

Научная статья
УДК: 629.373.3
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>
EDN: SXUNOC



МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ТРЕХОСНОГО МОТОВЕЗДЕХОДА С МОНТИРУЕМОЙ ЗАДНЕЙ ОСЬЮ, ОСНАЩЕННОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

М.М. Журкин

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия
mimizhur@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Значительно увеличить грузоподъемность двухосного мотовездехода с сохранением его подвижности и без внесения значительных изменений в серийную конструкцию позволяет предложенный Г.О. Котиевым в патенте RU218304U1 монтируемый модуль третьей оси, оснащенный электроприводом. Применение комбинированных трансмиссий в транспортных средствах дает возможность использовать энергию более эффективным способом, но их задействование в составе средств малой механизации, таких как мотовездеход, недостаточно исследовано, так как не учитывают конструктивные особенности и условия движения средств малой механизации, в том числе новой конструкции. В данной работе производится исследование подходов к управлению гибридной силовой установкой мотовездехода с электроприводом третьей оси.

Материалы и методы. В данной работе проводится исследование методом имитационного моделирования с целью определения наиболее эффективного подхода к управлению приводом при движении по твердым опорным основаниям с различными характеристиками неровностей.

Для суммирования, анализа затрат энергии и сопоставления эффективности тепловой и электрической машины был предложен новый критерий, связывающий плотность энергии в батарее и массовый расход бензина. В итоге позволяет через массу израсходованного топлива и условной массы израсходованной батареи производить оценку. Такой критерий актуален для мотовездеходов ввиду ограниченной грузоподъемности.

Для снижения потерь на буксование был предложен алгоритм, основанный на методе косвенной оценки вертикальной реакции. Данный метод дает возможность производить оценку вертикальной реакции и корректировать подводимый к колесам крутящий момент без применения в конструкции датчиков сил.

Результаты. Проведен анализ научной литературы в области рационального управления гибридными силовыми установками и индивидуальным приводом.

Создана математическая модель движения мотовездехода по неровностям, которая учитывает массовый расход топлива и разряд батареи.

Предложены алгоритмы формирования уставок и повышения эффективности, в том числе с использованием нового критерия оценки.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование установило границы характеристик неровностей опорного основания при использовании двух подходов к применению уставок и показало эффективность разработанных алгоритмов повышения эффективности, что позволяет создать комплексный закон управления мотовездеходом с гибридной силовой установкой.

Практическое значение. Практическая значимость заключается в результатах программной реализации предложенных подходов к эффективному управлению гибридной силовой установкой мотовездехода новой конструкции в условиях движения по дорогам с неровностями различного типа для предприятий транспортного машиностроения.

Оригинальность. Рассматриваемое транспортное средство представляет собой пересечение нескольких направлений исследований. Первое направление включает в себя исследования движения автомобилей с параллельной гибридной схемой трансмиссии в городских условиях, где не учитываются неровности дороги. Второе направление посвящено движению транспортных средств с индивидуальным

© Журкин М.М., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

приводом вне дорог. Полученные результаты позволяют обратить данный дуализм в закон эффективного с точки зрения средства малой механизации управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гибридный мотовездеход, электропривод третьей оси, модульная ось, гибридный привод, энергоэффективность

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность научному руководителю М.М. Жилейкину за наставления в работе, а также руководству и сотрудникам кафедр СМ-10, СМ-9 и ЛТ-7 МГТУ им. Н.Э. Баумана за материальную поддержку в создании прототипа мотовездехода с гибридной силовой установкой.

Статья поступила в редакцию 16.02.2026; одобрена после рецензирования 09.04.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Журкин М.М. Метод повышения энергоэффективности управления гибридным тяговым приводом трехосного мотовездехода с монтируемой задней осью, оснащенной электроприводом // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 458–473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>

EDN: SXUNOC

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF HYBRID TRACTION DRIVE CONTROL FOR THREE-AXLE ALL-TERRAIN VEHICLES WITH MOUNTABLE ELECTRIC REAR AXLE DRIVE

Mikhail M. Zhurkin

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia
mimizhur@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. The mountable third-axle module equipped with an electric drive, proposed by G.O. Kotiev in RU218304U1 patent, allows for a significant increase in the load capacity of a two-axle all-terrain vehicle (ATV) while preserving its mobility and requiring no major changes to the standard design. While the integration of hybrid transmissions in vehicles has enabled more efficient energy consumption, their use in vehicles for small-scale mechanization, such as all-terrain vehicles, has not been sufficiently investigated. Current approaches do not take into account the design features and operating conditions of vehicles for small-scale mechanization. This paper examines methods to control a hybrid powertrain of an ATV with electric third-axle drive.

Materials and methods. This paper uses simulation modeling to determine the most efficient approach to drive control when driving on hard surfaces with varying unevenness characteristics. To summarize, analyze energy costs, and compare the efficiency of a thermal and electric engine, a new criterion was proposed. This criterion links the energy density of the battery and the mass fuel consumption. As a result, it allows for an evaluation based on the mass of fuel consumed and the conventional mass of the battery discharged. This criterion is relevant for ATVs due to their limited load capacity. To reduce wheel slippage losses, an algorithm based on an indirect method for estimating vertical reaction was proposed. This method allows for estimating vertical reaction and adjusting the torque applied to the wheels without the use of force sensors.

Results. An analysis of scientific literature on the rational management of hybrid powertrains and individual drives was conducted. A mathematical model of ATV movement over uneven surfaces was created, taking into account fuel consumption and battery discharge. Algorithms for setting parameters and improving efficiency were proposed, including the use of a new evaluation criterion.

Discussions and Conclusion. The study established the limits of the supporting base roughness characteristics for two approaches to settings application and demonstrated the effectiveness of the developed algorithms for

© Zhurkin Mikhail M., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

improving efficiency, which makes it possible to develop a comprehensive control mechanism for ATVs with hybrid power plant.

Practical significance. The practical value of this research stems from the implementation of the proposed efficient control strategies for a newly designed hybrid ATV driving on roads with various roughness types for transport manufacturing enterprises.

Originality. The study of the vehicle under consideration lies at the intersection of several research fields. The first area involves studying the movement of vehicles with parallel hybrid transmission in urban conditions, where road irregularities are not taken into account. The second field focuses on the off-road movement of self-propelled vehicles. The results obtained make it possible to transform this duality into efficient control mechanism to design vehicles for small-scale mechanization.

KEYWORDS: hybrid ATV, third-axle electric drive, module axle, hybrid drive, efficient energy use

ACKNOWLEDGEMENT: the author expresses gratitude to the research supervisor Dr. M.M. Zhileikin for his guidance on the work, as well as to the management and staff of SM-10, SM-9, and LT-7 departments of Bauman Moscow State Technical University for financial support in developing the ATV prototype with a hybrid power train.

The article was submitted: February 16, 2026; **approved after reviewing:** April 09, 2026; **accepted for publication:** June 15, 2026.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Zhurkin M.M. Improving energy efficiency of hybrid traction drive control for three-axle all-terrain vehicles with mountable electric rear axle drive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 458-473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье речь идет об исследовании подходов к управлению трехосным мотовездеходом с гибридной силовой установкой (ГСУ), у которого привод первых двух осей осуществляется от ДВС, а привод третьей оси от электродвигателя¹.

В качестве объекта исследования (рисунок 1) выступает прототип мотовездехода [1].

Предложенная конструкция учитывает особенности утилитарного мотовездехода. Силовая установка такого транспортного средства представляет собой единый блок с ДВС, клиноременным вариатором и раздаточной коробкой. Установленный интегрирован-

ный генератор мотоциклетного типа способен вырабатывать ток мощностью 100 Вт, этого недостаточно для подзарядки тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) электропривода. Ввиду данной особенности конструкции основным способом зарядки ТАБ электропривода следует принять внешнюю электросеть, а не генератор.

Для обеспечения колесной формулы 6х6 возможно использовать проходной редуктор среднего моста. Такая конструкция отличается относительной простотой. Однако в ней отсутствует дифференциальная связь между осями, что негативно сказывается на поворотливости.

¹ Котиев Г.О., Захаров А.Ю., Голубчик Т.В.. Транспортное средство: патент на полезную модель № RU218304 U1, Российская Федерация; опубликовано 22.05.2023., <https://patents.google.com/patent/RU218304U1/ru>



а



б

Рисунок 1 – Фото прототипа трехосного мотовездехода с гибридной силовой установкой:
а – электропривод третьей оси; б – мотовездеход в движении
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Photo of a three-axle ATV prototype with a hybrid powertrain:
a — third-axis electric drive; b — ATV in motion
Source: compiled by the author.

В литературе встречается немало примеров применения гибридных силовых установок в полноприводных транспортных средствах с параллельной схемой трансмиссии, в том числе и в мотовездеходах [2, 3, 4, 5]. Однако в них применение ГСУ исследуется в городских условиях движения, например, по циклу New European Driving Cycle (NEDC). Также не учитывается движение по неровностям, потери на буксование и особенности конструкции средства малой механизации.

Но ввиду многообразия возможных условий движения в качестве первого подхода можно принять формирование уставок по эффективности силовой установки в текущих условиях движения.

При рассмотрении подходов [6, 7] к управлению индивидуальным приводом в условиях движения по неровностям² можно выделить несколько основных вариантов. Но реализуемым на рассматриваемом объекте исследований является управление по крутящему моменту.

Таким образом, второй вариант подразумевает, что отношение подводимого к двигателям крутящего момента поддерживается равным отношению вертикальных реакций. Данный подход потенциально должен привести к уменьшению значений буксования колес.

Перед проводимым исследованием ставится задача о выборе критерия оценки эффективности энергоустановок, определении границ использования двух подходов и методе определения вертикальных реакций без внесения значительных изменений в конструкцию.

Целью данного исследования является определение наиболее эффективного подхода к формированию уставок для управления ГСУ мотовездехода в условиях движения по неровностям, в том числе с учетом работы созданных противобуксовочных систем для формирования комплексного подхода к рациональному управлению установкой.

² Шелмоков С.А., Купреянов А.А. Способ управления многоприводной электрической трансмиссией многоосной колесной машины: патент RU2426660C2, Российская Федерация; опубликовано 20.08.2011. <https://patents.google.com/patent/RU2426660C2/ru>

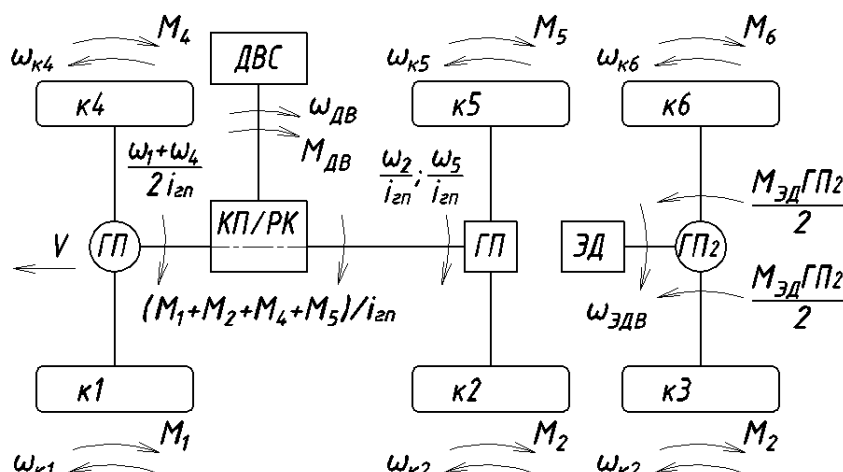


Рисунок 2 – Схема трансмиссии
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Transmission diagram
Source: compiled by the author.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Модель движения

Исходные данные были получены путем лабораторных исследований построенного прототипа и сторонних работ, посвященных мотовездеходам [1, 8].

Для проведения исследований применялась верифицированная пространственная модель движения по неровному твердому опорному основанию [9].

На рисунке 2 представлена схема трансмиссии, при которой дифференциал средней оси заблокирован. Привод на первую и вторую оси осуществляется от ДВС, привод третьей оси осуществляется от электродвигателя.

Оценка эффективности

Определим критерий, по которому и будет определяться эффективность. В некоторых работах [10,11] встречается использование альтернативных способов сопоставления расходов топлива и электроэнергии при возможности генерирования.

В контексте средства малой механизации снижение массы перевозимого топлива и ТАБ приводит к ощутимому росту грузоподъемности. Таким образом, автором статьи был предложен коэффициент K размерностью кг/(час Нм).

Для ДВС он выражается в отношении потребной массы топлива к подводимому на колеса крутящему моменту в течение единицы времени.

Для ЭД он выражается в отношении по-

требной электрической мощности к производству плотности энергии в ТАБ и подводимому на колеса крутящему моменту.

Для ДВС коэффициент K определяется как

$$K = B_{\text{ч}} / M_{\text{кДВС}}.$$

Для электропривода K определяется как

$$K = P / \omega M_{\text{кЭД}},$$

где $B_{\text{ч}}$ – расход массы топлива в час; M – крутящий момент на оси (суммарный на осях для ДВС); P – потребляемая электрическая мощность; ω – плотность энергии в единице массы батареи.

Таким образом, возможно сопоставить расход механической и электрической энергии через массу, в кг.

На рисунке 3 представлены полученные аналитическим методом графики изменения показателя эффективности для ДВС и ЭД при разных скоростях движения и величине запрашиваемой мощности. Аналитический метод дополнен экспериментальными данными по расходу топлива и КПД установок на разных режимах работы. В данном случае использована литиевая батарея, плотность энергии в которой 250 Вт ч/кг [12]. Из графиков видно, что применение ЭД наиболее эффективно на скоростях до 3,5 м/с, после чего эффективность ДВС резко возрастает по предложенному критерию.

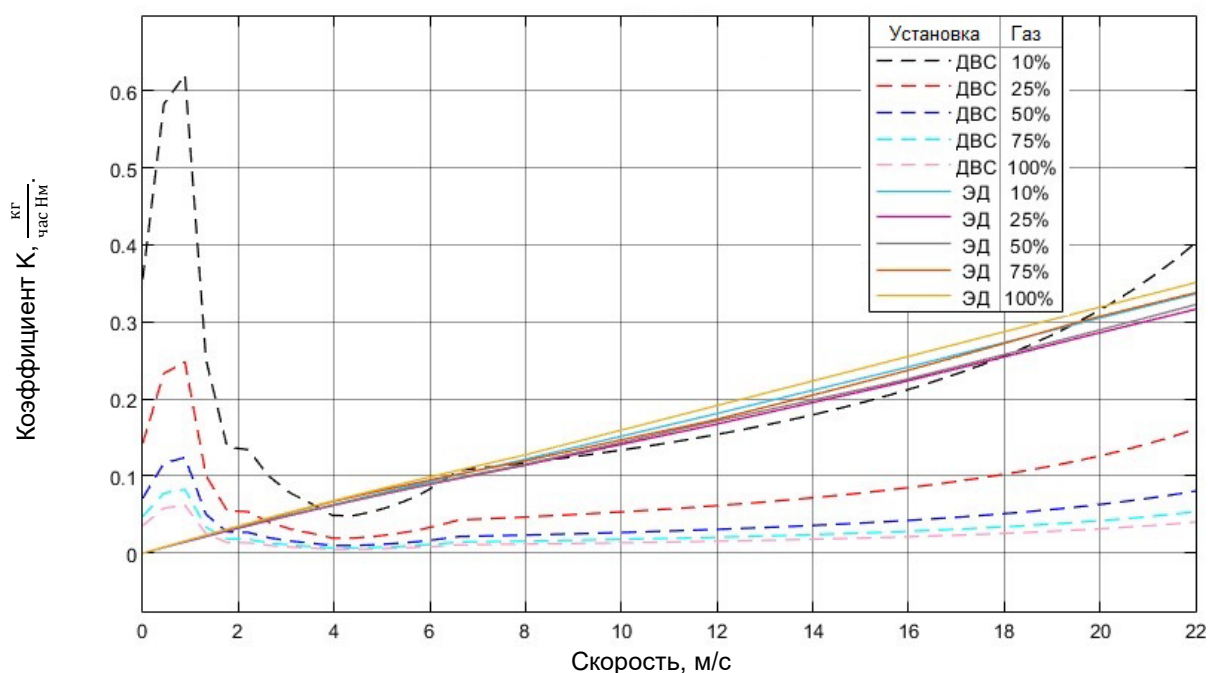


Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента эффективности для электропривода с литиевой батареей и ДВС
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Dependencies of efficiency coefficient for electric drive with Li-ion battery and internal combustion engine
Source: compiled by the author.

Уставка по эффективности

Установленные степени задействования той или иной силовой установки:

$$M_{ДВС} = M_{ДВС\max}(\omega_{ДВС})h_{ДВС\text{уст}}(V, h_{газ}),$$

$$M_{ЭД} = M_{ЭД\max}(\omega_{ЭД})h_{ЭД\text{уст}}(V, h_{газ}),$$

где $h_{ДВС\text{уст}}$ и $h_{ЭД\text{уст}}$ – установленные степени задействования крутящих моментов от ДВС и ЭД в зависимости от текущего положения рычага газа $h_{газ}$ и скорости движения V , $M_{ДВС\max}$ и $M_{ЭД\max}$ – крутящие моменты по внешней характеристике для ДВС и ЭД.

Сформируем уставки для ДВС и ЭД по условию минимизации суммарного коэффициента K .

Примем условие, что при формировании уставок, суммарный крутящий момент будет изменяться по заранее определенному правилу, в зависимости от скорости и степени нажатия на рычаг газа.

На рисунке 4 представлена схема работы алгоритма формирования уставок по данному подходу.

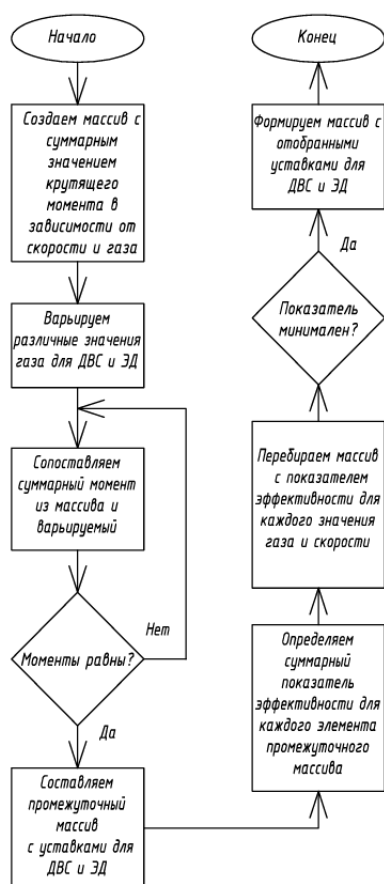


Рисунок 4 – Схема работы алгоритма для получения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Constraint settings scheme
Source: compiled by the author.

На рисунке 5 представлены значения полученных уставок для ДВС и ЭД мотовездехода с литиевой батареей.

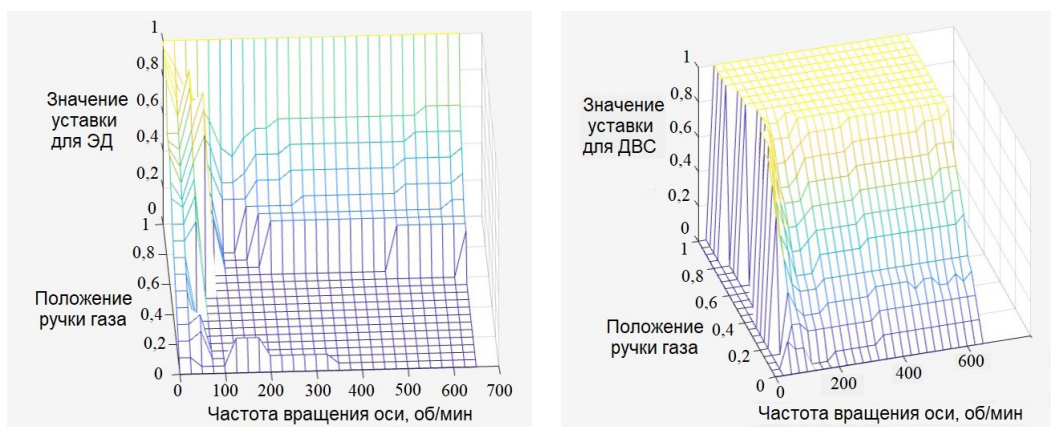


Рисунок 5 – Значения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Settings values
Source: compiled by the author.

Уставка по отношению вертикальных реакций

Для формирования уставок по отношению вертикальных реакций в статике примем условие, что ось с электроприводом будет вспомогательной к осям с приводом от ДВС. Соответственно, электропривод будет подстраиваться под характеристики ДВС.

Уставку для ДВС примем линейной, прямо

зависящей от положения рычага газа.

Из контрольного взвешивания мотовездехода в экспериментальной части данной работы было получено соотношение веса на первых двух осях к третьей, которое равняется 1,8.

На рисунке 6 представлена схема работы алгоритма формирования уставок по данному подходу.

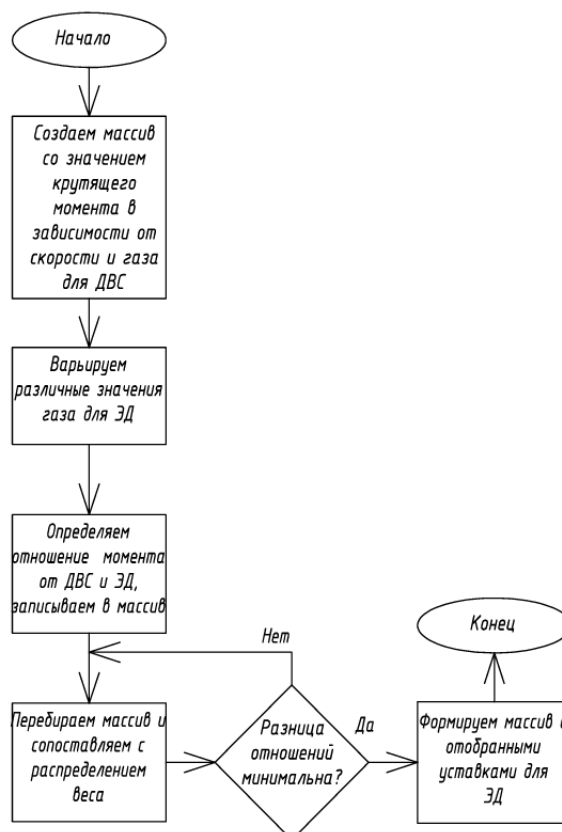


Рисунок 6 – Схема работы алгоритма для получения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Constraint settings scheme
Source: compiled by the author.

На рисунке 7 представлены полученные значения уставок.

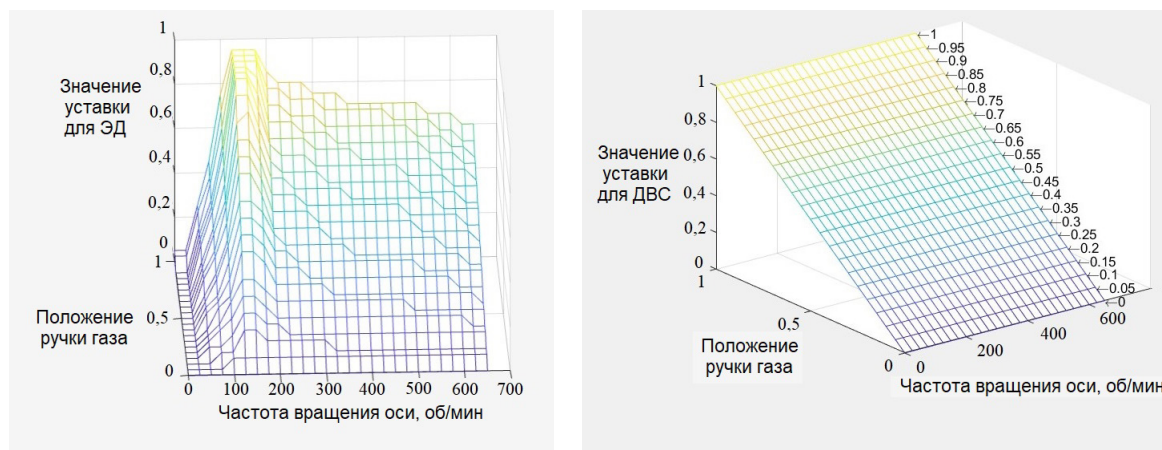


Рисунок 7 – Значения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Settings values
Source: compiled by the author.

Коррекция крутящего момента на основании косвенной оценки вертикальной реакции

С учетом особенностей трансмиссии (см. рисунок 2) нет необходимости определять вертикальную реакцию у всех движителей. Наиболее актуальным этот вопрос становится для третьей оси с электроприводом, что было решено путем использования метода косвенной оценки [13].

Ограничение крутящего момента может быть определено как

$$M_{кр} \leq \left(r_{св} - \frac{R_z}{c_{ш}}\right) R_{zq3} (f + \mu_{x \max}) \text{ Нм},$$

где R_z – вертикальная динамическая нагрузка на колесе третьей оси, Н; $M_{кр}$ – определяемый уставкой крутящий момент на колесе третьей оси, Нм; $r_{св}$ – свободный радиус колеса, м; $c_{ш}$ – коэффициент жесткости шины, Н/м; $\mu_{x \max}$ – коэффициент трения полного скольжения; f – коэффициент сопротивления качению.

Для ограничения крутящего момента необходимо оценить величину коэффициента сцепления при полном скольжении. Данный параметр меняется в процессе движения, что требует периодической оценки.

Исследование данного коэффициента, как правило, производится в тормозном режиме [14]. В ведущем режиме возможно определить реализованный коэффициент сцепления, зная величину подведенного крутящего момента и вертикальной реакции.

Продольную силу колеса P_x на третьей оси мотовездехода возможно определить по формуле

$$P_x = \frac{M_{эд} i_{ГПЗ}}{2\left(r_{св} - \frac{R_z}{c_{ш}}\right)} - \frac{\dot{\omega} J_k}{\left(r_{св} - \frac{R_z}{c_{ш}}\right)} - R_z f,$$

где $M_{эд}$ – крутящий момент электродвигателя, Нм; $i_{ГПЗ}$ – передаточное число редуктора; R_z – оценка вертикальной реакции на колесе, Н; $r_{св}$ – свободный радиус колеса, м; $c_{ш}$ – жесткость шины, Н/м.

По полученным данным становится возможным сделать выводы и о максимальном значении коэффициента сцепления, но при резком изменении сцепных свойств становится необходимой следующая система.

Противобуксовочная система

Для предотвращения буксования колес приводной момент может дополнительно уменьшаться путем формирования воздействия на базе измеренного значения буксования. Алгоритм распознает факт буксования колес третьей оси и ограничивает крутящий момент. Обратный алгоритм описан в [15].

Ведущий момент на колесе третьей оси $M_{к3}$ с учетом работы системы может быть определен так:

$$M_{к3} = M_{кр} h_S,$$

где $h_S = [0...1]$ – степень снижения действующего момента на третьей оси за счет работы алгоритма системы; $M_{кр}$ – подводимый крутящий момент с коррекцией по косвенной оценке вертикальной реакции, Нм.

Вектор скорости $\vec{V}_3$ центра третьей оси определяется как сумма скорости $\vec{V}_C$ центра масс и относительной скорости $\omega_z l_3$ центра третьей оси вокруг полюса..

$$\begin{aligned} \vec{V}_3 &= \vec{V}_C + \omega_z l_3, \\ \left| \vec{V}_{30} \right| &\approx \frac{\omega_{3лев} + \omega_{3прав}}{2} r_{cm}, \end{aligned}$$

где $\omega_{3лев}, \omega_{3прав}$ – угловые скорости вращения левого и правого колес третьей оси;

$\vec{V}_{30}$ – вектор скорости $\vec{V}_3$ центра третьей оси; l_3 – расстояние от центра масс мотовездехода до центра колеса третьей оси, м.

Определим скорости движения центров колес третьей оси:

$$\begin{aligned} V_{X3лев} &= V_{CX} + \omega_z \sqrt{l_3^2 + \frac{B^2}{4} \arctg \frac{B}{2l_3}}, \\ V_{X3прав} &= V_{CX} - \omega_z \sqrt{l_3^2 + \frac{B^2}{4} \arctg \frac{B}{2l_3}}, \end{aligned}$$

где B – ширина колеи, м; V_{CX} – скорость центра масс.

Далее определяется скольжение забегающего колеса $S_{3заб}$ по известной формуле [9]

$$S_{3заб} = \frac{V_{X3ом} - \omega_{3ом} r_{cm}}{V_{X3ом}}.$$

Для поддержания величины скольжения в оптимальном диапазоне 0,1...0,3 может быть предложен следующий алгоритм работы противобуксовочной системы. При превышении оптимального значения величины буксования задействуется ПИД-регулятор:

$$\begin{aligned} \text{если } S_{3заб} &\geq 0,3 \text{ то } h_S(PID), \\ \text{если } S_{3заб} &< 0,3 \text{ то } h_S = 1. \end{aligned}$$

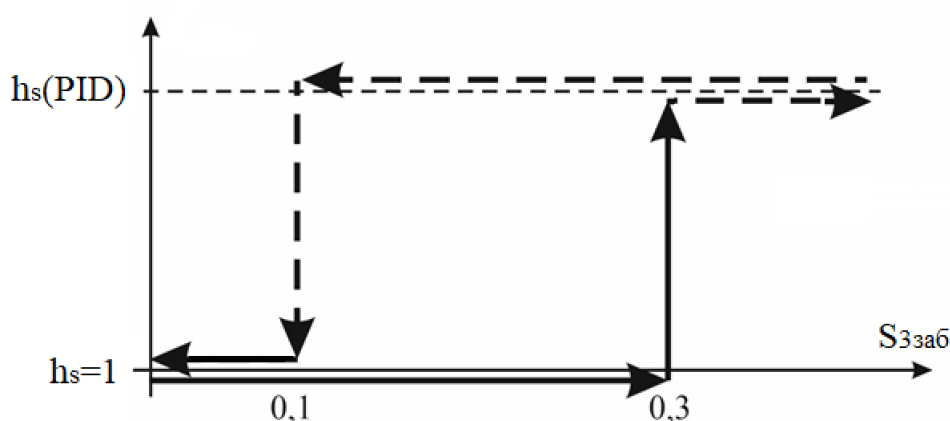


Рисунок 8 – Вид релейной функции
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Relay function
Source: compiled by the author.

Для снижения вероятности возникновения автоколебательного процесса в контуре управления введем релейную функцию (рисунок 8).

Модель тяговой батареи

Для моделирования работы литиевой батареи была использована модель в среде Matlab Simulink. Блок «Аккумулятор» реализует универсальную динамическую модель, представляющую наиболее распространенные типы аккумуляторов.

Параметры схемы можно изменять для отображения конкретного типа аккумулятора и его разрядных характеристик. Типичная разрядная кривая состоит из трёх участков. Выбранные токи соответствуют величинам, равным 1С=104А, 2С=208А и 3С=312А, что характерно для применяемых ячеек.

Для литий-ионных аккумуляторов модель использует следующие уравнения [16, 17]:

$$\begin{aligned} f_1(it, i^*, i) &= E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - \\ &- K \frac{Q}{Q - it} it + A e^{-Bit}, \\ f_2(it, i^*, i) &= E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} i^* - \\ &- K \frac{Q}{Q - it} it + A e^{-Bit}, \end{aligned}$$

где f_1 применяется при разрядке, f_2 при зарядке батареи, E_0 – постоянное напряжение, в В; K – сопротивление поляризации, Ом;

Q – полная емкость аккумулятора, Ач; i – ток батареи, А; i^* – динамика тока, А; B – экспоненциальная емкость, Ач⁻¹; it – извлеченная емкость батареи, Ач.

Режимы движения

Определим возможные типы дорог и их характеристики.

Неровности дорожной поверхности можно описать величиной дисперсии неровностей и коэффициентов, характеризующих степень нерегулярности профиля [18].

Неровности могут быть образованы как дефектами дорожного полотна, так и препятствиями в виде крупных камней, пней или упавших деревьев.

В литературе встречаются усредненные значения диаметров поваленных ветром стволов деревьев. Данные величины варьируются в диапазоне от 110 до 550 мм [19, 20].

Для описания профиля дороги, одинакового под движителем левого и правого борта машины, достаточно знать корреляционную функцию высот неровностей. Наиболее распространенный тип аппроксимации корреляционных функций профиля дорожной поверхности $R(l)$ имеет вид:

$$R(l) = D_q e^{-\alpha_l |l|} \cos(\beta_l l),$$

где D_q – дисперсия неровностей дорожной поверхности; l – длина пути; α_l , β_l – коэффициенты, характеризующие степень нерегулярности профиля.

Таблица 1

Распределение скорости движения для дорог с различными покрытиями
Источник: составлено автором.

Table 1

Traffic speeds distribution for roads with different surfaces
Source: compiled by the author.

№	Скорость, км/ч	5	10	15	20	25	35	45	55	65
1	Путь, м	34	-	170	-	204	357	510	238	187
	Время, с	25	-	41	-	30	37	41	16	10
2	Путь, м	207	-	414	-	644	575	322	138	-
	Время, с	149	-	100	-	93	60	26	9	-
3	Путь, м	285	-	361	-	570	418	266	-	-
	Время, с	205	-	87	-	82	43	22	-	-
4	Путь, м	506	-	621	-	736	437	-	-	-
	Время, с	364	-	149	-	106	45	-	-	-
5	Путь, м	207	234	315	144	-	-	-	-	-
	Время, с	149	84	76	26	-	-	-	-	-
6	Путь, м	288	360	252	-	-	-	-	-	-
	Время, с	208	130	61	-	-	-	-	-	-

Для каждого из типов дороги необходимо задать распределение вероятности скорости движения. Примем общую длину пути равной 10000 м.

Возьмём характеристики неровностей для шести типов дорог из [9, 21].

В работе [22] описан ездовой цикл мотовездехода. Для данного цикла характерно движение со скоростью 60 км/ч на протяжении 150 с, общее время движения 18 мин.

В работе [23] отражены характерные максимальные для вездеходов скорости движения 40, 50, 60 км/ч.

Определим время и длину пути для каждого типа дороги с учетом распределения по скоростям движения.

В таблице 1 представлено соответствие длины пути и скорости движения для дорог с различными типами покрытия.

Процесс исследования

Для каждого режима движения производилось моделирование движения с применением

пяти подходов к управлению приводом:

1. Без применения специальных подходов, уставка для ДВС и ЭД прямо и линейно соответствовали положению педали газа.

2. Метод на основе постоянного соотношения тяги.

3. Метод на основе постоянного соотношения тяги с использованием систем повышения эффективности.

4. Метод на основе выбора наиболее эффективной энергоустановки.

5. Метод на основе выбора наиболее эффективной энергоустановки с использованием систем повышения эффективности.

Результаты

В таблице 2 представлены результаты для наиболее эффективных подходов к управлению. Сравнение проводится с вариантом без применения специальных подходов, где уставка для ДВС и ЭД прямо и линейно соответствовали положению педали газа.

Таблица 2
Полученные наилучшие результаты для каждого режима движения
Источник: составлено автором.

Table 2
The best results for each driving mode
Source: compiled by the author.

№	№ наиболее эффективного подхода к управлению	Расход бензина, г	Расход батареи, г	Расход батареи, г/расход бензина, г	Снижение массового расхода	Удельный расход топлива, г/км	Удельный расход батареи, г/км
1	5	106	162	1,52	53%	62	95
2	3,5	207	382	1,84	26%	90	166
3	3	214	333	1,55	22%	112	175
4	3	311	389	1,25	32%	135	169
5	3	273	155	0,56	30%	303	172
6	3	200	125	0,63	50%	222	138

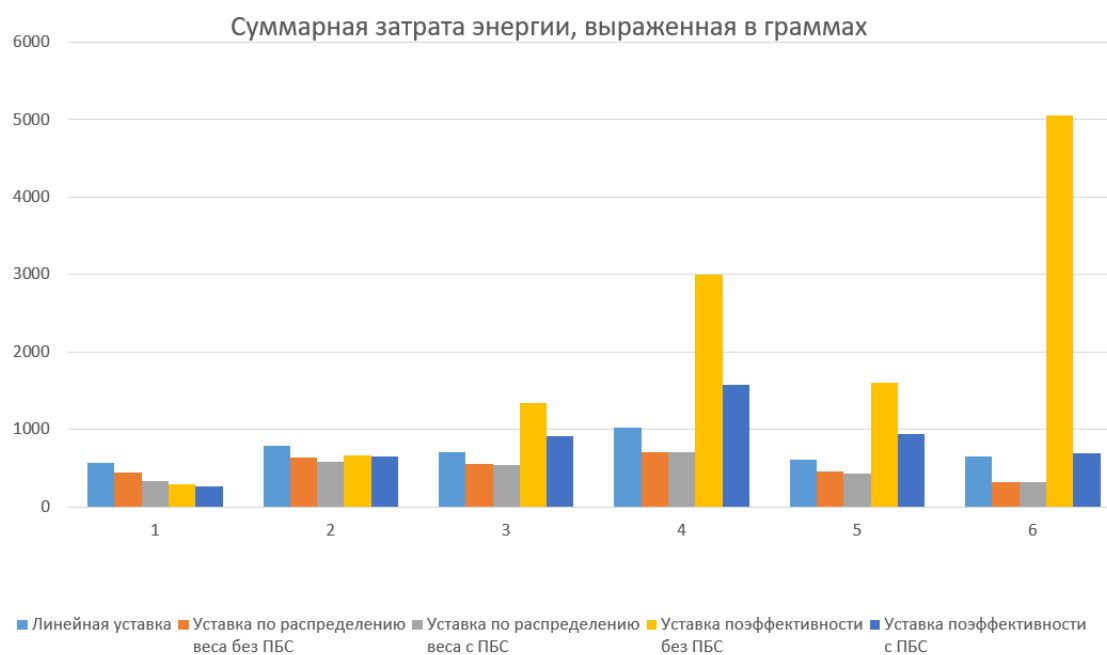


Рисунок 9 – График суммарного расхода энергии для каждого варианта режима движения
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Total energy consumption for each driving mode option
Source: compiled by the author.

На рисунке 9 представлен рисунок с графической иллюстрацией всех результатов.

Из полученных данных следует, что при $D_q 10^{-4}$, $m^2 < 5,33 m^2$ наиболее эффективен подход к управлению, при котором уставка выбирается исходя из задействования наиболее эффективной энергетической установки.

При $D_q 10^{-4}$, $m^2 > 5,33 m^2$ наиболее эффективен подход к управлению, при котором уставка способствует поддержанию постоянства соотношения крутящих моментов на осях.

При $D_q 10^{-4}$, $m^2 \approx 5,33 m^2$ необходимо реализовать переходный процесс между уставками.

Алгоритм переключения между двумя способами управления в дальнейшем предполагается осуществить посредством применения нечеткой логики.

Выводы

1. Разработан новый комплексный закон управления ГСУ, снижающий массовый расход на 22–53%. Метод управления ГСУ включает в себя два подхода к формированию уставок. Для дорог со значением дисперсии $D_q < 5,33$ реализуется метод на основе выбора наиболее эффективной энергоустановки, при $D_q > 5,33$ реализуется метод на основе постоянного соотношения тяги.

2. Предложены новые алгоритмы повышения энергоэффективности, направленные на снижение величины буксования колес третьей оси с учетом вертикальной нагрузки. Полученное снижение массового расхода достигает 8%.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большие значения по экономии вызваны тем, что сравнение осуществляется с самым простым подходом к управлению. Так как рассматриваемая конструкция является новой и отсутствуют подходящие для сравнения решения.

Новым решением является сравнение эффективности через массовый расход. Если для ДВС это вполне каноничное решение, то для электропривода в литературе встречаются только примеры с достаточно отдаленным сходством. Самого массового расхода электроэнергии не происходит, а вычисляется условная трата. Такой подход примечателен тем, что при изменении типа накопителя энергии уставки также будут изменяться. Для выбранной батареи интервал режимов работы, когда электропривод эффективнее, достаточно невелик. Ожидаемо, что он располагается в зоне низких скоростей движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Журкин М.М., Захаров А.Ю., Голубчик Т.В. Результаты практической реализации модульной конструкции электропривода третьей оси гибридного мотовездехода // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 1. С. 98–106. <https://www.elibrary.ru/oncjqm>
2. Селифонов В.В., Карпунин К.Е., Филонов А.И., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В. Гибридные автомобили – решение экологической проблемы автомобильного транспорта // Известия МГТУ «МАМИ». 2007. Т. 1, № 2. С. 30–44. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-69519>
3. Лин З.Н., Попов А.А., Сидоров В.Н., Голубина С.А. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24, № 1. С. 50–56. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>
4. Ahmad Zaki Abdillah, Zainab Asus, and Zul Hilmi Che Daud Dynamic simulation model of a hybrid electric atv. Journal of Transport System Engineering 8:2 (2021) 1–7, <https://doi.org/10.11113/jtse.v8.168>
5. Dragan Simic Modeling, Simulation and Evaluation of a Powertrain of a Hybrid Electric All Terrain Vehicle (ATV) International Advanced Mobility Forum Geneva, Switzerland, March 09 - 10, 2010. <https://doi.org/10.13140/2.1.3791.8405>
6. Плиев И.А., Сайкин А.М., Коршунова Г.В., Архипов А.В. Алгоритмы управления мощностями, подводимыми к колёсам полноприводных автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 3(74). С. 16–18. <https://elibrary.ru/puwqix>
7. Jackson A., Crolla D., Woodhouse A., Parsons M. Improving Performance of a 6x6 Off-Road Vehicle through Individual Wheel Control. SAE Technical Paper, 2002, 2002-01-0968, <https://doi.org/10.4271/2002-01-0968>
8. Lyashenko M., Potapov P., Dolotov A., A. Diakov, Evseev K., Zverev A. Analysis of ATV transmission operation according to the results of tests on a dynamometer test bench. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 820(1):012018 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012018>
9. Антонян А.В. Алгоритм распределения крутящего момента в автомобиле с колесной формулой 4x4 для обеспечения устойчивости движения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9 (690). С. 31–37. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-31-37>
10. Paganelli G. Delprat S., Guerra T.M., Rimaux J., Santin J.J. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains / // Proceedings of the 55th Vehicular Technology Conference, Vancouver, Canada. 2002. P. 2076-2081. <https://doi.org/10.1109/VTC.2002.1002989>
11. Zhang Q., Tian S. Energy Consumption Prediction and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles Based on an Equivalent Minimum Fuel Consumption Model. Sustainability 2023, 15, 9394. <https://doi.org/10.3390/su15129394>

12. Кочеров А.В., Курмакаев Д.Р., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. Выбор типа электрохимической системы аккумулятора электромобиля LCV-сегмента // НГТУ, Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 2(121), с: 156–161. https://doi.org/10.46960/1816-210x_2018_2_156

13. Журкин М.М., Жилейкин М.М. Применение нейронной сети для оценки вертикальной реакции в пятне контакта с целью повышения энергоэффективности // Известия МГТУ «МАМИ». 2025. Т. 19, № 3. С. 146–155. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-688533>

14. Александров А.С., Семенова Т.В. Метод расчета предельной глубины колеи для безопасного движения // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 104–116. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_60_104

15. Жилейкин М.М., Журкин М.М. Алгоритм работы антиблокировочной системы тормозов с функцией противодействия заносу для двухосных автомобилей с одной ведущей осью // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 1(43) С. 51–56. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-43-1-51-56>

16. Omar N., Monem M.A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van den Bossche P., Coosemans T., Van Mierlo J. "Lithium iron phosphate based battery Assessment of the aging parameters and development of cycle life model." *Applied Energy*, Vol. 113, January 2014, pp. 1575–1585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.003>

17. Tremblay O., Dessaint L.A. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." *World Electric Vehicle Journal*. Vol. 3, May 13–16, 2009. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>

18. Левин А.И., Винокуров Г.Г. Влияние статистических характеристик профиля дороги на колебания подвески автомобильной техники Севера // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2018. № 5(67). С. 54–64. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.67.18657>

19. Hilimire K., Nesmith J., Caprio A., Milne. R. Field Note: Attributes of Windthrown Trees in a Sierra Nevada Mixed-conifer Forest. *Western Journal of Applied Forestry* 2013. 28(2): 85-88. <https://doi.org/10.5849/wjaf.12-027>

20. Bakalov Z., Belilov S., Georgieva M., Georgiev G. Natural disturbances in the forests and bark beetle outbreaks over the period 2015-2024 in the Rhodope Mountains, Bulgaria. *Silva Balcanica*. 2026. 27(1): 1-8. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.27.e183431>

21. Левин А.И., Буслаева И.И., Винокуров Г.Г., Гаврильева А.А. Влияние сезонного состояния дороги в криолитозоне на колебания подвески автомобильной техники // Физико-математические науки. 2019. № 4 (72) <https://www.elibrary.ru/jpvvgjt>

22. Ramírez-Ceja, Axel Iván, Manríquez-Padilla, Carlos Gustavo, Pérez-Cruz, Ángel and Torrez-Rico, Luis Armando. Design of a three-speed automatic transmission system with reverse for all-terrain vehicles (ATV). *Journal of Mechanical Engineering*.

2024; 8[21]-1-12: e20821112. <https://doi.org/10.35429/JME.2024.8.21.2.12>

23. Манянин С.Е., Черевастов М.Г. К вопросу об управляемости транспортного средства, снабженного шинами сверхнизкого давления // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3 (130) https://doi.org/10.46960/1816-210X_2020_3_103

REFERENCES

1. Zhurkin M.M., Zaharov A.Yu., Golubchik T.V. Rezul'taty prakticheskoy realizatsii modul'noy konstrukcii elektroprivoda tret'ey osi gibridnogo motovezdekhoda. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2024; № 1. S. 98-106. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/oncjpm>

2. Selifonov V.V., Karpuhin K.E., Filonov A.I., Baulina E.E., Avruckij E.V. Gibridnye avtomobili - reshenie ekologicheskoy problemy avtomobil'nogo transporta. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2007; T. 1. №2. С. 30-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/2074-0530-69519>

3. Lin Z.N., Popov A.A., Sidorov V.N., Golubina S.A. Optimizatsiya algoritma upravleniya avtomobilem s gibridnoy silovoy ustanovkoj. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2023; T. 24. № 1. S. 50–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

4. Ahmad Zaki Abdillah, Zainab Asus, and Zul Hilmi Che Daud Dynamic simulation model of a hybrid electric atv. *Journal of Transport System Engineering* 8:2 .2021; 1–7, <https://doi.org/10.11113/jtse.v8.168>

5. Dragan Simic Modeling, Simulation and Evaluation of a Powertrain of a Hybrid Electric All Terrain Vehicle (ATV) International Advanced Mobility Forum Geneva, Switzerland, March 09 - 10, 2010; <https://doi.org/10.13140/2.1.3791.8405>

6. Pliev I.A, Sajkin A.M., Korshunova G.V., Arhipov A.V. Algoritmy upravleniya moshchnostyami, podvodimymi k kolyosam polnoprivodnyh avtomobilej. «Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov», 2012; № 3(74), С. 16–18. (In Russ.) <https://elibrary.ru/puwqix>

7. Jackson A., Crolla D., Woodhouse A., Parsons M. Improving Performance of a 6×6 Off-Road Vehicle through Individual Wheel Control. *SAE Technical Paper*, 2002; 2002-01-0968, <https://doi.org/10.4271/2002-01-0968>

8. Lyashenko M., Potapov P., Dolotov A., Diakov A., Evseev K., Zverev A. Analysis of ATV transmission operation according to the results of tests on a dynamometer test bench. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 820(1):012018 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012018>

9. Antonyan A.V. Algoritm raspredeleniya krutyashchego momenta v avtomobile s kolesnoj formuloj 4h4 dlya obespecheniya ustojchivosti dvizheniya. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. 2017; № 9 (690). S. 31-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-31-37>

10. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains / Paganelli G., Delpirat S., Guerra T.M., Rimaux J., Santin J.J. // *Proceedings of the 55th Vehicular Technology Conference*, Vancouver, Canada. 2002. P. 2076-2081. <https://doi.org/10.1109/VTC.2002.1002989>

11. Zhang Q., Tian S. Energy Consumption Prediction and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles Based on an Equivalent Minimum Fuel Consumption Model. *Sustainability* 2023; 15, 9394. <https://doi.org/10.3390/su15129394>
12. Kocherov A.V., Kurmakaev D.R., Sizov A.Yu., Tumanov A.A., Fedosova L.O. Vybór tipa elektromobilnoy sistemy akkumulyatora elektromobilya LCV-segmenta. *NGTU, Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2018; 2(121), 156-161. (In Russ.) https://doi.org/10.46960/1816-210x_2018_2_156
13. Zhurkin M.M., Zhilejkin M.M. Primenenie nerjonnogo seti dlya ocenki vertikal'noj reakcii v pyatne kontakta s cel'yu povysheniya energoeffektivnosti. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2025; T. 19, No 3. S. 146–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/2074-0530-688533>. EDN: OVIKAJ.
14. Aleksandrov A.S., Semenova T.V. Metod rascheta predel'noj glubiny kolei dlya bezopasnogo dvizheniya. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2022; № 1 (60). S. 104–116. (In Russ.) https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_60_104
15. Zhilejkin M.M., Zhurkin M.M. Algoritmy raboty antiblokirovочноy sistemy tormozov s funkciej protivodejstviya zanosu dlya dvuhosnyh avtomobilej s odnoj vedushchej os'yu. *Izvestiya MGTU MAMI* 2020; № 1(43) S. 51-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-43-1-51-56>
16. Omar N., Monem M.A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van den Bossche P., Coosemans T., Van Mierlo J. "Lithium iron phosphate based battery — Assessment of the aging parameters and development of cycle life model." *Applied Energy*, Vol. 113, January 2014, pp. 1575–1585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.003>
17. Tremblay O., Dessaint L.A., "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." *World Electric Vehicle Journal*. Vol. 3, May 13–16, 2009. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>
18. Levin A.I., Vinokurov G.G. Vliyanie statisticheskikh harakteristik profilya dorogi na kolebaniya podveski avtomobil'noj tekhniki Severa. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018; №5(67). S. 54-64. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.67.18657>
19. Hilimire, K., Nesmith J., Caprio A., Milne. R., Field Note: Attributes of Windthrown Trees in a Sierra Nevada Mixed-conifer Forest. *Western Journal of Applied Forestry*. 2013; 28(2): 85-88. <https://doi.org/10.5849/wjaf.12-027>
20. Bakalov Z., Belilov S., Georgieva M., Georgiev G. Natural disturbances in the forests and bark beetle outbreaks over the period 2015-2024 in the Rhodope Mountains, Bulgaria. *Silva Balcanica*, 2026; 27(1): 1-8. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.27.e183431>
21. Levin A.I., Buslaeva I.I., Vinokurov G.G., Gavril'eva A.A. Vliyanie sezonnoy sostoyaniya dorogi v kriolitozone na kolebaniya podveski avtomobil'noj tekhniki Fiziko-matematicheskie nauki 2019; №4 (72) (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/jpvgjt>
22. Ramírez-Ceja, Axel Iván, Manríquez-Padilla, Carlos Gustavo, Pérez-Cruz, Ángel and Torrez-Rico, Luis Armando. Design of a three-speed automatic transmission system with reverse for all-terrain vehicles (ATV). *Journal of Mechanical Engineering*. 2024. 8[21]-1-12: e20821112. <https://doi.org/10.35429/JME.2024.8.21.2.12>
23. Manyanin S.E., Cherevastov M.G. K voprosu ob upravlyaemosti transportnogo sredstva, snabzhenogo shinami sverhnizkogo davleniya *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*. 2020. № 3 (130) (In Russ.) https://doi.org/10.46960/1816-210x_2020_3_103

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Журкин Михаил Михайлович – аспирант кафедры СМ10 «Колёсные машины» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-6254-8954>,

SPIN-код: 9228-4183,

e-mail: mimizhur@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhurkin Mikhail M. – postgraduate student of the SM10 Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya st, Moscow, 105005).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-6254-8954>,

SPIN-code: 9228-4183,

e-mail: mimizhur@gmail.com