

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416>

Оригинальное исследование



Законы управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика

В.А. Гартфельдер¹, А.А. Стадухин², Н.А. Мокрецов²¹ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Российская Федерация;² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Работа технологических машин сопряжена с постоянным буксованием ведущих колёс, что может привести к повышенному износу шин и повреждению почвы. Это обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение и уменьшение буксования.

Цель работы — анализ рассматриваемых стратегий управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика с точки зрения буксования ведущих колёс.

Материалы и методы. В статье рассмотрены три стратегии управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика: исходная, с одинаковыми степенями использования электродвигателей колес (стратегия 1), имитация заблокированного привода (стратегия 2), а также предложен вариант организации противобуксовочной системы (стратегия 3). С использованием имитационной компьютерной модели динамики был исследован рабочий процесс фронтального погрузчика при выполнении бульдозерных операций и при разгоне.

Результаты. Получено, что при бульдозировании применение стратегии 2 позволяет обеспечить практически одинаковый коэффициент буксования ведущих колес, что потенциально позволяет уменьшить износ шин и расход топлива (по сравнению со стратегией 1). Применение стратегии 3 в таких условиях оказалось нецелесообразно, так как ограничение буксования в данном случае ограничит и скорость выполнения операции. Моделирование процесса разгона фронтального погрузчика продемонстрировало некоторое преимущество стратегии 3 перед остальными по затраченной энергии.

Заключение. По результатам исследования определено, что при выполнении фронтальным погрузчиком тяжелых технологических операций, таких как бульдозирование, рационально использовать стратегию управления 2, которая имитирует заблокированную трансмиссию. В случае процесса разгона, который характерен для выполнения транспортных операций и движения по дорогам общего пользования, эффективно использование стратегии 3.

Ключевые слова: фронтальный погрузчик; индивидуальный привод; закон управления; заблокированный привод; противобуксовочная система.

Как цитировать:

Гартфельдер В.А., Стадухин А.А., Мокрецов Н.А. Законы управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 531–541. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416>

Original Study Article

Control laws for individual traction electric drive of a front loader

Viktor A. Gartfelder¹, Anton A. Stadukhin², Nikolay A. Mokretsov²

¹ Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation;

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The operation of technological machinery is associated with regular slipping of driving wheels, which can lead to increased tire wear and soil damage. This determines the relevance of works aimed at study and reduction of slip.

AIM: Analysis of the considered control strategies of individual traction electric drive of a front loader with regard to driving wheels slipping.

METHODS: The paper considers three control strategies of individual traction electric drive of a front loader — initial, with equal utilization rates of electric motor-wheels (strategy 1), simulation of locked drive (strategy 2), and the proposed option of building traction control system (strategy 3). Using a simulation computer model of dynamics, the working process of the front loader was studied during earthmoving operations and when accelerating.

RESULTS: It was obtained that the application of the strategy 2 during earthmoving helps to ensure almost the equal slip coefficient of the driving wheels, which potentially helps to reduce tire wear and fuel consumption (in comparison to the strategy 1). The application of the strategy 3 in such conditions turned out to be unsuitable, as the slip limitation in this case reduces the operation speed as well. The simulation of the front loader acceleration process showed some advantage of strategy 3 over the others in terms of energy consumed.

CONCLUSIONS: According to the results of the study, it is reasonable to use the control strategy 2, which simulates a locked transmission, in case of performing heavy technological operations by a front loader such as earthmoving. In the case of the acceleration process, typical for transportation operations and driving on public roads, it is effective to use the strategy 3.

Keywords: front loader; individual drive; control law; locked drive; traction control system.

To cite this article:

Gartfelder VA, Stadukhin AA, Mokretsov NA. Control laws for individual traction electric drive of a front loader. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(6):531–541. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416>

Received: 07.09.2023

Accepted: 10.11.2023

Published online: 06.12.2023

ВВЕДЕНИЕ

Колесные фронтальные погрузчики (ФП) способны эффективно перемещаться по дорогам с твердым покрытием. Однако, технологические операции (погрузка или бульдозирование) такие машины осуществляют в более сложных условиях: на разбитом или заснеженном природном грунте и на строительных площадках. По этой причине ФП должны сочетать сравнительно высокую скорость на асфальте с хорошей проходимостью и управляемостью на слабонесущем грунте.

В работах [1, 2] были рассмотрены вопросы выбора параметров и оценки энергоэффективности электромеханической трансмиссии ФП. Однако, расходы на эксплуатацию подобных машин характеризуются не только режимами работы двигателя внутреннего сгорания и трансмиссии, но также потерями на буксование и сопровождающим их повышенным износом шин и повреждением почвы. Оценка буксования транспортно-технологической машины является широко разработанной задачей, но до сих пор привлекает внимание исследователей [3, 4]. Также активно исследуются подходы и алгоритмы управления машиной, позволяющие ограничить буксование при выполнении технологических операций [5].

У ФП с индивидуальным электромеханическим приводом ведущих колес существует возможность достаточно гибко управлять распределением тяги, что следует использовать для получения дополнительных преимуществ при эксплуатации.

Так, возможна имитация дифференциальной механической трансмиссии, при которой к каждому из ведущих колес будет приложен одинаковый крутящий момент, независимо от скорости вращения колеса. Следует отметить, что такая стратегия управления при тяжелых технологических операциях неэффективна, также, как и механическая дифференциальная трансмиссия, которая на фронтальных погрузчиках обычно имеет какой-либо способ блокировки. Вместо этого предлагается использовать стратегию управления, когда крутящий момент уменьшается при увеличении скорости ведущего колеса, которая должна быть менее склонна к избыточному буксованию.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является анализ рассматриваемых стратегий управления индивидуальным тяговым электроприводом ФП с точки зрения буксования ведущих колес при прямолинейном движении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования буксования ФП в зависимости от закона управления индивидуальным тяговым электроприводом предлагаются три стратегии управления.

Стратегия 1 предполагает уменьшение крутящего момента на каждом колесе при увеличении скорости его вращения и обеспечивается одинаковыми степенями использования всех электродвигателей, соответствующими уровню нажатия водителем на педаль акселератора, то есть:

$$h_{\text{ЭД}i} = h_{\text{в}},$$

где $h_{\text{ЭД}i}$ — степень использования i -го электродвигателя; $h_{\text{в}}$ — управляющее воздействие со стороны водителя (нажатие педали акселератора).

Реакция двигателя на управляющее воздействие, независимо от стратегии управления, моделируется следующим образом:

$$M_{\text{ЭД}i}(\omega_{\text{ЭД}i}, h_{\text{ЭД}i}) = \begin{cases} M_{\text{ЭД}}^{\text{max}} \cdot h_{\text{ЭД}i}, & \text{если } \omega_{\text{ЭД}i} < \frac{N_{\text{ЭД}}^{\text{max}}}{M_{\text{ЭД}}^{\text{max}}}; \\ \frac{M_{\text{ЭД}}^{\text{max}} \cdot h_{\text{ЭД}i}}{\omega_{\text{ЭД}i}}, & \text{если } \omega_{\text{ЭД}i} \geq \frac{N_{\text{ЭД}}^{\text{max}}}{M_{\text{ЭД}}^{\text{max}}} \text{ и } \omega_{\text{ЭД}i} < \omega_{\text{ЭД}}^{\text{max}}; \\ 0, & \text{если } \omega_{\text{ЭД}i} \geq \omega_{\text{ЭД}}^{\text{max}}, \end{cases}$$

где $M_{\text{ЭД}i}(\omega_{\text{ЭД}i}, h_{\text{ЭД}i})$ — текущий крутящий момент i -го электродвигателя; $\omega_{\text{ЭД}i}$ — текущая угловая скорость вала i -го электродвигателя; $M_{\text{ЭД}}^{\text{max}}$ — максимальный крутящий момент электродвигателя; $N_{\text{ЭД}}^{\text{max}}$ — максимальная мощность электродвигателя; $\omega_{\text{ЭД}}^{\text{max}}$ — максимальная угловая скорость вала электродвигателя.

Из вышесказанного следует, что любое изменение водителем управляющего воздействия $h_{\text{в}}$ приведет к изменению крутящего момента каждого электродвигателя. В данной работе привод, управляемый по описанной стратегии, принят за исходный.

Стратегия 2 представляет собой имитацию заблокированного привода ведущих колес. Вездеходные полноприводные колесные машины с механической трансмиссией обычно имеют возможность так или иначе заблокировать привод, что выражается в одинаковой угловой скорости всех ведущих колес (если ведущие колеса одинакового радиуса). Такое решение само по себе не гарантирует ограничение буксования в желаемых пределах, однако, обеспечивает естественное перераспределение тяги в зависимости от сопротивления движению каждого ведущего колеса.

Для имитации заблокированного привода вычисляется медианная угловая скорость всех ведущих колес. Медианное значение угловой скорости определяется следующим образом: производится сортировка всех угловых скоростей вращения ведущих колес (например, по возрастанию), затем берется среднее между вторым и третьим значением отсортированного списка. Разности

между найденной медианной и действительными угловыми скоростями колёс формируют ошибки e_i , на основе которых ПИ-регулятор определяет корректирующие управляющие воздействия h_{ki} для каждого электродвигателя:

$$h_{ki} = k_p e_i + k_i \int e_i dt,$$

где k_p — пропорциональный коэффициент ПИ-регулятора; k_i — интегральный коэффициент ПИ-регулятора.

Скорректированное управляющее воздействие $h'_{ЭДi}$ определяется следующим образом:

$$h'_{ЭДi} = h_b + h_{ki}.$$

Стоит отметить, что возможна ситуация, когда значение управляющего воздействия h_b близко к единице, а одно из колёс движется в условиях с большим сопротивлением движению. В таком случае система управления будет стремиться увеличить степень использования электродвигателя, связанного с отстающим колесом, за счёт корректирующего воздействия h_{ki} . Однако, итоговая величина степени использования электродвигателя $h_{ЭДi}$ не может быть больше единицы. Таким образом, в этом случае корректирующее воздействие h_{ki} не будет реализовано в полной мере, и электродвигатель отстающего колеса лишь незначительно увеличит крутящий момент. Это приведет к тому, что различие в угловых скоростях не сможет быть устранено и блокированный тип связи между колесами не будет сымитирован. Чтобы избежать этого явления, в рассматриваемой системе управления

итоговая степень использования электродвигателей $h_{ЭДi}$ дополнительно корректируется на величину, на которую максимальное из скорректированных управляющих воздействий $h'_{ЭДi}$ превышает единицу:

$$h_{ЭДi} = h'_{ЭДi} - \left(\max(h'_{ЭДi}) - \max(\min(1, h'_{ЭДi})) \right).$$

Принципиальная схема реализации стратегии 2 представлена на рис. 1.

Стратегия 3 представляет собой некоторую реализацию противобуксовочной системы (ПБС) на основе исходного привода. В данной постановке задача управления сводится к поддержанию значения коэффициента буксования колёс $S_{\delta i}$ не более заданного $S_{\delta \max}$.

Для определения коэффициентов буксования $S_{\delta i}$ используется следующая формула:

$$S_{\delta i} = \frac{\omega_{ki} - \omega_{k0i}}{\omega_{ki}},$$

где ω_{ki} — угловая скорость i -го колеса; ω_{k0i} — угловая скорость i -го колеса, соответствующая движению без проскальзывания, вычисляется по формуле:

$$\omega_{k0i} = \frac{v_{kxi}}{r_{k0}}$$

r_{k0} — радиус качения колеса без скольжения; v_{kxi} — оценка линейной скорости центра i -го колеса, которая вычисляется по формуле: $v_{kxi} = v_x + \omega_z \cdot y_{ki}$; v_x — оценка линейной скорости центра масс ФП; ω_z — угловая скорость поворота ФП; y_{ki} — поперечная координата центра i -го колеса относительно центра масс.

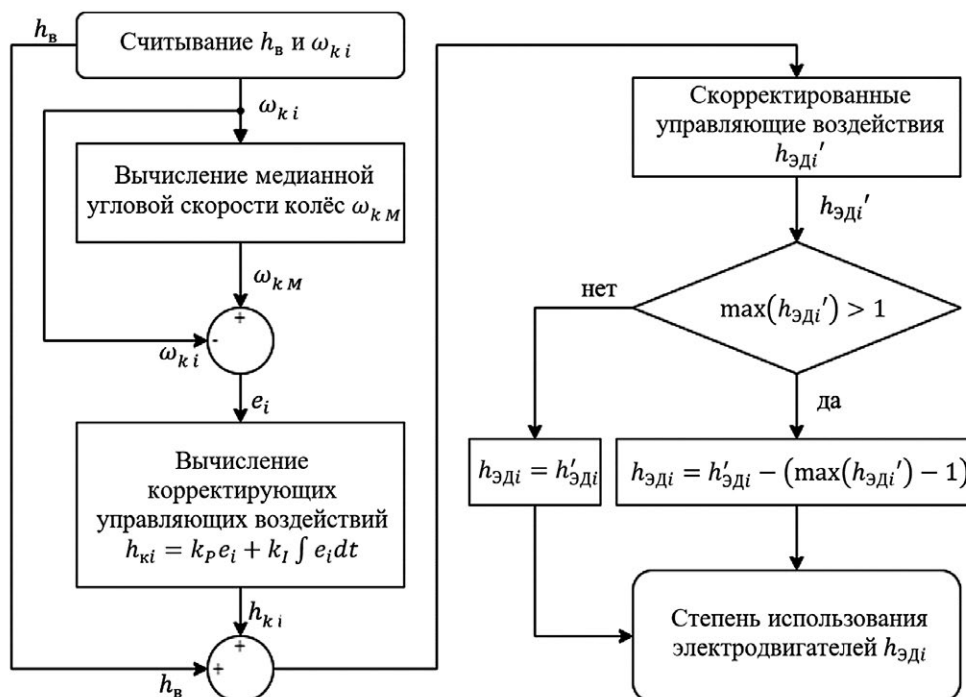


Рис. 1. Принципиальная схема управления трансмиссией по стратегии 2.

Fig. 1. Principal block diagram of transmission control according to the strategy 2.

В данной работе предполагается, что угловая скорость поворота ФП ω_z будет измеряться с помощью датчика угловых скоростей. Скорость погрузчика v_x оценивается с применением датчика ускорений, то есть с использованием интегрирования продольного ускорения корпуса машины.

Необходимо иметь ввиду, что при использовании датчика ускорений (даже идеализированного, как в данном исследовании) в результате интегрирования при оценке скорости накапливается ошибка. Это ведёт к расхождению прогнозируемой и реальной скорости движения машины и обуславливает необходимость регулярного уточнения значения скорости. Поэтому в случае малой величины задаваемой водителем степени нажатия на педаль акселератора скорость машины принимается равной кинематической. Это означает, что накопленное при интегрировании ускорения значение сбрасывается до кинематической скорости $v_{кин}$, определяемой из средней скорости вращения ведущих колес погрузчика:

$$v_x = \begin{cases} \int a_x dt, & \text{при } h_b > 0,1; \\ v_{кин} = \frac{\sum_i \omega_{ki} \cdot r_{k0}}{n}, & \text{при } h_b \leq 0,1, \end{cases}$$

где a_x — продольное ускорение машины; n — общее число колёс ФП.

Принципиальная схема реализации стратегии 3 представлена на рис. 2.

В целях исследования различных стратегий управления тяговым электроприводом была составлена

компьютерная имитационная модель ФП. Данная модель подробно была описана в статье [2]. Для выполнения рабочих операций в модели предусмотрена имитация управляющих действий водителя, которые определяют работу индивидуального электропривода в соответствии с выбранной стратегией. Для наглядности результатов, проводимых заездов, принимается, что силовая установка ФП полностью обеспечивает потребности тяговых электродвигателей в питании. В таком случае имеется возможность исследовать выбранные стратегии управления электроприводом вне зависимости от силовой установки и состава трансмиссии.

Оценку эффективности выбранных стратегий управления тяговым электроприводом предлагается производить по буксованию колёс, выраженному коэффициентом буксования S_{6i} и по мощности буксования N_{6i} . Вычислять мощность буксования N_{6i} предлагается следующим образом:

$$N_{6i} = R_{kxi} \cdot (\omega_{ki} \cdot r_{k0} - v'_{kxi}),$$

где R_{kxi} — продольная составляющая реакции, действующей в пятне контакта i -го колеса в плоскости опорной поверхности; v'_{kxi} — действительная линейная скорость центра i -го колеса.

Следует отметить, что необходимая для определения буксования и мощности буксования действительная линейная скорость центра колеса v'_{kxi} вычисляется на основе действительной продольной скорости движения корпуса ФП, которая в реальных условиях неизвестна, но легко определяется при имитационном моделировании.

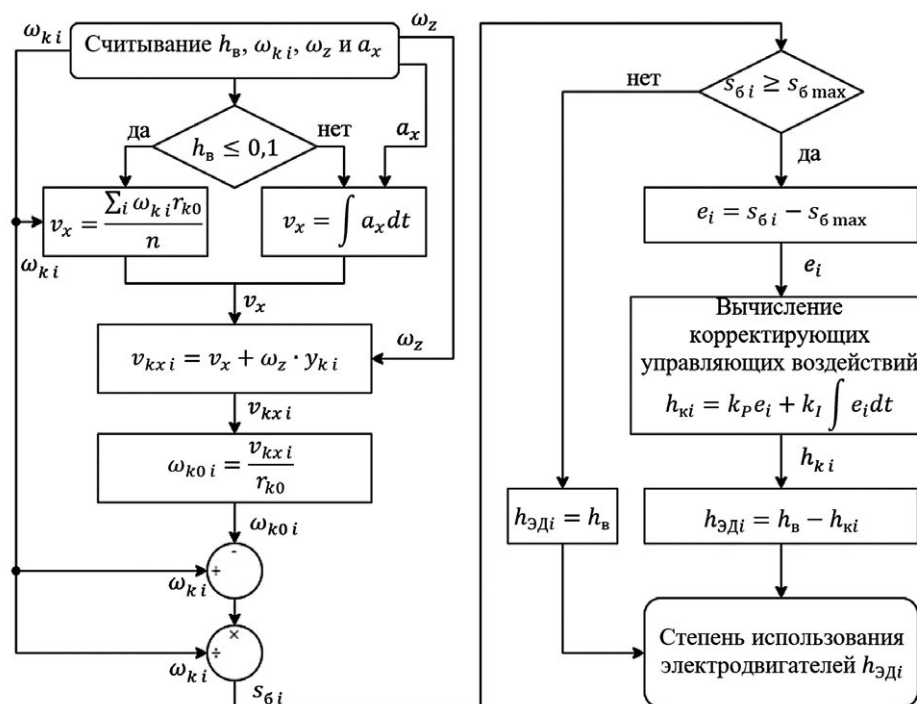


Рис. 2. Принципиальная схема управления трансмиссией по стратегии 3.

Fig. 2. Principal block diagram of transmission control according to the strategy 3.

Имитационная модель, используемая в настоящей работе, описывает ФП с электромеханической трансмиссией. Технические характеристики исследуемого ФП представлены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки предлагаемых стратегий управления было исследовано выполнение ФП бульдозерных операций, так как этот рабочий режим хотя и является редко встречающимся, но характеризуется высоким сопротивлением движению, и, соответственно, высоким буксованием колёс.

В рамках проведённого исследования рабочий цикл бульдозирования представляет собой заезд, состоящий из набора призмы грунта и последующего её волочения [6]. Набор призмы происходит на протяжении 5 метров пути и предполагает линейное повышение значения сопротивления движению от 0,055 до 0,505. Волочение продолжается до конца цикла и характеризуется сохранением достигнутого значения сопротивления движению. На протяжении всего рабочего цикла управляющие воздействия водителя имитируются такими, чтобы поддерживать кинематическую скорость движения ФП 1 м/с. Кинематическая скорость при этом оценивается через усреднённую скорость колёс ФП.

Помимо разной вертикальной нагрузки на переднюю и заднюю ось ФП ведущим колёсам были назначены коэффициенты сцепления с опорной поверхностью, значения которых представлены в таблице 2. Подразумевается, что борта погрузчика находятся на опорных поверхностях с различными свойствами, что может наблюдаться, например, при очистке обочины дороги.

Результаты моделирования бульдозирования ФП при реализации разных стратегий управления представлены на рис. 3–6.

Графики на рис. 3, соответствующие управлению тяговым электроприводом по стратегии 1, показывают наличие значительного буксования, так как высокая степень использования назначается в том числе и тем двигателям, колеса которых имеют слабое сцепление с опорным основанием. Энергия, затраченная на буксование всех колёс за время бульдозирования при управлении по стратегии 1, составила 422 кДж.

На рис. 4, а видно, что коэффициенты буксования для всех колёс близки по значению, так как при стратегии управления 2 (блокированный привод) удалось обеспечить их одинаковые угловые скорости. Суммарная энергия буксования всех колёс при управлении по стратегии 2 составила 402 кДж.

Изображения на рис. 5 соответствуют режиму бульдозирования ФП при управлении по стратегии 3. Потраченная на буксование энергия составила 402 кДж. Во время

Таблица 1. Технические характеристики образца фронтального погрузчика

Table 1. Technical specification of an example of a front loader

Параметр	Значение
Грузоподъёмность погрузчика, кг	3500
Снаряжённая масса погрузчика, кг	10800
Максимальная мощность тягового электродвигателя, кВт	26
Максимальный момент тягового электродвигателя, Нм	1040
Максимальная частота вращения ротора тягового электродвигателя, об/мин	2790
Свободный радиус колеса, м	0,7
Передаточное число колёсного редуктора	19,7
Доля вертикальной нагрузки на переднюю/заднюю ось	0,48/0,52
Колея погрузчика, м	1,93

Таблица 2. Коэффициенты сцепления колёс фронтального погрузчика с опорной поверхностью во время бульдозирования

Table 2. Grip coefficients of front loader wheels with ground surface during earthmoving

Колесо	Значение
Переднее левое (колесо 1)	0,550
Переднее правое (колесо 2)	0,700
Заднее левое (колесо 3)	0,550
Заднее правое (колесо 4)	0,700

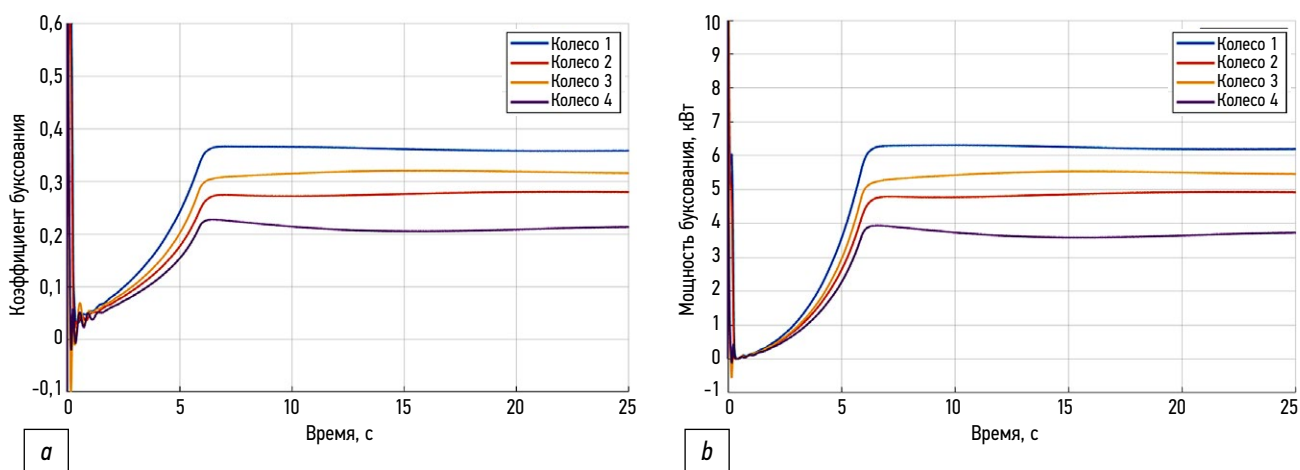


Рис. 3. Графики коэффициентов (а) и мощностей (b) буксования колёс фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением тяговым электроприводом по стратегии 1 (исходный привод).

Fig. 3. Graphs of slip coefficient (a) and slip power (b) of front loader wheels during earthmoving with traction electric drive control according to the strategy 1 (the initial drive).

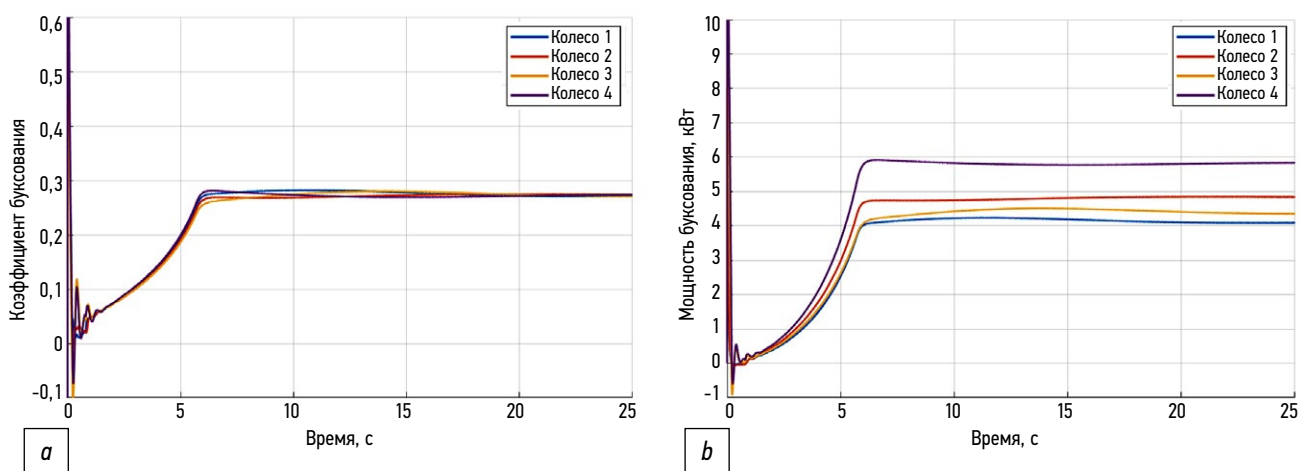


Рис. 4. Графики коэффициентов (а) и мощностей (b) буксования колёс фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением тяговым электроприводом по стратегии 2 (имитация блокированного привода).

Fig. 4. Graphs of slip coefficient (a) and slip power (b) of front loader wheels during earthmoving with traction electric drive control according to the strategy 2 (simulation of locked drive).

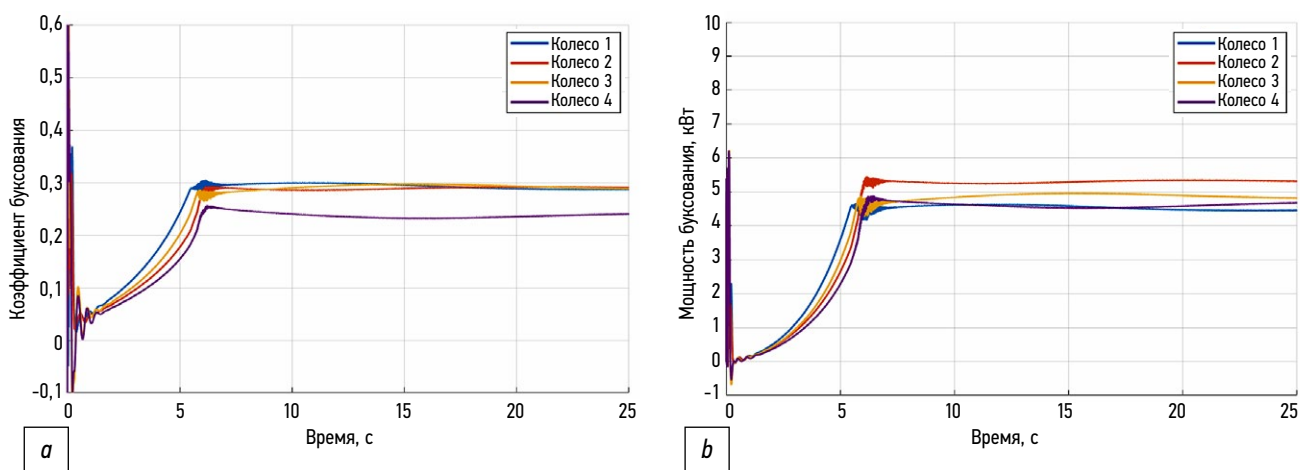


Рис. 5. Графики коэффициентов (а) и мощностей (b) буксования колёс фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением тяговым электроприводом по стратегии 3 (исходный привод с противобуксовочной системой).

Fig. 5. Graphs of slip coefficient (a) and slip power (b) of front loader wheels during earthmoving with traction electric drive control according to the strategy 3 (the initial drive with the traction control system).

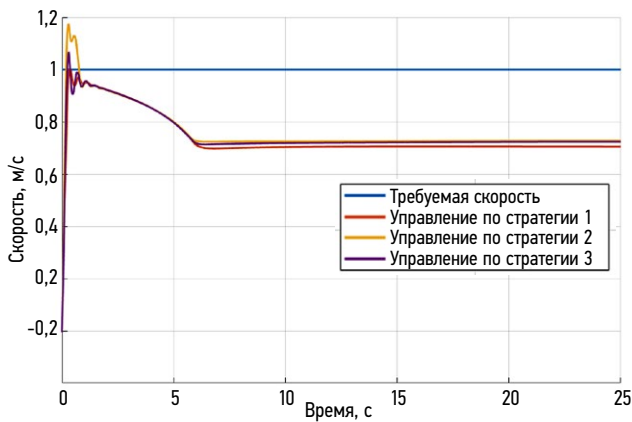


Рис. 6. Сравнение скоростей фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением трансмиссией по различным стратегиям.

Fig. 6. Comparison of front loader velocities during earthmoving with transmission control according to various strategies.

проведения предварительных испытаний было установлено, что при задании некорректного буксования $S_{б\ max}$ при выбранных условиях работы ФП система управления препятствует развитию необходимой силы тяги. При этом было установлено, что минимальное значение $S_{б\ max}$ составляет 0,2, что, с некоторой погрешностью, было обеспечено. Из сказанного следует, что для обеспечения требуемой производительности перед началом технологической операции водителю придется подбирать значение максимального буксования в зависимости от свойств грунта, которые заранее неизвестны. Эта особенность не позволит использовать стратегию управления 3 для бульдозирования в реальных условиях. Однако, данная стратегия может быть полезной и позволит уменьшить расход топлива и износ шин в других режимах движения, например, при разгоне.

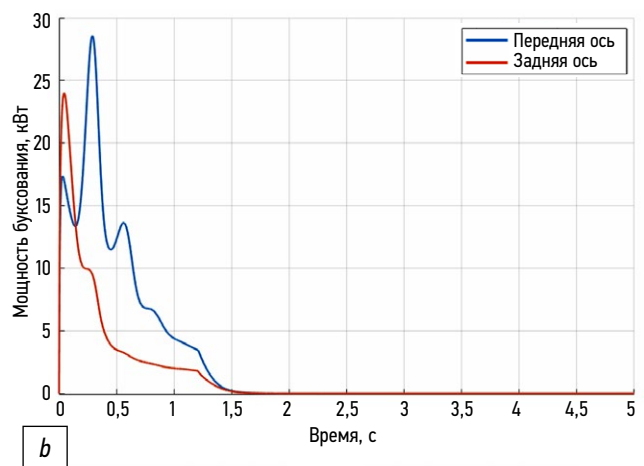
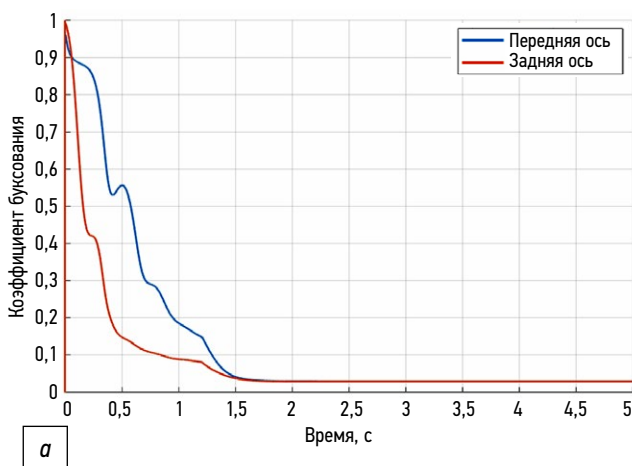


Рис. 7. Графики коэффициентов (а) и мощностей (б) буксования колёс фронтального погрузчика при разгоне с управлением тяговым электроприводом по стратегии 1 (исходный привод).

Fig. 7. Graphs of slip coefficient (a) and slip power (b) of front loader wheels during acceleration with traction electric drive control according to the strategy 1 (the initial drive).

Моделирование разгона ФП включает разгон ФП с места до 15 км/ч на опорной поверхности при значениях коэффициента сопротивления движению 0,02 и коэффициента сцепления 0,4, которые одинаковы для всех колес.

Результаты моделирования разгона ФП при реализации разных стратегий представлены на рис. 7–10.

Графики показывают преимущество (меньшая максимальная мощность буксования, рис. 9, б) стратегии 3 над остальными. Блокированный привод (стратегия 2) имеет значительное преимущество перед стратегией 1. Энергия, затраченная на буксование всех колес за время разгона, составила для стратегии 1 — 43 кДж, для стратегии 2 — 23 кДж, для стратегии 3 — 20 кДж.

ВЫВОДЫ

В статье были рассмотрены три стратегии управления индивидуальным электроприводом ФП: исходная, характеризующаяся одинаковым управляющим воздействием электродвигателей ведущих колес (стратегия 1), имитация заблокированного привода (стратегия 2) и реализация противобуксовочной системы (стратегия 3). С использованием имитационной компьютерной модели динамики ФП были исследованы такие режимы работы как выполнение бульдозерных операций и разгон. Получено, что при бульдозировании применение стратегии 2 позволяет обеспечить одинаковый коэффициент буксования ведущих колес, что потенциально позволяет уменьшить износ шин и расход топлива (по сравнению со стратегией 1). Напротив, применение стратегии 3 в таких условиях нецелесообразно, так как ограничение буксования на некотором заранее заданном уровне не позволит достичь необходимой производительности данной технологической операции — ограничение буксования в данном случае ограничит и развиваемую тягу ФП.

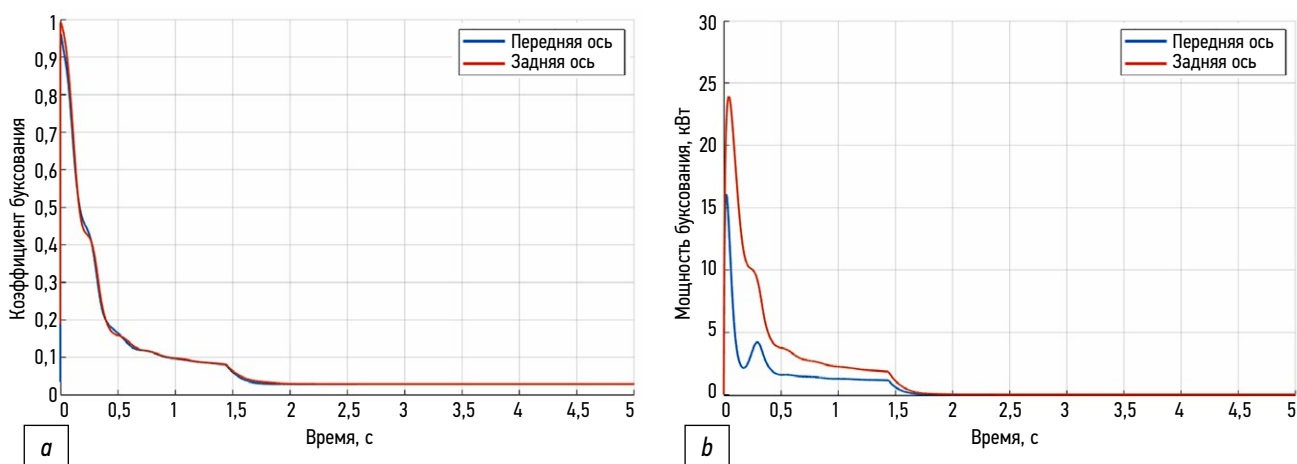


Рис. 8. Графики коэффициентов (а) и мощностей (б) буксования колёс фронтального погрузчика при разгоне с управлением тяговым электроприводом по стратегии 2 (блокированный привод).

Fig. 8. Graphs of slip coefficient (a) and slip power (b) of front loader wheels during acceleration with traction electric drive control according to the strategy 2 (simulation of locked drive).

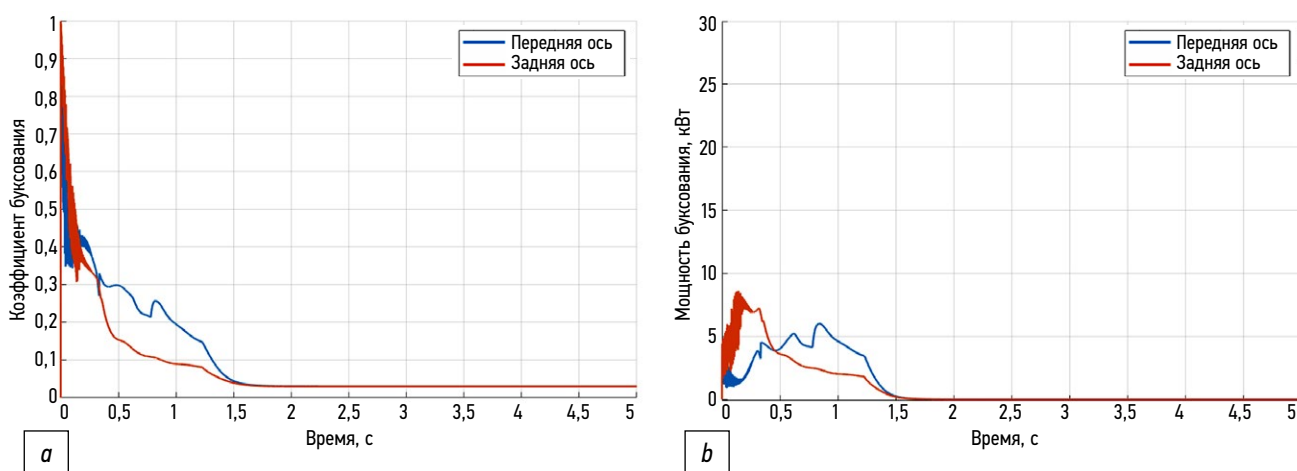


Рис. 9. Графики коэффициентов (а) и мощностей (б) буксования колёс фронтального погрузчика при разгоне с управлением тяговым электроприводом по стратегии 3 (исходный привод с противобуксовочной системой).

Fig. 9. Graphs of slip coefficient (a) and slip power (b) of front loader wheels during acceleration with traction electric drive control according to the strategy 3 (the initial drive with the traction control system).

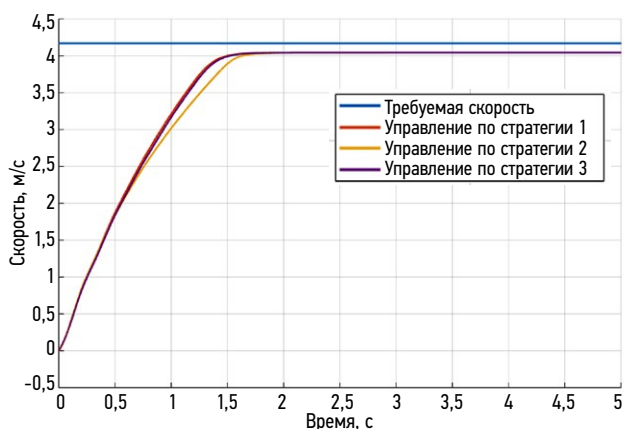


Рис. 10. Сравнение скоростей фронтального погрузчика при разгоне с управлением трансмиссией по различным стратегиям.

Fig. 10. Comparison of front loader velocities during acceleration with transmission control according to various strategies.

Моделирование процесса разгона ФП продемонстрировало эффективность стратегий 2 и 3 с некоторым преимуществом стратегии 3 (до 15% меньшая затраченная энергия по сравнению со стратегией 2).

Таким образом, можно заключить, что при тяжелых технологических операциях, таких как бульдозирование, на ФП рационально использование стратегии управления 2, которая имитирует заблокированную трансмиссию. В случае разгона, который характерен для выполнения легких погрузочных или транспортных операций и движения по дорогам общего пользования эффективно использование стратегии 3, то есть противобуксовочной системы, при этом использование стратегии 2 (имитация заблокированного привода) может привести к повышенному сопротивлению повороту, что не позволяет рекомендовать ее применению в данном случае.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В.А. Гартфельдер — поиск публикаций по теме статьи, утверждение финальной версии; А.А. Стадухин — разработка законов управления тяговым электроприводом; Н.А. Мокрецов — проведение моделирования и анализ результатов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

Источник финансирования. Исследования выполнены ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» по договору № 517-21 от 22 апреля 2021 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» Соглашения № 075-11-2021-051 от 24 июня 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов В.А., Косицын Б.Б., Стадухин А.А., и др. Метод определения параметров электромеханической трансмиссии фронтального погрузчика // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88. № 5. С. 38–45. doi: 10.31992/0321-4443-2021-5-38-45
2. Бяков К.Е., Стадухин А.А., Мокрецов Н.А. Сравнительная оценка топливной экономичности фронтального погрузчика // Транспортные системы. 2022. №4 (26). С. 51–62. doi: 10.46960/2782-5477_2022_4_51
3. Девянин С.Н., Бизхаев А.В. Анализ буксования ведущего колеса трактора при влиянии комплексного фактора // Чтения академика В. Н. Болтинского: семинар, Москва, 20–21 января 2021 года. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2021. С. 300–306.

REFERENCES

1. Gorelov VA, Kositsyn BB, Stadukhin AA, et al. Method for determining the parameters of the front loader electromechanical transmission. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021;88(5):38–45. (In Russ). doi: 10.31992/0321-4443-2021-5-38-45
2. Byakov KE, Stadukhin AA, Mokretsov NA. Comparative assessment of the fuel efficiency of a front loader. *Transportnye sistemy*. 2022;4(26):51–62. (In Russ). doi: 10.46960/2782-5477_2022_4_51
3. Devyanin SN, Bizhaev AV. Analysis of slipping of the tractor drive wheel under the influence of a complex factor. In: *Readings of Academician VN Boltinsky: seminar, Moscow, January 20–21, 2021*. Moscow: OOO "Sam Poligrafist", 2021:300–306. (In Russ).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.A. Gartfelder — search the publications on the topic of the article; approving the final version; A.A. Stadukhin — development of traction electric drive control laws; N.A. Mokretsov — performing simulations and results analysis. 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, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

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

Funding source. The study was conducted by Chuvash State University named after I.N. Ulyanov according to the contract №517-21 of 22 April 2021 with financial support of Ministry of Education and Science as part of implementing the "Development the high-technological import-replacing manufacturing of the line-up of frontal loaders with hybrid electric drive" multipurpose project of the agreement № 075-11-2021-051 of 24 June 2021.

4. Левшин А.Г., Гаспарян И. Н., Алсанкари А., и др. Методика экспресс-анализа буксования на эксплуатационных режимах работы трактора // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 32–36. doi: 10.26897/2687-1149-2022-4-32-36
5. Heubaum M., Münch Ph., Costantini G., et al. Slip Detection and Control for Harvesting Machines // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55, N 32. P. 18–23. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.11.108
6. Чудаков О.И. Анализ условий эксплуатации фронтальных погрузчиков и синтез расчетных нагрузочных режимов // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022. Материалы XXVI Международной научно-технической конференции. Ярославль, 2022. С. 134–142.

4. Levshin AG, Gasparyan IN, Alsankari A, et al. Methodology for express analysis of slippage in tractor operating modes. *Agroinzheneriya*. 2022;24(4):32–36. (In Russ). doi: 10.26897/2687-1149-2022-4-32-36
5. Heubaum M, Münch Ph, Costantini G, et al. Slip Detection and Control for Harvesting Machines. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(32):18–23. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.11.108
6. Chudakov O.I. Analysis of operating conditions for front-end loaders and synthesis of design load modes. In: *INTERSTROYMEH-2022. Materials of the XXVI International Scientific and Technical Conference*. Yaroslavl; 2022:134–142. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*** Мокрецов Николай Александрович,**

аспирант кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,

ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1;

ORCID: 0000-0002-7050-1914;

eLibrary SPIN: 4916-9707;

e-mail: mnasm@bmstu.ru

Гартфельдер Виктор Адольфович,

канд. техн. наук,

декан машиностроительного факультета;

ORCID: 0000-0002-6759-6756;

eLibrary SPIN: 6075-0549;

e-mail: harvik48@list.ru

Стадучин Антон Алексеевич,

д-р техн. наук,

доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»;

ORCID: 0000-0003-1414-3435;

eLibrary SPIN: 7669-7133;

e-mail: ant.m@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Nikolay A. Mokretsov,**

Postgraduate of the Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots Department;

address: 5 bldg 1 2nd Baumanskaya, 105005 Moscow,

Russian Federation;

ORCID: 0000-0002-7050-1914;

eLibrary SPIN: 4916-9707;

e-mail: mnasm@bmstu.ru

Viktor A. Gartfelder,

Cand. Sci. (Engineering),

Dean of the Mechanical Engineering Faculty;

ORCID: 0000-0002-6759-6756;

eLibrary SPIN: 6075-0549;

e-mail: harvik48@list.ru

Anton A. Stadukhin,

Dr. Sci. (Engineering),

Associate Professor of the Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots Department;

ORCID: 0000-0003-1414-3435;

eLibrary SPIN: 7669-7133;

e-mail: ant.m@bmstu.ru