5]. Одним из известных вариантов исполнения является применение редуктора, содержащего два планетарных механизма, как например в патенте DE 10 2011 089 021 A1 фирмы ZF [6]. Применение подобной схемы требует более сложной системы управления, в частности, индивидуальное управление ведущими колесами правого и левого бортов. Требуется разработка законов и алгоритмов управления, следящих за запросами водителя и оценивающих параметры движения транспортного средства. Представленная работа посвящена этой теме.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ «РЫСКАНИЯ»

Частыми режимами движения электробуса, в которых необходимо индивидуальное управление ведущими колесами, являются движение в повороте и движение по разным опорным поверхностям под бортами. В первом

случае необходимо передать больший тяговый момент колесу внешнего борта и меньший — колесу внутреннего борта, так как подобное перераспределение моментов способствует повороту транспортного средства и является рациональным способом управления тяговым электроприводом. Во втором случае следует редуцировать тяговый момент на колесе с низким сцеплением с опорной поверхностью для недопущения пробуксовки колеса. В этой работе будем рассматривать алгоритм перераспределения моментов между колесами при прохождении поворотов. Далее этот алгоритм будет обозначаться алгоритмом распознавания «рыскания» [7].

Вращение транспортного средства вокруг вертикальной оси может быть обеспечено поворачивающим моментом от поперечных и продольных сил. Так как рассматривается электробус с приводом на заднюю ось с индивидуальным приводом колес, будем акцентировать внимание на формировании поворачивающего момента от продольных сил. Уравнение, формирующее поворачивающий момент [8]:

$$M_{\Pi} = (P_{xH} - P_{xBH}) \frac{B}{2},$$

где:  $M_{\Pi}$  — поворачивающий момент от продольных сил, Н·м;  $P_{xH}$ ,  $P_{xBH}$  — продольная сила на колесах наружного и внутреннего бортов соответственно, Н;  $B$  — колея колес, м.

Идея работы алгоритма распознавания «рыскания» заключается в сравнении теоретического (желаемого) и фактического параметров движения транспортного средства [9]. Под теоретическим параметром движения в работе понимается отношение радиуса  $R_{\text{борт}}^{\max}$  забегающего борта к радиусу  $R_{\text{борт}}^{\min}$  отстающего борта. Под фактическим — отношение проекций на продольную ось электробуса скорости  $v_{\text{борт}}^{\max}$  забегающего борта к скорости  $v_{\text{борт}}^{\min}$  отстающего борта [7]. При разработке последовательности вычислений принимаются допущения:

- движение в повороте осуществляется согласно идеальной кинематической схеме без увода;
- за полюс механической системы принят центр масс колесной машины;
- в алгоритме диагностирования рассматривается движение по горизонтальной плоскости;
- алгоритм проводит вычисления только во время движения.

Расчетная схема представлена на рис. 1.

Отношение скоростей бортов определится по положению управляемых колес, скорости движения и геометрических характеристик колесной машины. Проекция линейной скорости вращения борта на продольную ось колесной машины в векторной форме рассчитывается по формуле:

$$|v_{x\text{отн}}| = \omega_z \frac{B}{2},$$

где  $\omega_z$  — угловая скорость вращения транспортного средства, рад/с.

Проекция вектора скорости борта будет равна сумме векторов скорости движения колесной машины  $v_{x\text{ км}}$  и проекции линейной скорости вращения борта  $v_{x\text{ отн}}$ :

$$v_{x\text{ борт}} = v_{x\text{ км}} + v_{x\text{ отн}}.$$

Согласно расчетной схеме (рис. 1), проекции скоростей для забегавшего и отстающего бортов на продольную ось электробуса вычисляются по формулам:

$$|v_{x\text{ борт}}^{\max}| = |v_{x\text{ км}}| + |v_{x\text{ отн}}|;$$

$$|v_{x\text{ борт}}^{\min}| = |v_{x\text{ км}}| - |v_{x\text{ отн}}|.$$

Фактический параметр движения записывается по формуле:

$$\xi_{\Phi} = \frac{|v_{x\text{ борт}}^{\max}|}{|v_{x\text{ борт}}^{\min}|}.$$

Теоретический (желаемый) параметр движения может быть выражен через радиусы движения середин бортов следующим образом:

$$\xi_{\tau} = \frac{|R_{\text{борт}}^{\max}|}{|R_{\text{борт}}^{\min}|}.$$

Радиусы движения центров бортов, согласно расчетной схеме (рис. 1), вычисляются по формулам:

$$R_{\text{борт}}^{\max} = \sqrt{R_{\text{н}}^2 + l_2^2} = \sqrt{\left(\frac{L}{\text{tg}(\beta_{\text{cp}})} + \frac{B}{2}\right)^2 + l_2^2};$$

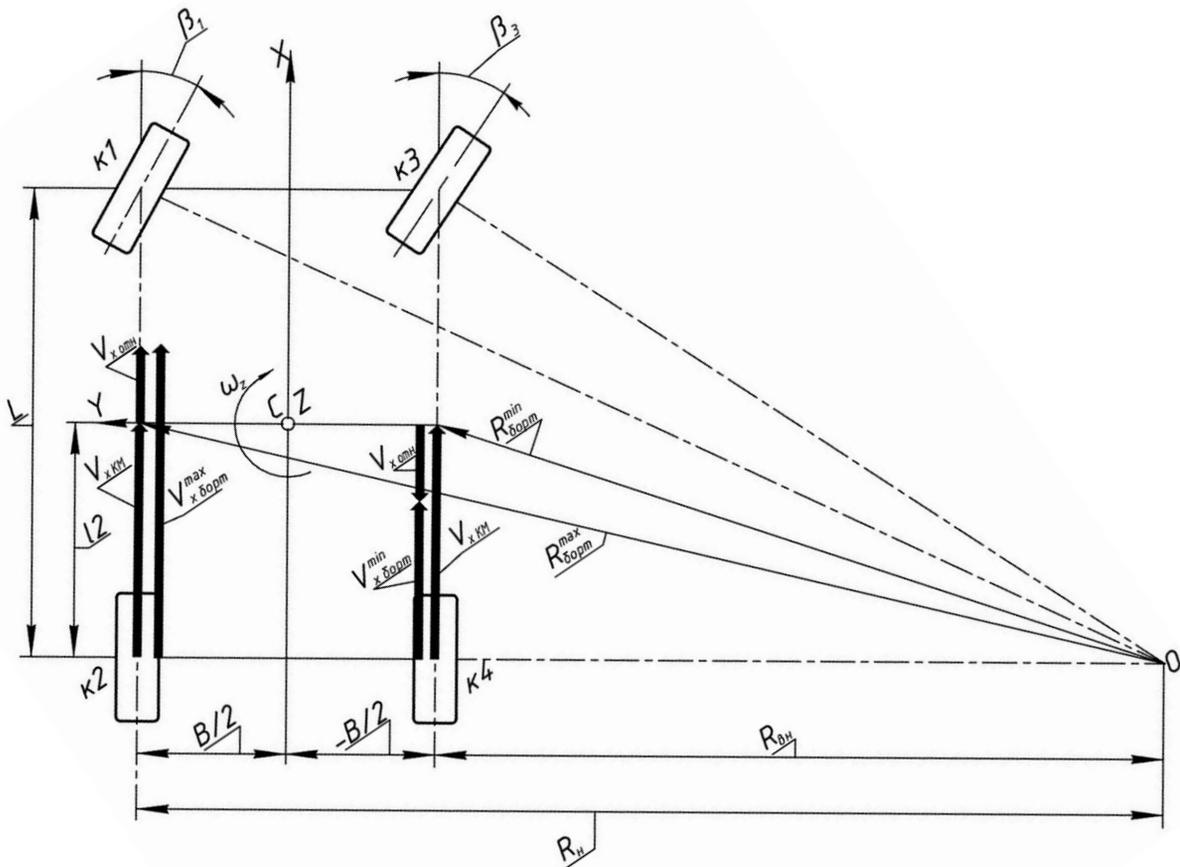
$$R_{\text{борт}}^{\min} = \sqrt{R_{\text{вн}}^2 + l_2^2} = \sqrt{\left(\frac{L}{\text{tg}(\beta_{\text{cp}})} - \frac{B}{2}\right)^2 + l_2^2},$$

где  $R_{\text{н}}$ ,  $R_{\text{вн}}$  — наружный и внутренний радиусы, м;  $l_2$  — расстояние от центра масс до задней оси, м;  $L$  — колесная база, м;  $\beta_{\text{cp}}$  — средний угол поворота управляемых колес,  $\beta_{\text{cp}} = \beta_1 + \beta_3$ , град.

Движение колесной машины по идеальной кинематической схеме без увода характеризуется тем, что разность теоретического и фактического параметров движения равна нулю:

$$\Delta\xi = \xi_{\tau} - \xi_{\Phi} = 0.$$

В вышеизложенном выводе показано получение фазовой переменной, на основе которой оптимальный регулятор формирует управляющее воздействие в виде



**Рис. 1.** Расчетная схема электробуса.  
**Fig. 1.** The analytical model of an electric bus.

крутящих моментов, используя тяговые электродвигатели, размещенные по бортам.

## АЛГОРИТМ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

В работах [8, 9] отмечено, что криволинейное движение возможно реализовать как поворотом управляемых колес (кинематический способ), так и перераспределением крутящих моментов по бортам (силовой). Тогда можно ввести коэффициент силовой асимметрии [9], который представляет собой отношение крутящего момента правого и левого колес:

$$1 < \lambda_{ас}^{сил} = \frac{M_{лев}}{M_{прав}} < \infty, \text{ при } M_{лев} > M_{прав};$$

$$1 < \lambda_{ас}^{сил} = \frac{M_{прав}}{M_{лев}} < \infty, \text{ при } M_{прав} > M_{лев},$$

где  $M_{прав}$ ,  $M_{лев}$  — крутящий момент приложенный к правому и левому колесам, соответственно, Н·м.

Применив принцип аналитического конструирования оптимального регулятора [10] и учитывая, что при движении колесной машины по идеальной кинематической схеме без увода разность теоретического и фактического параметров движения равна нулю ( $\Delta\xi = 0$ ), можно принять, что разность теоретического и фактического параметров движения в начальный момент времени  $\Delta\xi(\infty) \neq 0$ , а в бесконечный момент времени  $\Delta\xi(\infty) = 0$ . Тогда можно сделать вывод, что регулятор стремится обеспечить состояние покоя для управляемого объекта или же асимптотическую устойчивость, т. е.  $\Delta\xi \rightarrow 0$  и  $\Delta\dot{\xi} \rightarrow 0$ .

Представим фазовые переменные в следующем виде:

$$\begin{cases} x_1 = \Delta\xi, & x_2 = \dot{x}_1 = \Delta\dot{\xi}; \\ \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{J}U, \end{cases} \quad (1)$$

где  $J$  — главный момент инерции автомобиля вокруг вертикальной оси, кг·м<sup>2</sup>;  $U$  — главный вектор управляющего воздействия, Н·м.

Рассмотрим случай, при котором момент, приложенный к левому колесу, больше, чем момент, приложенный к правому. Тогда главный вектор управляющего воздействия может быть записан следующим образом:

$$U = M_{ас} = M_{лев} - M_{прав} = (R_{х\ лев} - R_{х\ прав}) \frac{B}{2}, \quad (2)$$

где  $R_{х\ прав}$ ,  $R_{х\ лев}$  — проекция продольной реакции правого и левого колес, Н;  $M_{ас}$  — разность крутящих моментов, приложенных к колесам, Н·м.

Для реакции правого и левого колес выведены следующие уравнения [9]:

$$R_{х\ прав} = \frac{R_{\Sigma\ зад} + f(G_{лев} - G_{прав} \lambda_{ас}^{сил})}{\lambda_{ас}^{сил} + 1}; \quad (3)$$

$$R_{х\ лев} = \frac{R_{\Sigma\ зад} \lambda_{ас}^{сил} + f(G_{прав} \lambda_{ас}^{сил} - G_{лев})}{\lambda_{ас}^{сил} + 1}, \quad (4)$$

где  $R_{\Sigma\ зад}$  — суммарная продольная реакция задней оси, Н;  $G_{прав}$ ,  $G_{лев}$  — сцепной вес, приложенный на правое и левое колесо, Н;  $f$  — коэффициент сопротивления качению.

Подставим реакции правого и левого колес из уравнений (3, 4) в уравнение (2). Тогда главный вектор управляющего воздействия будет записан в следующем виде:

$$\begin{aligned} U = M_{ас} &= (R_{х\ лев} - R_{х\ прав}) \frac{B}{2} = \\ &= \frac{B [R_{\Sigma\ зад} (\lambda_{ас}^{сил} - 1) - 2f(G_{лев} - G_{прав} \lambda_{ас}^{сил})]}{2(\lambda_{ас}^{сил} + 1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставим выражение вектора управляющего воздействия (5) в систему уравнений (1), тогда система уравнений будет записана в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{J} \frac{B [R_{\Sigma\ зад} (\lambda_{ас}^{сил} - 1) - 2f(G_{лев} - G_{прав} \lambda_{ас}^{сил})]}{2(\lambda_{ас}^{сил} + 1)}. \end{cases}$$

Согласно теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов, уравнение оптимального регулятора в этом случае может быть записано в следующем виде:

$$U = M_{ас} = -c_1 \Delta\xi - c_2 \Delta\dot{\xi},$$

где  $c_1$ ,  $c_2$  — коэффициенты, значения которых определяются исходя из требований к переходному процессу ( $c_1 > 0$ ,  $c_2 > 0$ ).

Окончательный вид уравнения главного вектора управляющего воздействия примет вид:

$$\begin{aligned} U &= -c_1 \Delta\xi - c_2 \Delta\dot{\xi} = \\ &= \frac{B [R_{\Sigma\ зад} (\lambda_{ас}^{сил} - 1) - 2f(G_{лев} - G_{прав} \lambda_{ас}^{сил})]}{2(\lambda_{ас}^{сил} + 1)}. \end{aligned}$$

Тогда коэффициент силовой асимметрии будет равен:

$$\lambda_{ас}^{сил} = \frac{1}{\left( \frac{c_1 \Delta\xi + c_2 \Delta\dot{\xi}}{B [R_{\Sigma\ зад} + f(G_{лев} + G_{прав})]} + 0,5 \right)} - 1.$$

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОБУСА И ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ «РЫСКАНИЯ»

Для обоснования работоспособности и эффективности алгоритма распознавания «рыскания» разработана и применена математическая модель пространственного движения электробуса колесной формулой 4×2. Математическая модель разработана на основе методов и принципов, изложенных в работах [11, 12].

Условия движения при исследовании следующие: проводится заезд по опорному основанию «асфальт» и по опорному основанию «лед со снегом», положение управляемых колес изменяется от 0° до 25° с 1 сек. по 2 сек. времени моделирования. Проводятся имитационные заезды электробусов, один из которых оборудован системой перераспределения крутящих моментов, то есть имеющий возможность формировать крутящие моменты асимметрично (Электробус 1), а другой — не оборудованный такой системой, т. е. симметрично передающий крутящие моменты между колесами (Электробус 2). Траектория движения центра масс электробусов показана на рис. 2.

Графики, показывающие рациональное перераспределение крутящих моментов между правым и левым колесом, показаны на рис. 3, *a*. На рис. 3, *b* показаны частоты вращения правого и левого колес.

Из рис. 3 видно, что алгоритм распознал движение в повороте и перераспределит больший крутящий момент забегающему колесу, а меньший — отстающему.

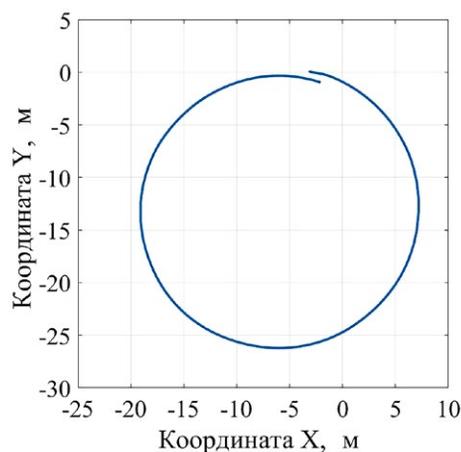
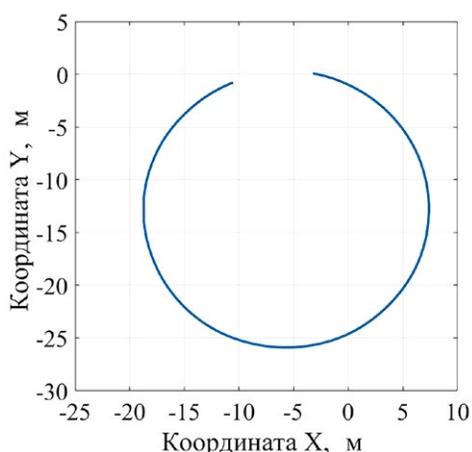
При обосновании эффективности проводится сравнение среднеквадратического отклонения коэффициента скольжения ведущих колес для двух электробусов. В табл. 1 записаны среднеквадратические отклонения коэффициентов скольжения ведущих колес при движении в повороте.

Критерием эффективности при обосновании эффективности является относительные среднеквадратические отклонения. Результаты сравнения приведены в табл. 2. Под знаком «+» подразумевается повышение эффективности, под знаком «-», соответственно, понижение. Также в таблице записаны значения общей эффективности разработанного алгоритма.

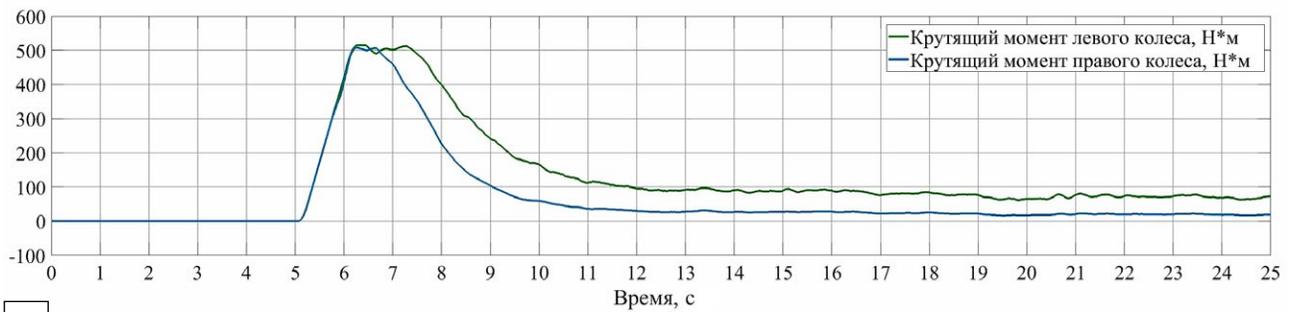
Из табл. 2 видно, что перераспределение крутящих моментов повышает эффективность на 23% при движении по опорному основанию «асфальт» и на 4% при движении по опорному основанию «лед со снегом». Из этого следует, что для дополнительного повышения эффективности, рекомендуется в системе управления индивидуальным тяговым электроприводом использовать алгоритм, распознающий и предотвращающий рассогласование скоростей ведущих колес.

## ВЫВОДЫ

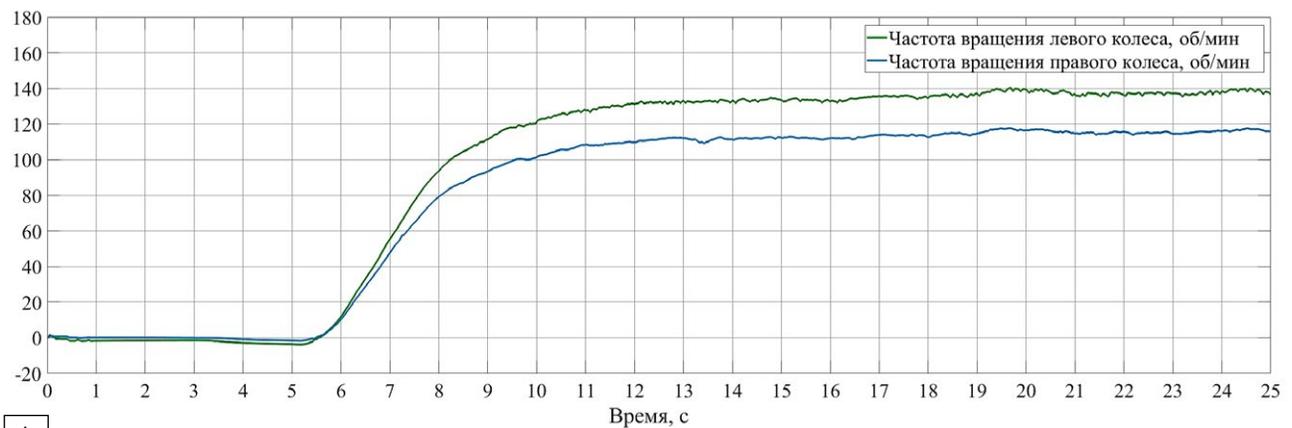
1. Введены понятия теоретического (желаемого) и фактического параметров движения транспортного средства, и на основании этого получены необходимые зависимости для разработки системы распознавания «рыскания».
2. Методом математического моделирования доказана эффективность разработанной системы распознавания «рыскания». Применение системы перераспределения крутящих моментов повышает эффективность



**Рис. 2.** Траектория движения центра масс электробусов по опорному основанию: *a*) «асфальт» и *b*) «лед со снегом».  
**Fig. 2.** Motion path of electric buses' center of gravity during motion on the "tarmac" (*a*) and "ice and snow" surface (*b*).



**a**



**b**

**Рис. 3.** Графики крутящих моментов (а) графики частот вращения (b) колес: синий — для правого колеса, зеленый для левого.  
**Fig. 3.** Graphs of torque on driving wheels (a) and graphs of rotation velocity of driving wheels (b): blue line — for the right wheel; green line — for the left wheel.

**Таблица 1.** Среднеквадратические отклонения коэффициентов скольжения

**Table 1.** Standard deviations of slip coefficients

Ведущие колеса	«Асфальт»	
	Электробус 1	Электробус 2
Левое колесо	$S_k=0,037$	$S_k=0,035$
Правое колесо	$S_k=0,015$	$S_k=0,021$
Ведущие колеса	«Лед со снегом»	
	Электробус 1	Электробус 2
Левое колесо	$S_k=0,049$	$S_k=0,042$
Правое колесо	$S_k=0,032$	$S_k=0,039$

**Таблица 2.** Относительные среднеквадратические отклонения

**Table 2.** Relative standard deviations

Ведущие колеса и их общая эффективность	«Асфальт»	«Лед со снегом»
Левое колесо	$S\% = +28\%$	$S\% = +18\%$
Правое колесо	$S\% = -5\%$	$S\% = -14\%$
Общая эффективность	$S\% = +23\%$	$S\% = +4\%$

на 23% при движении по опорному основанию «асфальт» и на 4% при движении по опорному основанию «лед со снегом».

3. В результате исследований выявлено, что для дополнительного повышения эффективности, а именно, снижения пробуксовки колеса внутреннего борта, рекомендуется в системе управления индивидуальным тяговым электроприводом использовать алгоритм, распознающий рассогласование скоростей колес.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад автора.** Автор подтверждает соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (автор внес существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочел и одобрил финальную версию перед публикацией).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grossl A., Krojer W., Wendl H., et al. Portal Axle AVE 130 for Electric Urban Buses // *ATZ worldwide*. 2015. Vol. 117, N 4. doi: 10.1007/s38311-015-0078-x
2. HDE13T (RIM). HANDE AXLE. Shaanxi Hande Axle Co. Ltd, 2021. [internet] Дата обращения: 06.12.2022. Режим доступа: <http://www.handeaxle.com/product/pro-detail-4573.htm>
3. Allison to offer an electric axle drivetrain for electric buses. Vado e Torno Edizioni, 2012-2023. [internet] Дата обращения: 06.12.2022. Режим доступа: <https://www.sustainable-bus.com/components/allison-to-offer-an-electric-axle-drivetrain-for-electric-buses/>
4. Бирюков В.В., Порсев Е.Г. Тяговый электрический привод: уч. пос. для вузов. М.: Юрайт, 2021.
5. Овсянников Е.М., Фомин А.П. Тяговые электрические системы автотранспортных средств: Учебник. М.: ФОРУМ:ИНФРА-М, 2019.
6. Patent DE 10 2011 089021 A1. Int Cl. F16H 57/12. Anmeldetag: 19.12.2011, Offenlegungstag: 20.06.2013. Getriebevorrichtung mit einem

## REFERENCES

1. Grossl A, Krojer W, Wendl H, et al. Portal Axle AVE 130 for Electric Urban Buses. *ATZ worldwide*. 2015;117(4). doi: 10.1007/s38311-015-0078-x
2. HDE13T (RIM). HANDE AXLE. Shaanxi Hande Axle Co. Ltd, 2021. [internet] Accessed: 06.12.2022. Available from: <http://www.handeaxle.com/product/pro-detail-4573.htm>
3. Allison to offer an electric axle drivetrain for electric buses. Vado e Torno Edizioni, 2012-2023. [internet] Accessed: 06.12.2022. Available from: <https://www.sustainable-bus.com/components/allison-to-offer-an-electric-axle-drivetrain-for-electric-buses/>
4. Biryukov VV, Porsev EG. *Traction electric drive: account. textbook for universities*. Moscow: Yurayt; 2021.

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов.

**Источник финансирования.** Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author's contribution.** The author made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

**Competing of interests.** The author declares the absence of obvious and potential conflicts of interest.

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

innenverzahnten Hohlräder sowie zwei damit kämmenden Stirnrädern. Anmelder ZF Friedrichshafen AG, 88046, Friedrichshafen, DE.

7. Антонян А.В. Повышение устойчивости и управляемости автомобилей колесной формулой 4x4 путем перераспределения подводимых к колесам вращающих моментов. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2021.
8. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин: уч. для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
9. Литвинов А.С. Устойчивость и управляемость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971.
10. Иванов В.А., Фалдин Н.В. Теория оптимальных систем автоматического управления. М.: Наука, 1981.
11. Жилейкин М.М. Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
12. Жилейкин, М.М., Котиев Г.О. Моделирование систем транспортных средств: Учебник. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021.

5. Ovsyannikov EM, Fomin AP. *Traction electrical systems of vehicles: Textbook*. Moscow: FORUM:INFRA-M; 2019.
6. Patent DE 10 2011 089021 A1. Int Cl. F16H 57/12. Anmeldetag: 19.12.2011, Offenlegungstag: 20.06.2013. Getriebevorrichtung mit einem innenverzahnten Hohlräder sowie zwei damit kämmenden Stirnrädern. Anmelder ZF Friedrichshafen AG, 88046, Friedrichshafen, DE.
7. Antonyan AV. Povyshenie ustoychivosti i upravlyaemosti avtomobiley kolesnoy formuloy 4x4 putem pereraspredeleniya podvodimyykh k kolesam vrashchayushchikh momentov [dissertation] Moscow; 2021.
8. Larin VV. *Theory of movement of all-wheel drive wheeled vehicles: textbook for universities*. Moscow: MG TU im NE Bauman; 2010.

9. Litvinov AS. *Vehicle stability and control*. Moscow: Mashinostroenie; 1971.
10. Ivanov VA, Faldin NV. *Theory of optimal automatic control systems*. Moscow: Nauka; 1981.
11. Zhileikin MM. *Theoretical foundations for improving the stability and controllability of wheeled vehicles based on fuzzy logic methods*. Moscow: MGТУ im NE Bauman; 2016.
12. Zhileikin MM, Kotiev GO. *Vehicle Systems Modeling: Tutorial*. Moscow: MGТУ im NE Bauman; 2021.

## ОБ АВТОРЕ

### **Антонян Аюп Ваганович,**

канд. техн. наук,  
главный специалист по программированию и имитационному моделированию, доцент Передовой инженерной школы электротранспорта;  
адрес: Российская Федерация, 121205, Москва, Большой бул., д. 62;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5566-6569>;  
eLibrary SPIN: 4797-9808;  
e-mail: AntonyanAV@kamaz.ru

## AUTHOR'S INFO

### **Akop V. Antonyan,**

Cand. Sci. (Tech.),  
Lead Software and Simulation Engineer, Associate Professor of the Advanced Engineering School of Electric Transport;  
address: 62 Bolshoy Blvd., 121205 Moscow, Russian Federation;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5566-6569>;  
eLibrary SPIN: 4797-9808;  
e-mail: AntonyanAV@kamaz.ru