

Научная статья
УДК 629.113.001
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>
EDN: SEATMZ



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ГИБРИДНОЙ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ НА СТЕНДАХ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ

П.А. Киселёв ✉, А.И. Федотов, О.С. Яньков, С.Н. Кривцов
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
✉ ответственный автор
pavel.kiselev.97.97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные колёсные транспортные средства (КТС) с электрическими и гибридными силовыми установками (ЭСУ и ГСУ) становятся все более распространенными. Очевидно, что с ростом количества КТС с ЭСУ и ГСУ возникает необходимость в проведении полноценного и качественного исследования рабочих процессов КТС как на этапах производства и доводки на предприятиях-изготовителях, так и в условиях эксплуатации на станциях технического обслуживания (СТО) и прочих организациях. Исследование технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ с классической компоновкой силового агрегата и трансмиссии (привод на переднюю или заднюю ось) вполне возможен на существующих стендах. Но при исследовании КТС с ЭСУ и ГСУ с полным приводом или с электродвигателем-генератором (ЭГ) на каждое ведущее колесо возникает проблема, связанная с отсутствием методов и средств для измерения силы тяги, индивидуально на каждом колесе.

Материалы и методы. В данном разделе приводится анализ возможностей проведения исследования технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ на современных силовых и инерционных стендах, реализующих принцип обратимости движения.

Результаты. Разработаны методы исследования тягово-динамических свойств КТС с ЭСУ и ГСУ, в ходе реализации которых предлагается использовать созданный исследовательский стендовый комплекс, включающий гибридный стенд с управляющими и измерительными системами, позволяющими определять силы и мощность на ведущих колёсах КТС, а также временные и кинематические параметры процесса его функционирования. В ходе экспериментальных исследований получены результаты процессов функционирования автомобилей Kia Soul EV и Toyota Prius NHW20, выполнен анализ их силовых и кинематических параметров.

Заключение. В результате исследования доказано, что для обеспечения высокоинформативных и стабильных тестовых режимов функционирования КТС в процессе исследования их тягово-динамических свойств необходимо использовать гибридные стенды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрические силовые установки, гибридные силовые установки, исследование, испытание, диагностика, контроль технического состояния, стенды с беговыми барабанами

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Киселёв П.А., Федотов А.И., Яньков О.С., Кривцов С.Н. Исследование тягово-динамических свойств колёсных транспортных средств с электрической и гибридной силовыми установками на стендах с беговыми барабанами // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 900-913. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>

© Киселёв П.А., Федотов А.И., Яньков О.С., Кривцов С.Н., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>
EDN: SEATMZ

INVESTIGATION OF TRACTION AND DYNAMIC PROPERTIES OF WHEELED VEHICLES WITH ELECTRIC AND HYBRID POWER PLANTS ON THE TEST STANDS WITH RUNNING DRUMS

Pavel A.I. Kiselyov ✉, **Alexander I. Fedotov**, **Oleg S. Yan'kov**, **Sergey N. Krivtsov**
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia
✉ corresponding author
pavel.kiselev.97.97@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern wheeled vehicles with electric and hybrid power plants are becoming more and more widespread. It is obvious that with the increasing number of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants, there is a need to conduct a full-fledged and qualitative study of the working processes of wheeled vehicles both at the stages of production and fine-tuning at manufacturing enterprises, and in operating conditions at the service stations and other organizations. The research of the technical condition of a wheeled vehicle with electric and hybrid power plants with a classic layout of the power unit and transmission (front or rear axle drive) is quite possible to be conducted on existing stands. But when testing wheeled vehicles with electric and hybrid power plants with all-wheel drive or with an electric motor generator for each drive wheel, a problem arises due to the lack of methods and means to measure traction force on each wheel individually.

Materials and methods. This section provides an analysis of the possibilities of conducting a study of the technical condition of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants on modern power and inertia stands that apply the principle of reversibility of motion.

Results. Methods have been developed to study the traction and dynamic properties of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants, to implement it was proposed to use developed research stand complex, which includes a hybrid stand with control and measuring systems that allow to determine forces and power on the driving wheels of vehicles, as well as time and kinematic parameters of its functioning process. During the experimental studies, the results of Kia Soul EV and Toyota Prius NHW20 operation processes were obtained, their power and kinematic parameters were analyzed.

Conclusion. As a result of the study, it has been proved that in order to ensure highly informative and stable test modes of wheeled vehicle's operation in the process of studying their traction and dynamic properties, it is necessary to use hybrid stands.

KEYWORDS: electric power plants, hybrid power plants, research, testing, diagnostics, control of technical condition, stands with running drums

The article was submitted: 1.10.2024; approved after reviewing: 24.10.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Kiselyov P.A., Fedotov A.I., Yan'kov O.S., Krivtsov S.N. Investigation of traction and dynamic properties of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants on the test stands with running drums. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 900-913. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>

© Kiselyov P.A., Fedotov A.I., Yan'kov O.S., Krivtsov S.N., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

На автомобильных дорогах нашей страны наблюдается активный рост КТС с ЭСУ и ГСУ. Согласно исследованию статистики продаж¹ КТС с ЭСУ средний годовой темп роста количества зарегистрированных в Российской Федерации автомобилей на период с 2015 по 2023 г. составил 134,8%. По состоянию на март 2024 г. продажи новых КТС с ЭСУ составляют 2,5 тыс. автомобилей, что является самым высоким показателем за всё время². В соответствии с «Концепцией производства и развития электротранспорта в России» за прошлый год объём выпуска КТС с ЭСУ составил 9740 ед., а к концу 2024 г. планируется выпустить около 17 500 ед. транспорта. При этом отечественными марками КТС с ЭСУ являются «Атом» (АО «Кама»), «Амберавто» («Автодор») и Lada e-Largus («АвтоВАЗ»). Продажи КТС с ГСУ, по состоянию на декабрь 2023 г., составляли всего 5,9 тыс. сделок, что на 44% выше, чем в ноябре 2023 г. В феврале 2024 г. в Российской Федерации было совершено 7,3 тыс. сделок (на 52% выше, чем в январе 2024 г.). Активно увеличивается доля КТС с ГСУ на рынке. Так, в декабре 2023 г. она составляла 5%, в январе 2024 – 6%, а в феврале уже 7,1%³. Очевидно, что с ростом количества КТС с ЭСУ и ГСУ возникает необходимость в проведении полноценного и качественного исследования рабочих процессов КТС как на этапах производства и доводки на предприятиях-изготовителях, так и в условиях эксплуатации на станциях технического обслуживания (СТО) и прочих организациях.

На сегодняшний день существует множество различных компоновок гибридных автомобилей: последовательные, параллельные и последовательно-параллельные схемы⁴. Последовательно-параллельная схема ГСУ совместила все положительные качества последовательной и параллельной схемы ГСУ. Основными элементами привода для такой компоновки являются двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и, как правило, один или несколько электродвигателей-генераторов (ЭГ). Наиболее ярким примером является Toyota Prius и Mitsubishi Outlander, в ГСУ которых применяется несколько ЭГ и устройство для разделения мощности (рисунок 1).

Для КТС с ЭСУ характерна как классическая типовая компоновка силового агрегата и трансмиссии, так и компоновка с разнесёнными ЭГ индивидуально на каждое ведущее колесо (рисунок 2). В первом случае подвод крутящего момента на ведущие колёса КТС осуществляется одним ЭГ через редуктор и шарниры равных угловых скоростей (рисунок 2, а). Во втором случае ЭГ установлены возле каждого ведущего колеса, и КТС оснащён системой векторизации крутящего момента, которая вычисляет оптимальную тягу для каждого из колёс (рисунок 2, б).

Исследованиям КТС с ЭСУ и ГСУ посвящены труды^{5,6} [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Однако в основном в данных работах рассматривались вопросы проектирования КТС с ЭСУ и ГСУ, и их испытаниям в дорожных условиях.

¹ СБЕР Про: Заряд для автопрома. Как развивается индустрия электромобилей. Режим доступа. URL: <https://sber.pro/publication/zaryad-dlya-avtoproma-kak-razvivaetsya-industriya-elektromobilei>. [Электронный ресурс] (дата обращения: 30.09.2024).

² Автостат. Аналитическое агентство. Статистика Продаж новых электромобилей в РФ. Режим доступа. URL: <https://www.autostat.ru/news/57294>. [Электронный ресурс] (дата обращения: 30.09.2024).

³ Специальный проект Автопарк. Чем вызван всплеск спроса на гибриды и электрокары в России. Режим доступа. URL: <https://rg.ru/2024/03/15/chem-vyzvan-vsplesk-sprosa-na-gibridy-i-elektrokar-y-v-rossii.html>. [Электронный ресурс] (дата обращения: 30.09.2024).

⁴ Яньков О.С. Колёсные транспортные средства с электрическим и гибридным приводом: для обучающихся по направлениям подготовки 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», уровень образования – «магистратура», 23.06.01 «Техника и технологии наземного транспорта», уровень образования – «аспирантура». Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. 246 с. ISBN 978-5-8038-1740-6.

⁵ Maharun M., Mohamad Noor Iman Mohd Nor A Study of Torque Vectoring and Traction Control for an All-Wheel Drive Electric Vehicle (2014) MATEC Web of Conferences 13,01003.

⁶ Pawar V.T. Active Torque Vectoring for All Wheel Drive FSAE Electric Car. Dissertation of Master of Science in Mechanical Engineering. 2016. 80 p.

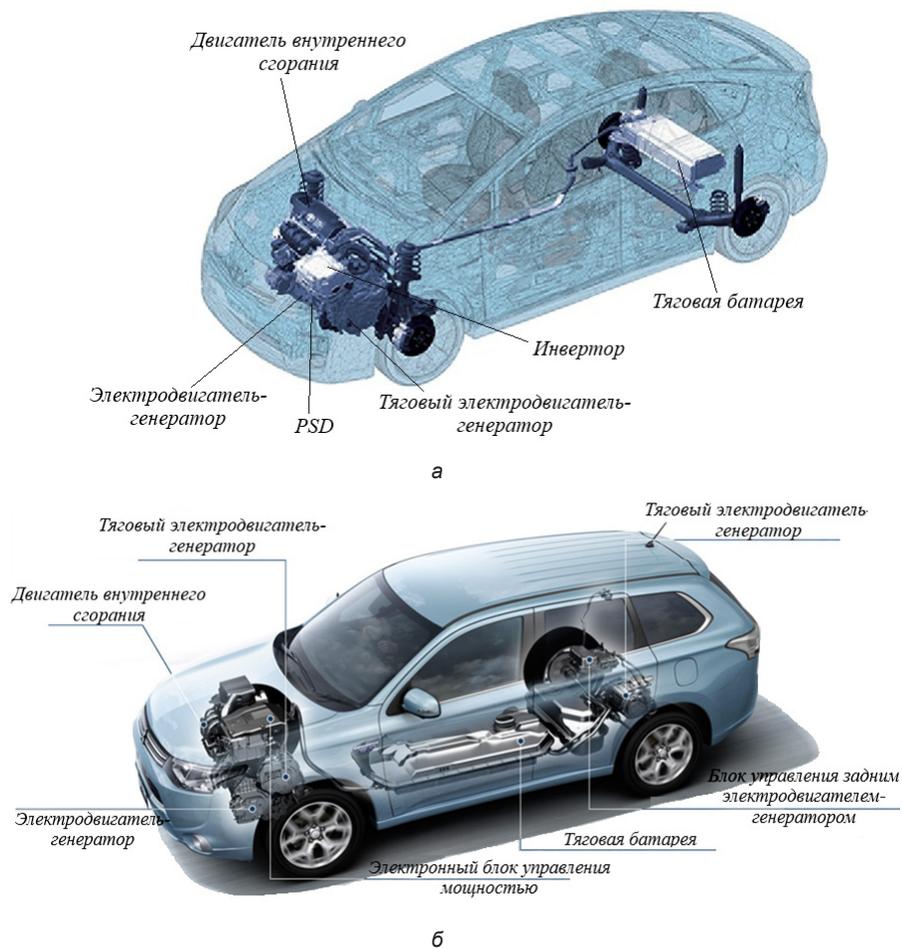


Рисунок 1 – Внешний вид гибридных колесных транспортных средств:
 а – гибридный автомобиль Toyota Prius NHW20;
 б – гибридный автомобиль Mitsubishi Outlander PHEV
 Источник: из открытых интернет-ресурсов.

Figure 1 – Exterior design of hybrid wheeled vehicles:
 а – Toyota Prius NHW20 hybrid car;
 б – Mitsubishi Outlander PHEV hybrid car
 Source: from open Internet resources.

Также в соответствии с ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011⁷ и ГОСТ Р ЕН 1986-2-2011⁸ исследование технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ с классической компоновкой силового агрегата и трансмиссии (привод на переднюю или заднюю ось) вполне возможен на существующих стендах. Но при исследовании КТС с ЭСУ и ГСУ с полным приводом или с ЭГ на каждое ведущее колесо возникает проблема, связан-

ная с отсутствием методов и средств для измерения силы тяги индивидуально на каждом колесе. Немаловажным фактором является и то, что помимо измерения силы тяги на ведущих колёсах есть необходимость измерять тормозные силы, действующие на колёсах КТС, когда силовая установка функционирует в режиме рекуперации.

⁷ ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 1. Электромобили. М.: Стандартинформ, 2007. 23 с.

⁸ ГОСТ Р ЕН 1986-2-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 2. Гибридные транспортные средства. М.: Стандартинформ, 2007. 16 с.

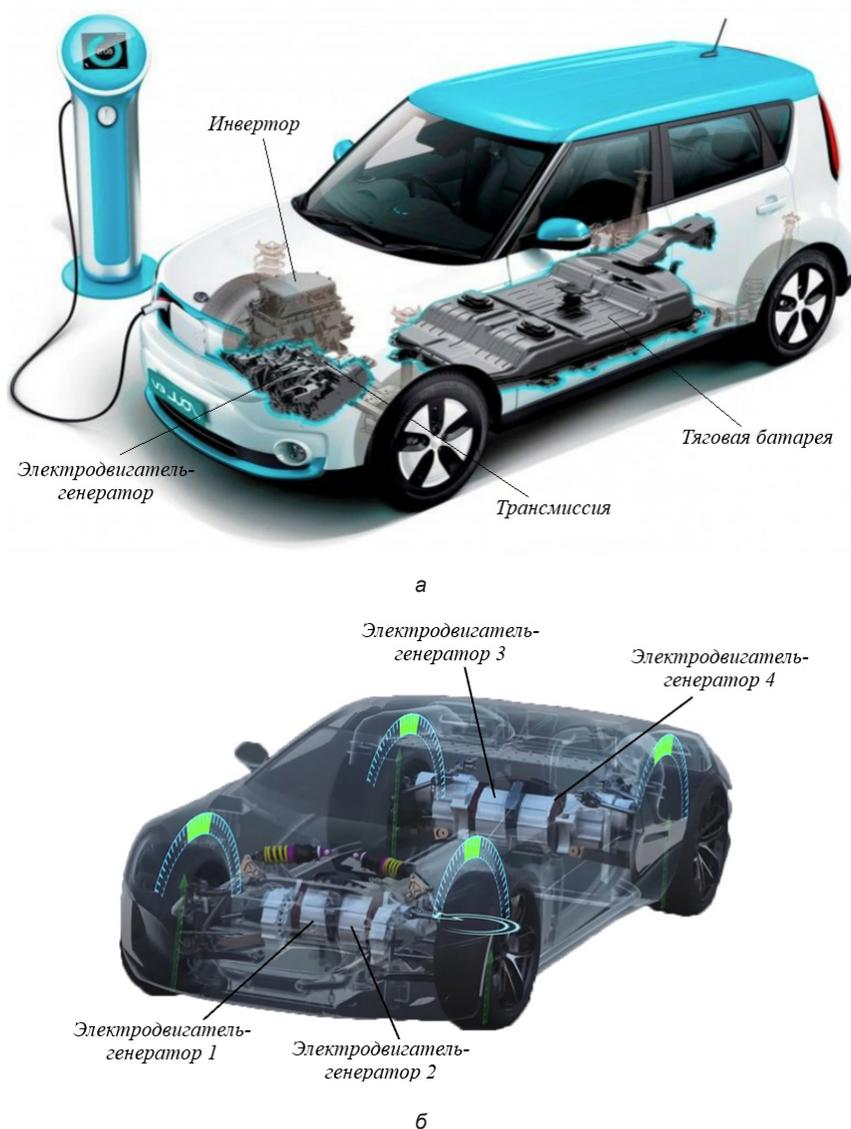


Рисунок 2 – Внешний вид современных электрических колесных транспортных средств:
 а – электромобиль Kia Soul EV; б – электромобиль Rimac Concept One
 Источник: из открытых интернет-ресурсов.

Figure 2 – Exterior design of modern electric wheeled vehicles:
 а – Kia Soul EV electric car
 б – Rimac Concept One electric car
 Source: from open Internet resources

Для реализации методик и тестовых режимов исследования эксплуатационных свойств КТС с ЭСУ и ГСУ в динамических и установленных режимах необходима разработка гибридных (инерционно-силовых) стендов. Такие стенды позволят воздействовать на КТС так, как оно функционирует в реальных условиях эксплуатации. Современное стендовое диагностическое оборудование такую возможность не обеспечивает.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Далеко не все стенды с беговыми барабанами и методы, ими реализуемые, четко отражают тяговые свойства автомобилей. Относительно корректные и информативные с диагностической точки зрения параметры дают силовые стенды. Они позволяют измерять силовые параметры: силу тяги, мощность на колёсах, силу и мощность, затрачиваемые на прокручивание трансмиссии.

Большинство современных силовых стендов (рисунок 3) состоят из блоков с беговыми барабанами 1 и 2. Опорные беговые барабаны 1 соединены между собой муфтами, а также с нагружающим устройством 5, как правило, представляющим собой электродинамический тормоз. Беговые барабаны 2 являются поддерживающими. Скорость колес автомобиля отслеживается датчиками 3. Сила, с которой электродинамический тормоз 5 стремится нагрузить трансмиссию КТС, определяется при помощи датчика 4.

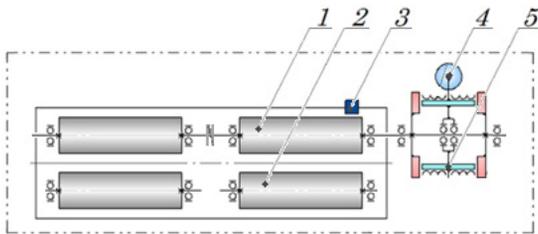


Рисунок 3 – Кинематическая схема силового стенда:
1 – опорный беговой барабан;
2 – поддерживающий беговой барабан;
3 – датчик скорости беговых барабанов;
4 – датчик силы;
5 – электродинамический тормоз
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Kinematic diagram of the power stand:
1 – supporting running drum;
2 – co-supporting running drum;
3 – speed sensor of running drums;
4 – force sensor; 5 – electrodynamic brake.
Source: compiled by the authors.

К сожалению, при исследовании функциональных свойств КТС с ЭСУ и ГСУ на стендах, реализующих силовой метод, имеется возможность определять их характеристики только в установившемся режиме, например, задавать движение с постоянной скоростью с заданной нагрузкой. Однако в реальных условиях функционирование КТС в большинстве случаев сопровождается динамическими режимами – разгон и выбег. Значительное количество неисправностей при функционировании КТС можно выявить именно в этих режимах. Поэтому для полного и информативного исследования технического состояния КТС на стендах с беговыми барабанами необходимо имитировать разгон и выбег автомобиля, причём с максимальным приближением кинетической энергии разгона в стендовых условиях к условиям дорожным. На силовых тяговых стендах это выполнить невозможно.

Инерционные стенды с беговыми барабанами реализуют динамические методы исследования эксплуатационных свойств КТС. Инер-

ционные стенды (рисунок 4) состоят из блоков с опорными 4 и поддерживающими беговыми барабанами 5. Каждый беговой барабан 4 соединён муфтой с редуктором 2, который, в свою очередь, имеет механическую связь с маховой массой 1, выполняющей функцию нагружающего устройства. Скорость колес автомобиля отслеживается датчиками 3.

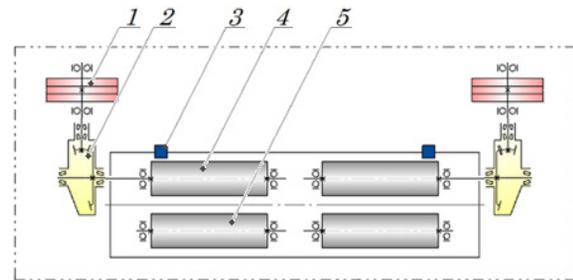


Рисунок 4 – Кинематическая схема инерционного стенда:

1 – маховая масса; 2 – редуктор; 3 – датчик скорости;
4 – опорный беговой барабан;
5 – поддерживающий беговой барабан
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Kinematic diagram of the inertial stand:
1 – flywheel mass; 2 – gearbox; 3 – speed sensor;
4 – supporting running drum;
5 – co-supporting running drum
Source: compiled by the authors.

В отличие от силовых инерционные стенды позволяют измерять только временные и кинематические параметры, к которым относят: время и путь разгона, а также время и путь выбега. Анализ конструкций стендов тяговых качеств показывает, что существуют ещё и инерционно-силовые стенды, реализующие силовой и инерционный методы задания тестовых режимов, за счёт добавления в конструкцию стенда электродинамического тормоза. Измерения силовых параметров на них производится датчиком силы, установленным на балансирном тормозе, аналогично рисунку 3.

Измеряемые на инерционных стендах кинематические и временные параметры крайне нестабильны, малоинформативны и требуют большого количества измерений. Но при этом динамические методы, реализуемые этими стендами, имитируют очень важные с точки зрения исследования технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ режимы разгона и выбега. Однако для определения тяговых качеств таких автомобилей необходима зависимость силы тяги на их ведущих колесах от скорости. Следовательно, для качественного анализа тяговых свойств КТС необходимо выполнять

контроль их функционирования как в установившихся, так и в динамических режимах. Сказанное подразумевает индивидуальное применение названных режимов и их разумное совмещение.

Анализ существующих методов и кинематических схем, реализующих их стендов, показывает, что на сегодняшний день нет оборудования, позволяющего измерять силы тяги на каждом ведущем колесе КТС, и при этом обеспечивать применение силового и динамического методов как индивидуально, так и совместно. Ещё одним существенным недостатком является невозможность измерения разнонаправленных сил на колёсах КТС. Именно измерение тяговых сил в динамических и установившихся режимах, например, при разгоне КТС, и тормозных сил в режиме рекуперации энергии, позволит наиболее качественно оценить их эксплуатационные свойства.

Таким образом, актуальным становится разработка гибридных, совмещающих в себе достоинства как инерционных, так и силовых стендов, реализующих названные методы и тестовые режимы. Стенды именно такой конструкции позволяют нагружать КТС так, как они функционируют в реальных условиях эксплуатации. Очень важно при этом измерять, прежде всего, силовые параметры, которые являются более информативными и стабильными, чем время и кинематические параметры – путь и скорость.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью решения изложенной проблемы был разработан исследовательский стендовый комплекс, состоящий из гибридного полноопорного стенда с измерительными и управляющими системами, являющийся хорошей альтернативой существующим инерционным и силовым стендам, поскольку он реализует силовые и динамические методы и тестовые режимы. Структурная схема стенда представлена на рисунке 5. Стенд состоит из двух блоков беговых барабанов: переднего и заднего. Передний блок выполнен как единое целое с рамой стенда, которая расположена по всей длине стенда. Задний блок стенда установлен

на полозьях рамы и имеет возможность перемещения вдоль этих полозьев, что позволяет изменять расстояние между блоками беговых барабанов, настраивая стенд для колёсной базы испытуемого КТС. Конструктивно оба блока беговых барабанов идентичны полностью. Каждый блок состоит из двух пар беговых барабанов: задних 3 и передних 5. Скорости беговых барабанов измеряются датчиком 7. Оба беговых барабана 3 и 5 кинематически соединены между собой цепной передачей 13 и симметричным дифференциалом 12 или обгонной муфтой⁹, которые предназначены для компенсации паразитной циркулирующей мощности в замкнутом контуре «Шина – Барабан – Цепная передача – Барабан – Шина» [9, 10, 11]. Между беговыми барабанами 3 и 5 размещён ролик следящей системы 4, соприкасающийся с беговой дорожкой шины. Скорость ролика следящей системы определяется датчиком 14. На выходном валу беговых барабанов размещён датчик силы 11.

Чтобы уменьшить влияние радиальных сил на работу датчика 11, выходной вал, идущий от беговых барабанов 3 и 5, соединяется с промежуточным валом через отдельный подшипниковый корпус. Промежуточный вал, в свою очередь, связан с трансмиссией стенда с помощью цепной передачи 10. Поток мощности, передающийся от беговых барабанов к трансмиссии стенда или наоборот, проходит через фрикционную муфту 9. Конструктивно муфта 9 объединена со звёздочкой привода маховой массы 8, которые работают как аккумуляторы энергии, поступающей от ведущих колёс КТС во время имитации режима разгона. А при задании режима выбега эта энергия возвращается обратно к колёсам КТС. Каждая пара беговых барабанов на стенде механически устроена аналогично.

Механическое соединение пары беговых барабанов в каждом блоке стенда осуществляется при помощи карданных передач 6 и редукторов 1. Механическое соединение редукторов блоков беговых барабанов реализовано карданной передачей 2. При этом поток мощности передаётся между блоками стенда через электродинамический тормоз 15. Тормоз 15 выполняет функции нагружающего силово-

⁹ Патент на полезную модель № 213401 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13, G01M 17/007. Стенд контроля технического состояния колесных транспортных средств с обгонной муфтой: № 2022106787: заявл. 16.03.2022; опубл. 09.09.2022 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, М.В. Холманских, А.С. Чернышков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

го устройства, обеспечивающего проведение исследований с дополнительной нагрузкой в установившихся режимах. Для контроля процесса функционирования тормоза 15 используются датчик силы торможения 16 и датчик

частоты вращения ротора 17. Таким образом, механическое соединение всех беговых барабанов позволяет автомобилю на стенде функционировать так же, как в реальных дорожных условиях.

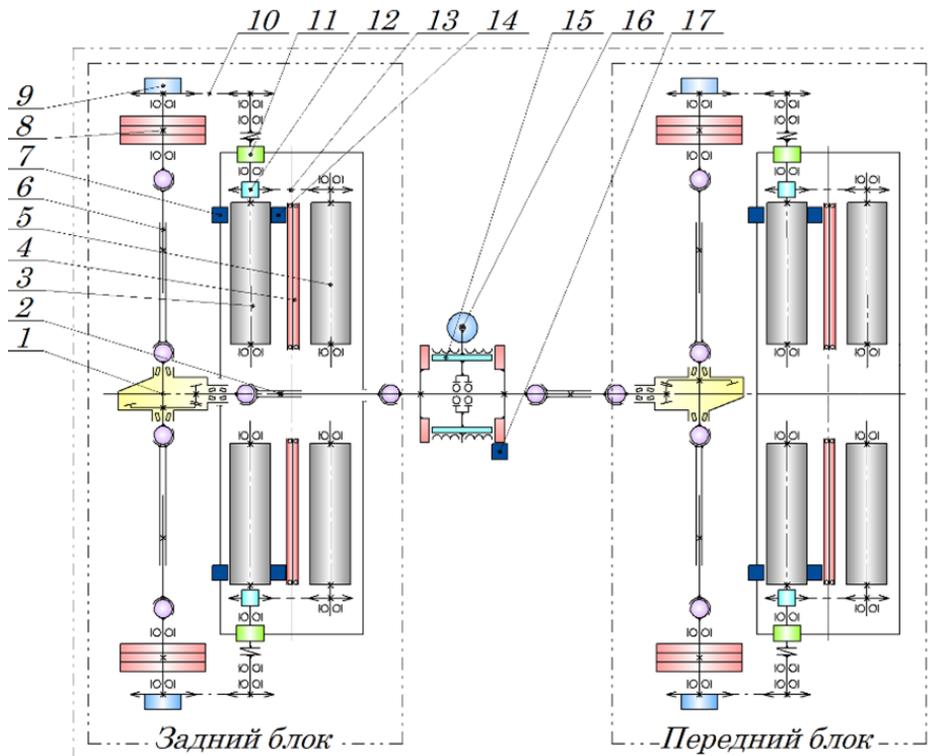


Рисунок 5 – Структурная схема исследовательского стендового комплекса ИРНТУ10:

- 1 – редуктор блока беговых барабанов; 2 – карданная передача привода электродинамического тормоза;
 3 – задний беговой барабан; 4 – ролик следящей системы;
 5 – передний беговой барабан; 6 – карданная передача привода пары беговых барабанов;
 7 – датчик скорости беговых барабанов; 8 – маховая масса; 9 – фрикционная муфта;
 10 – цепная передача привода маховых масс; 11 – датчик силы; 12 – симметричный дифференциал;
 13 – цепная передача привода переднего бегового барабана; 14 – датчик скорости ролика следящей системы;
 15 – электродинамический тормоз; 16 – датчик силы торможения электродинамического тормоза;
 17 – датчик скорости ротора электродинамического тормоза

Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Structural diagram of the research stand complex developed by Irkutsk National Research Technical University:

- 1 – gearbox of the running drum block; 2 – gimbal transmission of the electrodynamic brake drive;
 3 – rear treadmill drum; 4 – roller of the tracking system; 5 – front treadmill drum;
 6 – gimbal drive of a pair of running drums; 7 – speed sensor of running drums;
 8 – flywheel mass; 9 – friction clutch; 10 – chain transmission of the flywheel drive mass;
 11 – force sensor; 12 – symmetrical differential; 13 – chain transmission of the front running drum drive;
 14 – roller speed sensor of the tracking system; 15 – electrodynamic brake;
 16 – braking force sensor of the electrodynamic brake; 17 – rotor speed sensor of the electrodynamic brake

Source: compiled by the authors.

¹⁰ Патент на полезную модель № 199093 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный универсальный полноопорный стенд для контроля технического состояния колесных транспортных средств: № 2020111732: заявл. 23.03.2020; опубл. 13.08.2020 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНТУ»). EDN QULBNR.

Датчик силы, действующей на беговых барабанах, представляет собой цилиндрический корпус 5 с концентрично размещёнными внутри катушками 3 и 4, соединение которых образует две измерительные обмотки и одну обмотку возбуждения (рисунок 6)^{11,12}. Между валом 2 и сердечниками катушек 3 и 4 присутствует постоянный зазор. Корпус 5 датчика установлен на подшипниках 6. Вместе с корпусом 5 и валом 2 сердечники 3 и 4 обмоток образуют магнитную систему, проницаемость которой зависит от механических напряжений в чувствительном элементе датчика – вала 2. Поскольку на беговой барабан 1 могут действовать разнонаправленные силы, то вал 2 будет нагружен разнонаправленным моментом, и, соответственно, испытывать разнонаправленные механические напряжения.

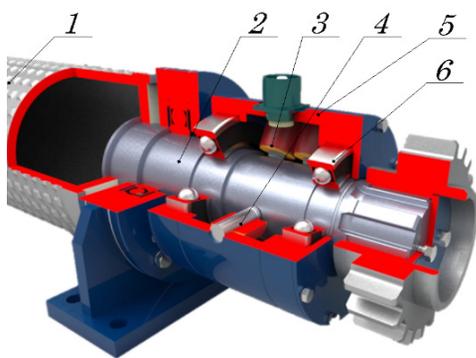


Рисунок 6 – Конструкция бесконтактного магнитоупругого датчика силы на беговом барабане:
 1 – беговой барабан; 2 – приводной вал;
 3 – катушка измерительной обмотки;
 4 – катушка обмотки возбуждения;
 5 – корпус; 6 – подшипники
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Design of a non-contact magneto-elastic force sensor on a running drum:
 1 – running drum; 2 – drive shaft; 3 – measuring winding coil;
 4 – excitation winding coil; 5 – body; 6 – bearings.
 Source: compiled by the authors.

На рисунке 7 представлен внешний вид КТС *Kia Soul EV*, установленного на исследовательский стендовый комплекс ИРННТУ.



Рисунок 7 – Автомобиль *Kia Soul EV* на исследовательском стендовом комплексе ИРННТУ^{13,14} [12]
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – *Kia Soul EV* car at the research stand complex developed by Irkutsk National Research Technical University [12]
 Source: compiled by the authors.

Процесс функционирования КТС *Kia Soul EV* в режимах разгона установившегося движения и выбега в ходе экспериментального исследования с нагрузкой 310 Н (что соответствует имитации движения с постоянной скоростью в гору, с подъёмом 5% (углом 2°52') показан в виде зависимости сил на ведущих колёсах и скорости на рисунке 8. График разделен на три участка, соответствующих имитируемым режимам: разгон, установившееся движение и выбег с рекуперативным торможением.

¹¹ Патент на полезную модель № 198516 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/28. бесконтактный измеритель для силового тормозного роликового стенда: № 2020113148: заявл. 26.03.2020; опубл. 14.07.2020 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Фритрейн». EDN REWMZI.

¹² Яньков О.С., Чернышков А.С. Совершенствование конструкции силоизмерительного магнестрикционного датчика тормозного стенда // Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация: II Всероссийская научно-практическая конференция, Чита, 30–31 октября 2018 года. Чита: Забайкальский государственный университет, 2018. С. 53–59. EDN ZCQRCP.

¹³ Патент № 2823398 С1 Российская Федерация, МПК G01M 17/007, G01L 5/13. Способ контроля технического состояния колесных транспортных средств с гибридной, электрической силовой установкой на стендах с опорными роликами в условиях эксплуатации и устройство для его осуществления: № 2023128983: заявл. 09.11.2023; опубл. 23.07.2024 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков, П.А. Кисилев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». EDN XCYAER.

¹⁴ Чернышков А.С. Контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами: дис. ... канд. техн. наук: 2.9.5. Иркутск, 2024.

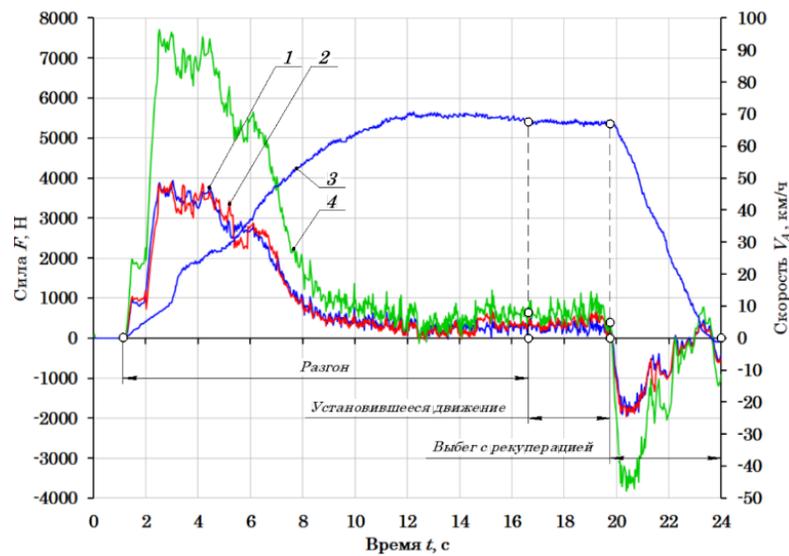


Рисунок 8 – Зависимости сил на ведущих колёсах и скорости в процессе имитации разгона, установившегося движения и выбега КТС KIA Soul EV от времени :
 1 – сила на переднем левом колесе; 2 – сила на переднем правом колесе;
 3 – скорость; 4 – силы ведущих колёсах
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dependences of forces on the driving wheels and speed in the process of simulating acceleration, steady motion and run-out of the wheeled vehicle KIA Soul EV on time t:
 1 – force on the front left wheel; 2 – force on the front right wheel;
 3 – speed; 4 – forces of driving wheels.
 Source: compiled by the authors

Участок разгона характеризуется увеличением скорости и сил тяги на ведущих колёсах КТС. Перепады в максимальных значениях сил тяги обусловлены возникновением в трансмиссии стенда и КТС крутильных колебаний в виду резкого увеличения крутящего момента ЭСУ. С последующим разгоном крутящий момент ЭСУ уменьшается из-за увеличения частоты вращения ротора ЭГ. На протяжении всего режима установившегося движения параметры и оставались практически неизменными. В результате уменьшения уровня активации органа управления силовой установкой исследуемый процесс переходит в режим выбега с рекуперативным торможением, о чём свидетельствует изменение знака сил на колёсах КТС.

На рисунке 9 показан внешний вид КТС Toyota Prius NHW20, установленного на исследовательский стендовый комплекс ИРННТУ.



Рисунок 9 – Автомобиль Toyota Prius NHW20 на исследовательском стендовом комплексе ИРННТУ¹⁵ [13,14]
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Toyota Prius NHW20 car at the research stand complex developed by Irkutsk National Research Technical University [13,14]
 Source: compiled by the authors.

¹⁵ Патент № 2823398 С1 Российская Федерация, МПК G01M 17/007, G01L 5/13. Способ контроля технического состояния колесных транспортных средств с гибридной, электрической силовой установкой на стендах с опорными роликами в условиях эксплуатации и устройство для его осуществления: № 2023128983: заявл. 09.11.2023; опублик. 23.07.2024 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков, П.А. Кисилев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». EDN XCYAER.

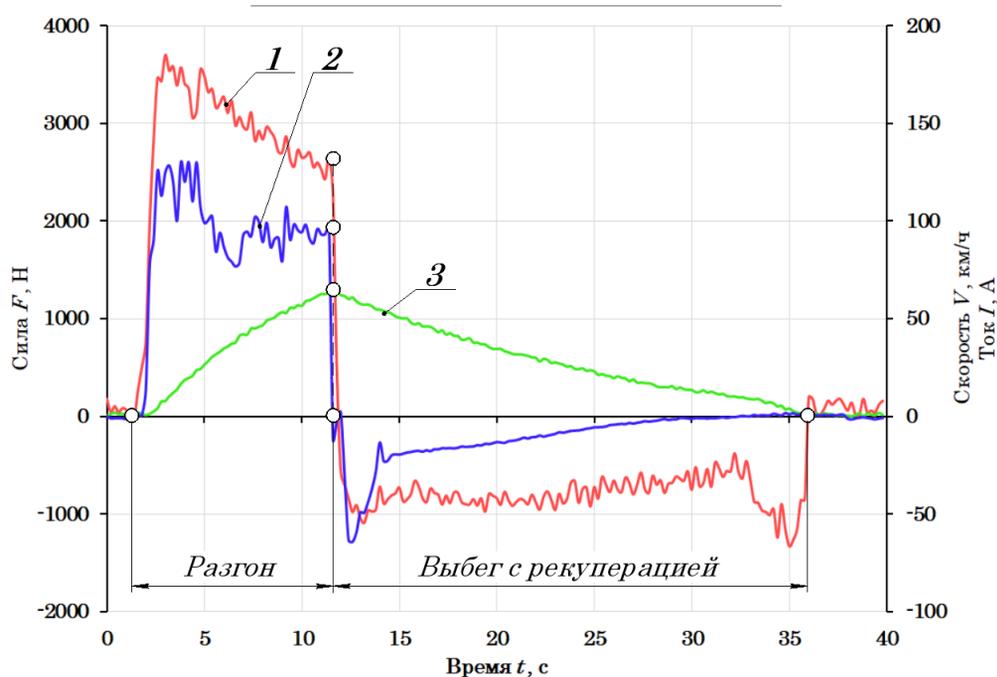


Рисунок 10 – Зависимости сил на ведущих колёсах, скорости и тока, поступающего на инвертор от ВВБ в процессе имитации разгона и выбега с рекуперацией КТС Toyota Prius HW20 от времени:
 1 – сила на ведущем колесе;
 2 – сила тока; 3 – скорость
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Dependences of the forces on the driving wheels, the speed and the current, supplied to the inverter from the high-voltage battery in the process of simulating acceleration and run-out with the recovery of the wheeled vehicle Toyota Prius HW20 CCC on time t :
 1 – the force on the driving wheel;
 2 – the current; 3 – the speed .
 Source: compiled by the authors

Процесс разгона и выбега КТС Toyota Prius NHW20 в результате экспериментального исследования без нагрузки показан на рисунке 10 в виде зависимостей силы на ведущем колесе, скорости КТС и тока, поступающего на инвертор от высоковольтной батареи. График разделён на два участка, соответствующих имитируемым режимам: разгон и выбег с рекуперативным торможением. Участок разгона характеризуется увеличением скорости и силы тяги на ведущем колесе КТС, а также тока. Неравномерность сил тяги обусловлена динамическими процессами в трансмиссии стэнда и КТС в виду резкого увеличения крутящих моментов ДВС, ЭГ-1 и ЭГ-2 ГСУ, о чём свидетельствует значительное увеличение тока, поступающего на инвертор от высоковольтной батареи. С последующим разгоном

значение тока уменьшается. Кривая тока, поступающего на инвертор, отражает потребление энергии ГСУ на разгон ведущих колёс КТС. В результате уменьшения уровня активации органа управления силовой установкой исследуемый процесс переходит в режим выбега с рекуперативным торможением, о чём свидетельствует изменение знака сил на колёсах КТС, а также тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты экспериментальных исследований рабочих процессов КТС с ЭСУ и ГСУ показывают, что использование гибридных (инерционно-силовых) стэндов с беговыми барабанами позволяет реализовывать высокоинформативные и стабильные тестовые режимы функционирования КТС в

процессе исследования их эксплуатационных свойств. Гибридные стенды в составе исследовательских комплексов позволят выполнять контроль технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ с применением как установившихся, так и динамических методов с измерением при этом силовых и кинематических параметров на каждом ведущем колесе как в режимах разгона и установившегося движения, так и в режиме выбега.

Такой подход открывает возможность для:

- обеспечения контроля технического состояния ЭСУ и ГСУ и трансмиссии КТС;
- разработки методологии проектирования стендов, реализующих принцип обратимости движения, а также исследований КТС и их компонентов на стендах с беговыми барабанами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Заватский А.М., Харитонов С.А. Развитие алгоритмов активного распределения момента по осям легкового автомобиля // Труды НАМИ. 2017. № 2 (269). С. 37–44.
2. Малышев А.Н., Груненков Е.А., Дебелов В.В. [и др.]. Имитационное моделирование системы контроля изоляции высоковольтной электросети транспортного средства с гибридной силовой установкой // Известия МГТУ МАМИ. 2021. Т. 15, № 2. С. 36–50. DOI 10.31992/2074-0530-2021-48-2-36-50. EDN KHVGZK.
3. Yin D., S. Oh & Y. Hori, Y. "A novel traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. 56(6). pp. 2086–2094.
4. Kataoka H., Sado H., Sakai & Y. Hori I., "Optimal slip ratio estimator for traction control system of electric vehicle based on fuzzy inference". *Electrical Engineering in Japan*. 2001. 135(3). pp. 56–63.
5. Jason J. Poon, Michel A. Kinsy, Nathan A. Pallo, Srinivas Devadas, Ivan L. Celanovic. *Hardware-in-the-Loop Testing for Electric Vehicle Drive Applications*. 2012.
6. Lin C., Xu, Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization. *Energies*. 2015. 8 (5). pp. 3815–3831.
7. Sakai, S.-I., Sado, H., Hori, Y. Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 1999. 4 (1). pp. 9–16.
8. Hori Y., Future vehicle driven by electricity and control-research on fourwheel-motored UOT Electric March II". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004. 51(5). pp. 954–962.
9. Камнев А.В., Федотов А.И., Яньков О.С. Влияние давления воздуха в шинах на силовые потери при качении колес автомобиля по опорным роликам стенда // Автомобильная промышленность. 2022. № 10. С. 28–32. EDN MHPYZE.

10. Федотов А.И., Власов В.Г., Яньков О.С., Камнев А.В. Расчет силы сопротивления качению эластичной шины по цилиндрическому поверхностям беговых барабанов стенда // Автомобильная промышленность. 2022. № 11. С. 26–31. EDN LEQOJB.

11. Федотов А.И., Власов В.Г., Яньков О.С. Математическая модель для расчета нормальных и продольных касательных реакций в пятне контакта шины автомобильного колеса с поверхностями опорных роликов диагностического стенда // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 3(122). С. 193–203. DOI 10.21285/1814-3520-2017-3-193-203. EDN YHPRAV.

12. Чернышков А.С., Федотов А.И., Яньков О.С. О функциональной диагностике автомобилей с электрической силовой установкой // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 3. С. 203–223. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-203-223>

13. Киселёв П.А., Федотов А.И., Яньков О.С., Лобов Н.В. Обоснование динамических тестовых режимов функционирования транспортного средства с гибридной силовой установкой // Грузовик. 2024. № 7. С. 27–37. DOI 10.36652/1684-1298-2024-7-27-37. EDN DMQJQJ.

14. Федотов А.И., Яньков О.С., Киселёв П.А., Ухватов Д.О. О диагностике автомобильных гибридных силовых установок на стендах с беговыми барабанами // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 1. С. 42–61. DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-42-61. EDN OUDNVJ.

REFERENCES

1. Zavatskiy A.M., Kharitonov S.A. Development of algorithms for active torque distribution along the vehicle axes. *Trudy NAMI*. 2017; (2): 37–47. (In Russ.)
2. Malyshev A.N., Grunenkov YE.A., Debelov V.V., Mizin M.D., Kozlovskiy V.N. Simulation of the insulation monitoring system of the high-voltage electrical network of a vehicle with a hybrid power plant. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2021; 2(48): 36–50 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-36-50
3. Yin D., S. Oh & Y. Hori, Y. A novel traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009; 56(6): 2086–2094.
4. Kataoka H., Sado H., Sakai & Y. Hori I., Optimal slip ratio estimator for traction control system of electric vehicle based on fuzzy inference. *Electrical Engineering in Japan*. 2001; 135(3): 56–63.
5. Jason J. Poon, Michel A. Kinsy, Nathan A. Pallo, Srinivas Devadas, Ivan L. Celanovic. *Hardware-in-the-Loop Testing for Electric Vehicle Drive Applications*. 2012.
6. Lin C., Xu Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization. *Energies*. 2015; 8 (5): 3815–3831.
7. Sakai S.-I., Sado H., Hori Y. Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 1999; 4 (1): 9–16.

8. Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control-research on fourwheel-motored UOT Electric March II. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004; 51(5): 954–962. 2004.

9. Kamnev A.V., Fedotov A.I., Yankov O.S. The effect of tire air pressure on power losses when the car wheels are rolling on the support rollers of the stand. *Automotive industry*. 2022; 10: 28–32. EDN MHPYZE. (in Russ.)

10. Fedotov A.I., Vlasov V.G., Yankov O.S., Kamnev A.V. Calculation of the rolling resistance force of an elastic tire on the cylindrical surfaces of the running drums of the stand. *Automotive industry*. 2022; 11: 26–31. EDN LEQOJB. (in Russ.)

11. Fedotov A.I., Vlasov V.G., Yankov O.S. A mathematical model to calculate normal and longitudinal tangential reactions in the vehicle wheel tire contact patch with chassis dynamometer bearing roller surfaces. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017; vol. 21, no. 3: 193–203. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-3-193-203.

12. Chernyshkov A.S., Fedotov A.I., Yan'kov O.S. About Functional Diagnostics of Cars with an Electric Power Plant. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; vol. 13, no. 3: 203–223. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-3-203-223. (in Russ.)

13. Kiselev P.A., Fedotov A.I., Yankov O.S., Lobov N.V. Justification of dynamic test modes of operation of a vehicle with a hybrid power plant. *Truck*. 2024; 7: 27–37. DOI 10.36652/1684-1298-2024-7-27-37. EDN DMQTJQ. (in Russ.)

14. Fedotov A.I., Yankov O.S., Kiselev P.A., Ukhvatov D.O. About Diagnostics of Automotive Hybrid Power Plants on Stands with Running Drums. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; Vol. 13, No. 1: 42–61. DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-42-61. EDN OUDNVJ. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Киселёв П.А. Оформление и описание рисунков, подготовка текста статьи, выполнение экспериментальных, а также аналитических исследований.

Яньков О.С. Общая организация работы. Разработка методик экспериментальных исследований, подготовка текста статьи.

Федотов А.И. Научный руководитель, консультант, подготовка текста статьи.

Кривцов С.Н. Консультант, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kiselyov P.A. Design of drawings and their description, preparation of the article text, experimental and analytical research.

Yan'kov O.S. General organization of work, development of experimental research methods, text writing.

Fedotov A.I. Scientific supervising, consulting, work with the text material.

Krivtsov S.N. Consulting and monitoring, manuscript preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселёв Павел Алексеевич – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1515-8973>,

SPIN-код: 4216-7292,

e-mail: pavel.kiselev.97.97@mail.ru

Яньков Олег Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6709-4820>,

SPIN-код: 3127-7106,

Scopus Author ID: 57212165852,

Researcher ID: AAG-5898-2022,

e-mail: yos913005@mail.ru

Федотов Александр Иванович – заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8329-6785>,

SPIN-код: 1342-4073,

Scopus Author ID: 56341065000,

Researcher ID: AAZ-7059-2021,

e-mail: fai.abs@yandex.ru

Кривцов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>,

SPIN-код: 9278-4018,

Scopus Author ID: 57191268232,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kiselyov Pavel A.I. – postgraduate student of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1515-8973>,

SPIN-code: 4216-7292,

e-mail: pavel.kiselev.97.97@mail.ru.

Yan'kov Oleg S. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6709-4820>,

SPIN-code: 3127-7106,

Scopus Author ID: 57212165852,

Researcher ID: AAG-5898-2022,

e-mail: yos913005@mail.ru

Fedotov Alexander Ivanovich – Honored Scientist of the Russian Federation, Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8329-6785>,

SPIN-code: 1342-4073,

Scopus Author ID: 56341065000,

Researcher ID: AAZ-7059-2021,

e-mail: fai.abs@yandex.ru

Krivtsov Sergey Nikolaevich – Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str. Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>,

SPIN-code: 9278-4018,

Scopus Author ID: 57191268232,

e-mail: krivcov_serger@mail.ru