

Научная статья
УДК 629.113
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>
EDN: CMUWCB



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДКЛЮЧАЕМОГО ПОЛНОГО ПРИВОДА КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА СТЕНДАХ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ

А.И. Федотов, О.С. Яньков, Д.О. Ухватов ✉
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
✉ ответственный автор
dim.ia@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные колёсные транспортные средства оснащаются системами управления подключаемым полным приводом, увеличивающими их проходимость, устойчивость и управляемость. Ярким примером является система AWD (All-wheel drive), применение которой позволяет получить наибольшую эффективность подключаемого привода по сравнению с постоянным полным приводом. Для обеспечения и поддержания эффективности и безопасности транспортных средств с системами управления подключаемым полным приводом необходимо проведение исследования процесса функционирования этих систем, причём как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. Наибольшее распространение получили дорожные методы испытаний рассматриваемых систем, которые не всегда реализуемы в условиях предприятий, осуществляющих производство, испытания и экспертизу транспортных средств, а также на станциях технического обслуживания, сервисных центрах и других организациях автомобильной отрасли.

Материалы и методы. Для выполнения аналитических исследований использовался разработанный комплекс математических моделей, содержащих модели подсистем «Транспортное средство» и «Стенд». Описание моделей выполнено в программном комплексе «Универсальный механизм – 9». Проведение экспериментальных исследований процесса функционирования автомобиля с автоматизированной системой AWD выполнялось на полноопорном multifunctionальном стенде с беговыми барабанами ИРНИТУ. В качестве объекта исследований использовался автомобиль Volvo S60 2.5T AWD с муфтой Haldex II поколения.

Результаты исследования и их анализ. В ходе аналитических и экспериментальных исследований получены результаты процесса функционирования транспортного средства при имитации его разгона с буксованием ведущих колёс как передней, так и задней оси: силы тяги на ведущих колёсах и скорости колёс.

Заключение. Полученные результаты аналитических исследований и их соответствие с результатами экспериментов показывают возможность проведения качественных и количественных исследований автомобилей с системами управления подключаемым полным приводом на стендах с беговыми барабанами. Использование комплекса математических моделей позволит в дальнейшем разрабатывать уникальные стендовые методы и реализующее эти методы оборудование для выполнения исследования эксплуатационных свойств современных транспортных средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы управления подключаемым полным приводом, AWD, стенд с беговыми барабанами, математическая модель, муфта Haldex, исследование эксплуатационных свойств автомобиля

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редактору и рецензентам данной статьи, а также ООО «Вычислительная механика» за предоставление лицензии на ПК «Универсальный механизм – 9».

Статья поступила в редакцию 01.09.2024; одобрена после рецензирования 04.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.

© Федотов А.И., Яньков О.С., Ухватов Д.О., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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: Федотов А.И., Янков О.С., Ухватов Д.О. Исследование процесса функционирования системы управления подключаемого полного привода колёсных транспортных средств на стендах с беговыми барабанами // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 736-754. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>

EDN: CMUWCB

INVESTIGATION OF CONTROL SYSTEM OPERATION IN PLUG-IN FOUR-WHEEL DRIVE OF WHEELED VEHICLES ON ROLLER TEST BENCHES

Alexander I. Fedotov, Oleg S. Yankov, Dmitrii O. Ukhvatov ✉

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

✉ corresponding author
dim.ia@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern wheeled vehicles are equipped with plug-in all-wheel drive control systems that increase their trafficability, stability and controllability. A good example is the AWD (All-wheel drive) system, which provides the highest efficiency of a plug-in drive compared to a permanent all-wheel drive. In order to ensure and maintain the efficiency and safety of vehicles with plug-in all-wheel drive control systems, it is necessary to investigate their functioning during manufacture and operation stages. Road testing methods are the most widespread methods for testing the systems under consideration. However they are not always feasible in the conditions of enterprises which provide testing and examination of vehicles, as well as in the conditions of service stations, service centers and other organizations of the automotive industry.

Materials and methods. For the purpose of analytical research, a developed set of mathematical models containing the "Vehicles" and the "Stand" subsystems models was used. The description of the models is completed with the software package "Universal mechanism-9". Experimental studies of operation of the vehicle with an automated AWD system were carried out on a full-support multifunctional stand with IRNIT running drums. The Volvo S60 25T AWD automobile with Haldex clutch of II generation was used as a research object.

Results and discussion. In the course of analytical and experimental studies, the results of investigating vehicle operation were obtained by simulating acceleration with the slipping of the driving wheels of both the front and rear axles: the traction force on the driving wheels and the wheel speed.

Conclusion. The results of this analytical research and their correspondence to the results of experimental study show the possibility of conducting qualitative and quantitative testing of automobiles with plug-in all-wheel drive control systems on roller test benches. The use of a complex of mathematical models will further allow for the development of unique bench methods and equipment to carry out research on the operational properties of modern vehicles.

KEYWORDS: control systems for plug-in all-wheel drive, AWD, stand with running drums, mathematical model, Haldex coupling, study of the operational properties of vehicles

ACKNOWLEDGEMENTS: the authors express their gratitude to the editor and reviewers of this article, as well as to Computational Mechanics LLC for granting a license for the Universal Mechanism-9 software.

The article was submitted 01.09.2024; approved after reviewing 04.10.2024; accepted for publication 17.10.2024.

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.

© Fedotov A.I., Yankov O.S., Ukhvatov D.O., 2024



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

For citation: Fedotov A.I., Yankov O.S., Ukhvatov D.O. Investigation of control system operation in plug-in four-wheel drive of wheeled vehicles on roller test benches. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 736-754. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное улучшение эксплуатационных свойств колесных транспортных средств (КТС) приводит к значительному усложнению их конструкции. В современных КТС повсеместно применяются автоматизированные системы, обеспечивающие высокие тяговые, динамические качества, устойчивость, управляемость, безопасность, экономичность и экологичность. Одной из таких систем является система управления трансмиссией КТС с подключаемым полным приводом, ярким примером которой является система AWD (All-wheel drive), позволяющая использовать полный привод с наибольшей эффективностью, чем в трансмиссиях с постоянным полным приводом, увеличивая проходимость КТС. Кроме этого, автоматизированное управление полным приводом позволяет достичь большей устойчивости и управляемости КТС при прохождении поворотов, особенно на дорогах с низким коэффициентом сцепления, что повышает уровень безопасности автомобиля. На рисунке 1 показана структурная схема систем

управления подключаемым полным приводом легковых КТС.

Широкое распространение получили обеспечивающие управление подключаемым приводом электронные системы, которые имеют общее название *On-demand* (дословный перевод – *включаемый по требованию*). Чаще всего работа такого привода основана на управляемых электроникой многодисковых фрикционных муфтах, в заданный момент подключающих привод колес ведомой оси к приводу колес оси ведущей. Одной из наиболее распространённых конструкций муфт является муфта *Haldex*.

Несмотря на высокую надежность как системы в целом, так и муфты в частности, после определенного пробега КТС начинают появляться различные её неисправности. Анализ данных по неисправностям муфты *Haldex II* поколения, полученный авторами статьи по результатам опроса сервисных и дилерских центров, а также станций технического обслуживания г. Иркутска и Иркутской области в период с 2021 по 2024 г., представлен на рисунке 2.

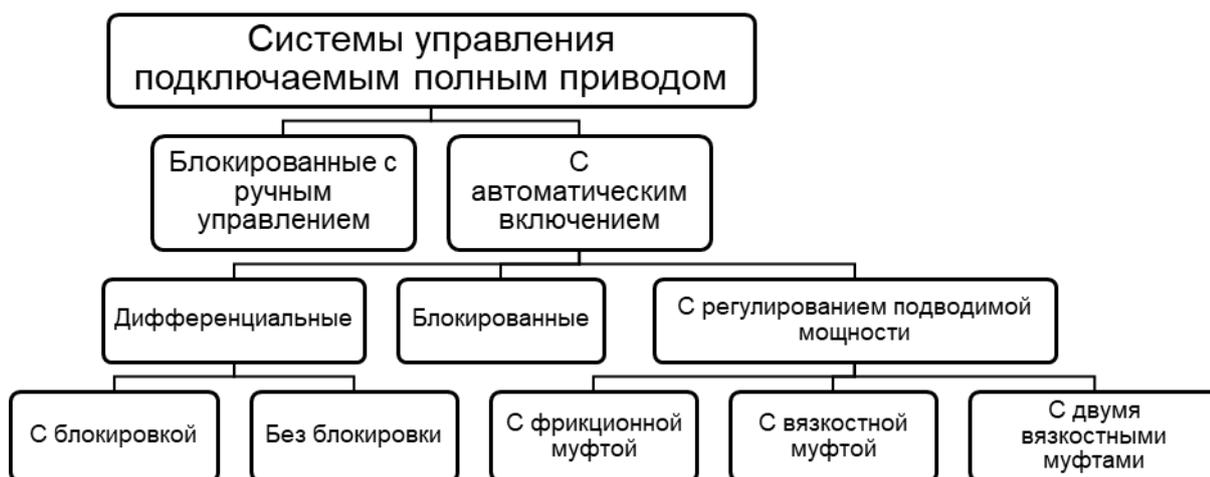


Рисунок 1 – Структура систем управления подключаемым полным приводом легковых КТС
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The structure of control systems for plug-in all-wheel drive passenger vehicles
Source: compiled by the authors.

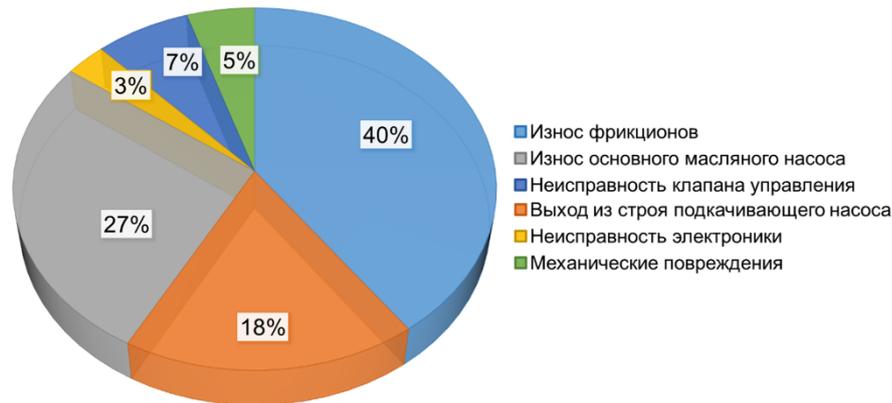


Рисунок 2 – Неисправности системы AWD с муфтой HALDEX II
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Malfunctions of the AWD system with the HALDEX II coupling
Source: compiled by the authors.

Для обеспечения и поддержания эффективности и безопасности КТС с системами управления подключаемым полным приводом необходимо провести исследование процесса функционирования этих систем, причём на всех этапах их жизненного цикла как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации.

Большинство экспериментальных исследований КТС с системами управления подключаемым полным приводом основаны на дорожных методах оценки их движения, и, как правило, выполняются при сертификационных испытаниях [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. В процессе таких исследований определяют вид поворачиваемости КТС и в большинстве случаев контролируют кинематические параметры движения КТС, а также углы их сноса и заноса. Анализ

методов экспериментальных исследований КТС с системами управления подключаемым полным приводом показывает, что они основаны на измерении скорости рыскания^{2,3} [8]; угла дрейфа⁴ [9, 10]; угловых скоростей колёс [11]; бокового ускорения и контроля параметров, характеризующих нахождение КТС в коридоре движения. В исследовании реализован метод определения устойчивости движения КТС по так называемому *фазовому плану*, т.е. зависимости скорости изменения угла дрейфа от величины этого угла. Определены условия и границы, которые разделяют движение КТС на устойчивое и неустойчивое. Отмечается техническая сложность реализации данного метода, поскольку измерение величины угла дрейфа датчиками КТС не производится⁵.

¹ Bucchi, F., Lenzo, B., Frenzo, F., Sorniotti, A., De Nijs, W., "The effect of the front-to-rear wheel torque distribution on vehicle handling: an experimental assessment," 25th International Symposium on dynamics of vehicles on roads and tracks (IAVSD), 2017.

² Авторское свидетельство № 1635143 А1 СССР, МПК G01P 3/64. Устройство для измерения скорости и угла рыскания транспортного средства: № 4442396: заявл. 17.06.1988: опубл. 15.03.1991 / Б.А. Бачурин, К.К. Ещин, В.И. Заровский, Н.Ф. Пантелеев; заявитель ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ ИМ.Ф.Э.ДЗЕРЖИНСКОГО. EDN ВАFAPE.

³ Gruber P.A Single Input Single Output Formulation for Yaw Rate and Sideslip Angle Control via Torque-Vectoring // Conference: AVEC 18 - 14th International Symposium on Advanced Vehicle Control, At: Beijing, China, July 2018.

⁴ Agliullin T., Ivanov V., Sliding Mode Methods in Electric Vehicle Stability Control November 2019 DOI: 10.1109/ICCVE45908.2019.8965171 Conference: 2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), DOI:10.13140/RG.2.2.21150.69444.

⁵ Яньков О.С. Математическая модель процесса функционирования колесного транспортного средства с системой подключаемого полного привода на стенде с беговыми барабанами / О.С. Яньков, Д.О. Ухватов, А.В. Куртова // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 116-й Международной научно-технической конференции, Улан-Удэ, 12–13 сентября 2023 года. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2023. С. 105–115. DOI 10.53980/9785907746091_105

В процессе исследований А.В. Антонян⁶ определял курсовую устойчивость КТС на основе измерения и соотношения переносных скоростей колёс передней и задней оси. Следует отметить недостатки данного метода.

Во-первых, автор использует в расчетах переносных скоростей колёс их свободный радиус r_0 , который не учитывает скоростные потери в шинах. Во-вторых, в процессе прохождения КТС поворотов с большим боковым ускорением его внутренние по радиусу поворота колёса разгружаются. Использование таких режимов, а также движение КТС по дорогам с низким коэффициентом сцепления, часто приводят к буксованию ведущих колёс. Всё это ведет к весьма некорректному определению курсовой устойчивости КТС. Метод определения поворачиваемости КТС в процессе движения приведен в стандарте ISO 8855:2011(en). Данный стандарт позволяет рассчитывать основной параметр U , который в полной мере характеризует поворачиваемость КТС.

Таким образом, в процессе дорожных испытаний КТС с системами управления подключаемым полным приводом, как правило, определяют кинематические параметры, характеризующие курсовую устойчивость, координаты движения центра масс, скорость продольного движения и рыскания, угол поворота рулевого колеса, а также параметры, характеризующие рабочий процесс системы. Стоит обратить внимание на существенный недостаток дорожных испытаний, заключающийся в том, что, во-первых, для выполнения такого рода исследований необходимо наличие испытательного полигона, специализированного оборудования и подготовленного персонала, способного выполнять такого рода испытания; во-вторых, проведение дорожных испытаний может быть затруднено из-за природно-климатических условий.

Для исследований КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах, реализующих принцип обратимости движения, требуется задание таких тестовых режимов, которые способны активировать работу электронных систем подключаемого привода и вызвать его срабатывание. При этом необходимо обеспечить измерение кинемати-

ческих и силовых параметров, позволяющих в полной мере оценить эффективность функционирования КТС.

Эти требования в полной мере способны обеспечить стендовые комплексы MTS Systems⁷ и подобные им. Однако, учитывая высокую стоимость как самих комплексов, так и выполняемых на их основе исследований, они недоступны для большей части организаций и предприятий, которые в этих исследованиях заинтересованы.

Наиболее близкой по направлению является работа, в которой автор выполнил исследование процессов функционирования противобуксовочной системы КТС на стенде с беговыми барабанами. Отмечено, что исследование процессов разгона ведущих колёс КТС при функционировании противобуксовочной системы на стендах, реализующих принцип обратимости движения, обеспечивает большую информативность испытаний и безопасность транспортных средств за счёт измерения силовых параметров процесса, нежели исследования в дорожных условиях. Авторы обосновали следующие тестовые режимы воздействия на противобуксовочную систему⁸:

- 1) трогание КТС с места при полной подаче топлива;
- 2) имитацию разности коэффициентов сцепления под колёсами КТС (имитация покрытия «МИКСТ») за счёт значительной разности в моментах инерции маховых масс стенда, соединённых с «буксующим» и «небуксующим» колёсами.

При этом имитация буксования ведущих колёс КТС на беговых барабанах стенда реализовывалась за счёт разности моментов инерции связанных с беговыми барабанами маховых масс.

Подводя итог, можно отметить, что для исследования эксплуатационных свойств современных КТС с системами управления подключаемым полным приводом требуется наукоёмкое оборудование, реализующее высокоинформативные и оперативные методы. Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы с исследовательским оборудованием является применение стендов, реализующих принцип обратимости движения.

⁶ Антонян А.В. Повышение устойчивости и управляемости автомобилей колесной формулой 4x4 путем перераспределения подводимых к колесам вращающих моментов: автореф. дис. канд. техн. наук. М., 2021.

⁷ Сайт компании MTS. URL: <https://www.mts.com/en> (дата обращения: 05.07.2024).

⁸ Потапов А.С. Динамический метод диагностирования противобуксовочных систем автотранспортных средств на стендах с беговыми барабанами: дис. канд. техн. наук. 05.22.10. Иркутск, 2011.

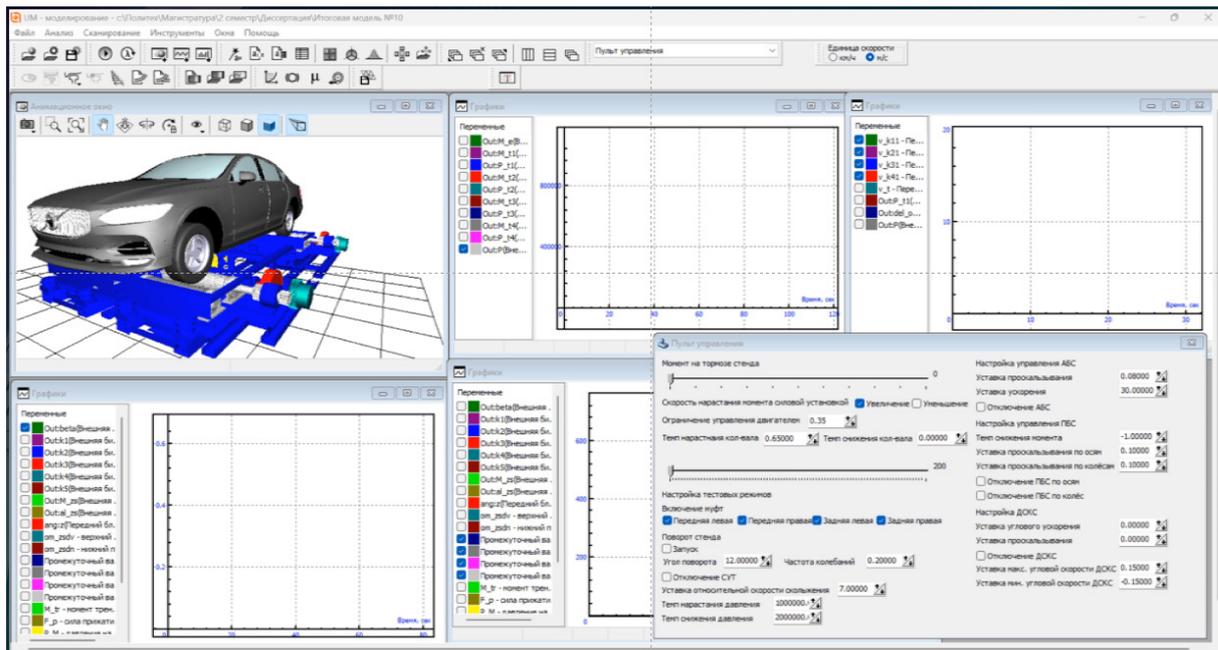


Рисунок 3 – Внешний вид программного обеспечения «Универсальный механизм – 9»
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The appearance of the «Universal mechanism 9» software
Source: compiled by the authors.

Они позволяют проводить исследования КТС в помещениях, закрытых от влияния погодных, климатических и других внешних факторов в заранее заданных режимах температуры, влажности и прочих условий. Такое оборудование должно быть доступно по цене и пригодно к использованию на предприятиях, осуществляющих производство, испытания и экспертизу КТС, а также на станциях технического обслуживания, сервисных центрах и других организациях автомобильной отрасли.

Решению указанных проблем препятствует недостаток знаний о процессах функционирования современных КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах, реализующих принцип обратимости движения, при исследовании параметров их эксплуатационных свойств, а также о формировании параметров, характеризующих рабочие процессы агрегатов и систем КТС и их нормативных значений, на стендах, и их связи с показателями эффективности эксплуатации и безопасности КТС.

Цель работы – разработка методов исследования эксплуатационных свойств КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах с беговыми барабанами. Результаты исследования позволят значитель-

но снизить временные, производственные и финансовые затраты на производство, экспертизу и эксплуатацию КТС с системами управления подключаемым полным приводом, что значительно повысит их эксплуатационные свойства и активную безопасность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели были проведены аналитические и экспериментальные исследования процесса функционирования КТС с системой управления подключаемым полным приводом на стенде с беговыми барабанами.

Аналитическое исследование проводилось в программном комплексе «Универсальный механизм» (рисунок 3). Для выполнения исследования была разработана система «Транспортное средство – Стенд», содержащая математические описания силовой установки КТС, его трансмиссии, логики функционирования системы AWD, а также трансмиссии стенда. Описание комплекса математических моделей приведено в работе [12]. В процессе моделирования использованы параметры автомобиля Volvo S60 2.5T AWD с муфтой Haldex II поколения.

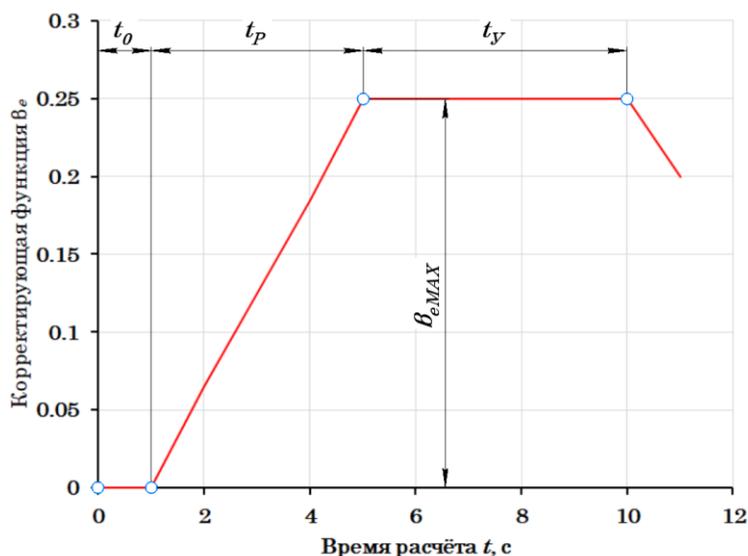


Рисунок 4 – Зависимость функции от времени расчёта
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Relation between function and the calculation time
Source: compiled by the authors.

Имитация буксования заданной оси в процессе моделирования определялась моментом трения фрикционной муфты стенда. Управление силовой установкой при разгоне ведущих колёс КТС осуществлялось линейным нарастанием коэффициента управления β_e в течение заданного времени расчёта. Изменение корректирующей функции осуществлялось до её максимального значения (рисунок 4), которое было достигнуто по времени, соответствующему времени разгона $t_p = 5$ с. С увеличением времени удержания t_y функция β_e оставалась неизменной. Максимальное значение корректирующей функции составляло $\beta_{eMAX} = 0,25$, что соответствует открытию дроссельной заслонки ДВС на 25%. По истечении времени удержания значение функции β_e уменьшалось с последующей остановкой колёс КТС.

Для проведения экспериментальных исследований процесса функционирования КТС с автоматизированной системой AWD на полноопорном мультифункциональном стенде с беговыми барабанами ИРННТУ^{9,10} использовал-

ся КТС Volvo S60 2.5T AWD с муфтой Haldex II поколения (рисунок 5). Экспериментальное исследование процесса функционирования КТС на стенде с беговыми барабанами осуществлялось по аналогичным условиям, используемым в аналитическом исследовании.



Рисунок 5 – Внешний вид КТС Volvo S60 2.5T AWD, установленного на полноопорный стенд с беговыми барабанами ИРННТУ
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Exterior view of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD mounted on the ISTU roller test bench
Source: compiled by the authors.

⁹ Яньков О.С. К вопросу о диагностике систем подключаемого полного привода / О.С. Яньков, Д.О. Ухватов, А.В. Куртова // Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественно-научные исследования, технический прогресс: материалы IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 31 марта 2023 года. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Манускрипт», 2023. С. 253–257.

¹⁰ Fedotov A., Yankov O., Chernyshkov A. Traction control and diagnostics of electric and unmanned vehicles on roller stands // E3S Web of Conferences: Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019, Khabarovsk, 24–26 октября 2019 года. Vol. 157. Khabarovsk: EDP Sciences, 2020. P. 01021. DOI 10.1051/e3sconf/202015701021.

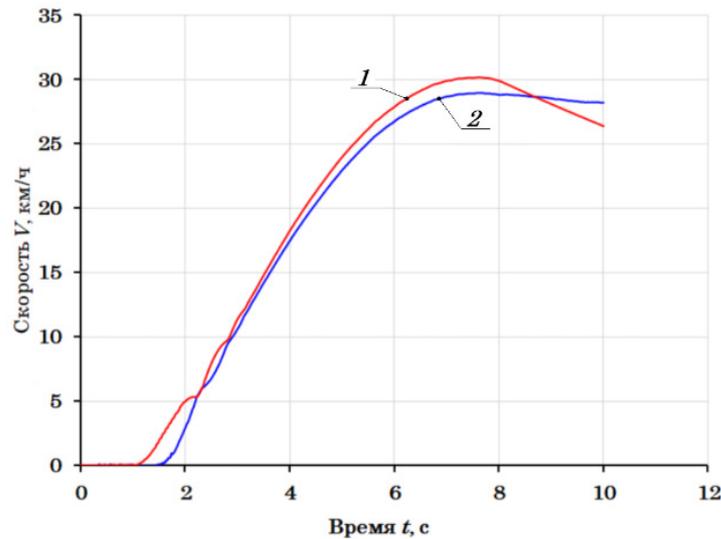


Рисунок 6 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (расчёт):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Relations between the speeds of driving wheels V_{Ki}^{Π} in the process of simulating acceleration of vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels of the front axle slipping (calculation):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Основной задачей исследования являлось определение выходных параметров процессов разгона с буксованием ведущих колёс КТС на стенде с беговыми барабанами с имитацией покрытия типа «МИКСТ» отдельно для колёс каждой ведущей оси: силы тяги на колёсах КТС F_{Ki} и скорости ведущих колёс V_{Ki}^{Π} .

На рисунках 6, 7, 8, 9 показаны зависимости сил тяги F_{Ki} на ведущих колёсах и скоростей колёс V_{Ki}^{Π} от времени t в процессе имитации разгона с буксованием, полученные в результате аналитического исследования по следующим вариантам имитации покрытия типа «МИКСТ» ($\Delta\varphi = 0,5$):

- 1) разгон ведущих колёс КТС до заданной скорости с имитацией низкого коэффициента сцепления шин ведущих колёс передней оси;
- 2) разгон ведущих колёс КТС до заданной скорости с имитацией низкого коэффициента сцепления шин ведущих колёс задней оси.

Исходные параметры:

- 1) момент инерции маховых масс $J_{Mi} = 3,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- 2) конечная, имитируемая скорость разгона, $V_K = 30 \text{ км/ч}$;
- 3) моменты инерции маховых масс, связанных с буксующими колёсами, $J_{M6} = 1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Участок разгона (см. рисунки 6 и 7) характеризуется резким увеличением скорости V_{Ki}^{Π} ведущих колёс КТС, причём повышение скорости V_{K12}^{Π} колёс передней оси происходит интенсивнее, чем задней по причине имитации процесса буксования именно этой оси. При этом силы тяги колёс передней оси V_{K12}^{Π} возрастают несколько раньше сил тяги колёс задней оси V_{K34}^{Π} . В момент, когда разность скоростей достигает значения, при котором происходит срабатывание системы управления подключаемым полным приводом, происходит подключение колёс задней оси, о чём свидетельствует возрастание сил тяги задних колёс V_{K34}^{Π} . Дальнейший разгон всех колёс КТС осуществляется за счёт сил тяги V_{K34}^{Π} колёс задней оси.

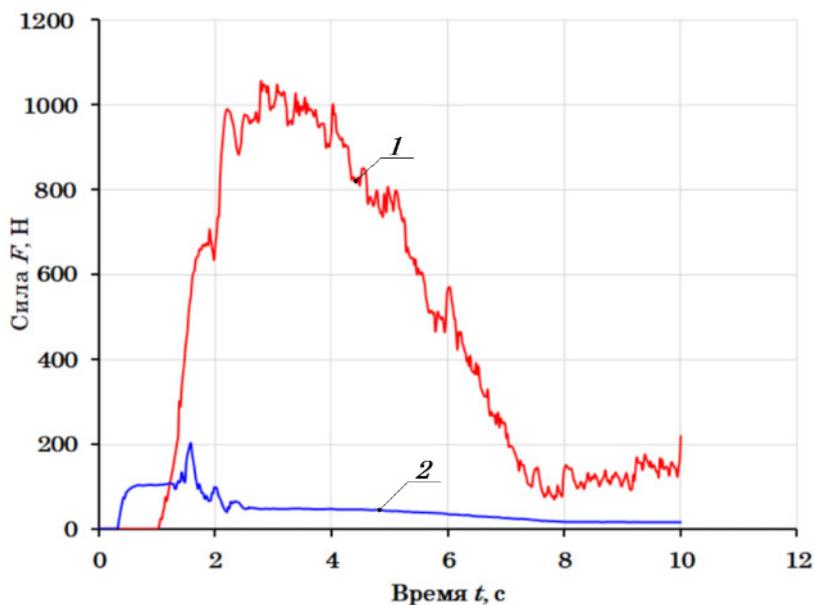


Рисунок 7 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (расчёт):
 1 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} ;
 2 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels of the front axle slipping (calculation):
 1 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} ;
 2 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

Зависимость скоростей V_{Ki}^3 и сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС с буксованием задней оси на покрытии типа «МИКСТ» показана на рисунках 8 и 9. Этот режим характеризуется увеличением скорости V_{Ki}^3 ведущих колёс КТС, однако значительного повышения скорости V_{K12}^3 колёс передней оси по отношению к скоростям V_{K34}^3 колёс задней оси не происходит. Объясняется

это тем, что задан режим имитации процесса буксования задней оси. Силы тяги колёс передней оси F_{K12}^3 увеличиваются больше сил тяги колёс задней оси F_{K34}^3 . В случаях, когда разность скоростей достигает значения, при котором осуществляется подключение колёс задней оси, силы тяги на колёсах этой оси возрастают незначительно. Дальнейший разгон всех колёс КТС осуществляется за счёт сил тяги F_{K34}^3 колёс передней оси.

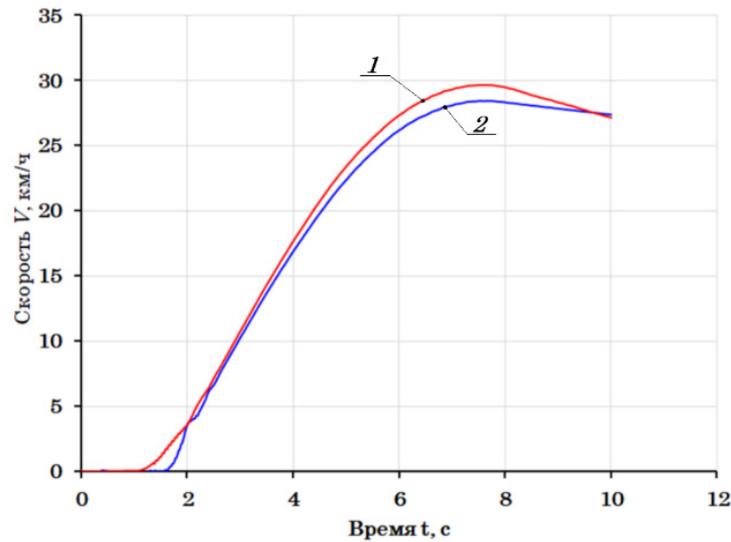


Рисунок 8 – Зависимость скоростей ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (расчёт):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – The speeds of the driving wheels F_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (calculation):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

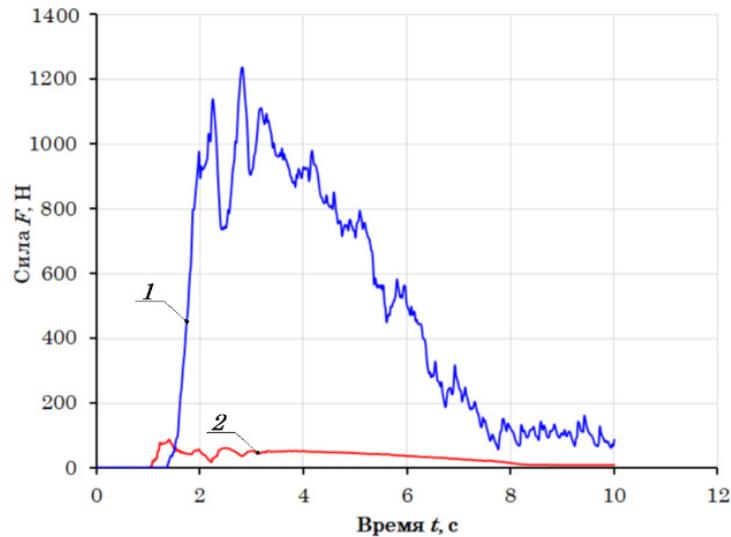


Рисунок 9 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (расчёт):
 1 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} ;
 2 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (calculation):
 1 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π} ;
 2 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

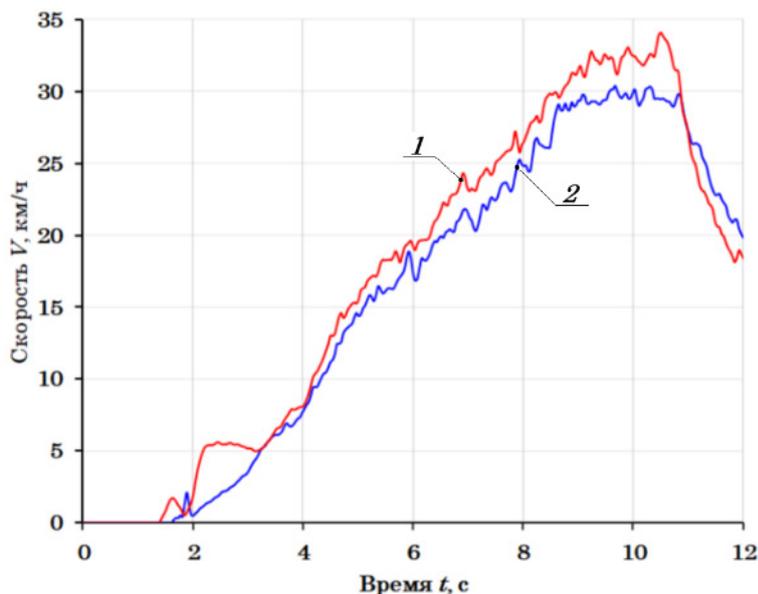


Рисунок 10 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (эксперимент):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping (experiment):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

На рисунках 10, 11, 12, 13 показаны зависимости сил тяги F_{Ki} на ведущих колёсах и их скоростей V_{Ki} в процессе имитации разгона с буксованием ведущих колёс КТС, полученные в результате экспериментального исследования. Зависимости получены при параметрах стенда и тестового воздействия, которые использовались в ходе аналитического исследования. Имитация процесса буксования определённой оси в соответствии с методиками проведения эксперимента осуществлялась при помощи фрикционных муфт и моментов инерции маховых масс, связанных с буксующими колёсами $J_{M6}=1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Разность скоростей V_{Ki} наблюдается до тех

пор (см. рисунки 10 и 12), пока не достигнуто условие подключения муфты системы управления подключаемым полным приводом. При срабатывании муфты происходит процесс синхронизации скоростей V_{Ki} колёс.

Согласно результатам аналитических исследований, в процессе экспериментальных исследований на графиках скоростей V_{Ki} , в начале процесса разгона возникает петля, которая сходится при срабатывании автоматизированной системы управления трансмиссией. При последующем увеличении скоростей V_{Ki} наблюдается их разность, которая также обусловлена значением уставки срабатывания системы.

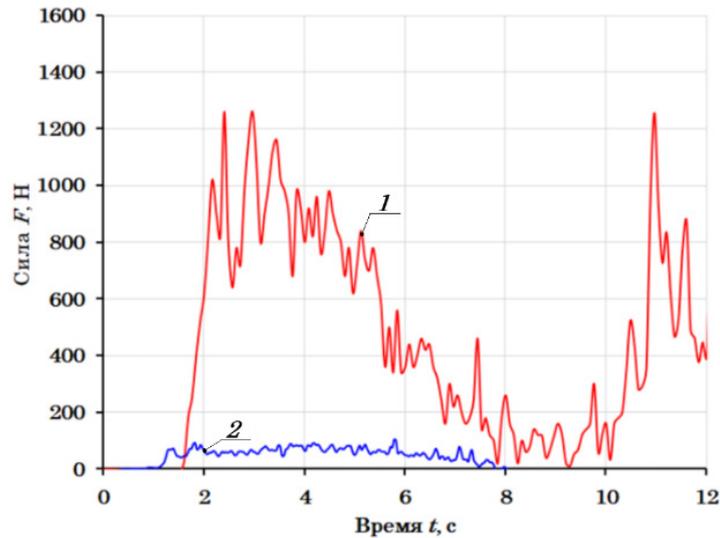


Рисунок 11 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (эксперимент):
 1 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} ;
 2 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 11 – The traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping (experiment):
 1 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} ;
 2 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

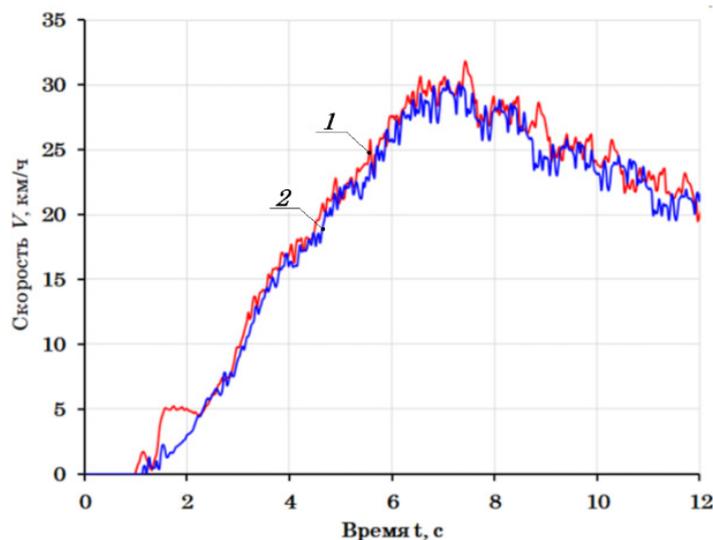


Рисунок 12 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (эксперимент):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 12 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (experiment):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

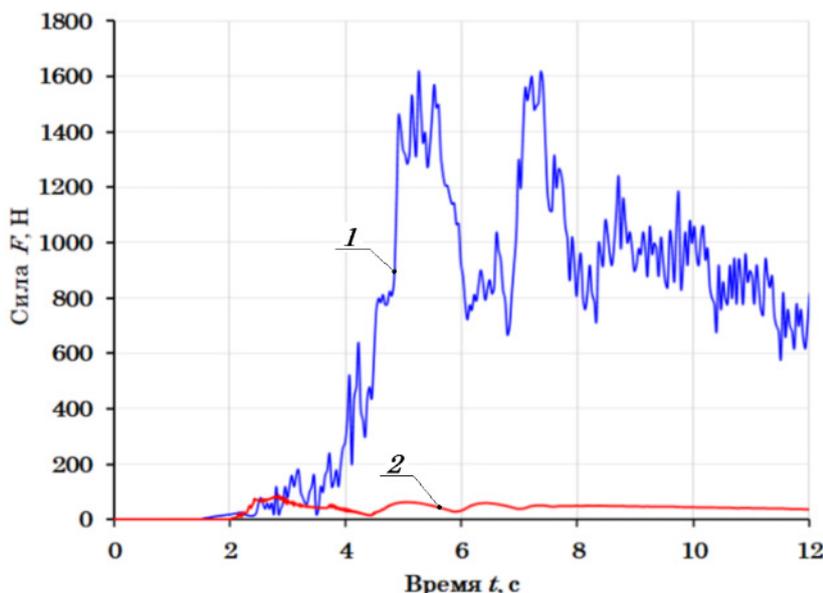


Рисунок 13 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (эксперимент):
 1 – сила тяги колёс передней оси F_{K12}^3 ;
 2 – сила тяги колёс задней оси F_{K34}^3
 Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (experiment):
 1 – traction force of the wheels on the front axle F_{K12}^3 ;
 2 – traction force of the wheels on the rear axle F_{K34}^3
 Source: compiled by the authors.

На графиках (см. рисунки 11 и 13) показаны зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС с буксованием передней оси, а также сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 с буксованием задней оси, полученные в результате экспериментального исследования. По графикам можно отметить резкие скачкообразные изменения сил F_{Ki} , которые вызваны крутильными колебаниями в трансмиссиях стенда и автомобиля.

Для оценки соответствия результатов математического моделирования и результатов, полученных в ходе экспериментального исследования при функционировании КТС с системой управления подключаемым полным приводом на стенде с беговыми барабанами при имитации покрытия «МИКСТ», была проведена проверка адекватности разработанного комплекса математических моделей по

критерию Фишера. Оценку адекватности проводили при уровне значимости, равном 95%. Сопоставление данных приведено в виде зависимостей, показанных на рисунках 14, 15, 16, 17, при параметрах, которые использовались в аналитическом исследовании.

На рисунке 14 представлены результаты сравнения зависимостей скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс передней оси, полученных аналитически и экспериментально. Рассчитанное значение критерия Фишера для скоростей колёс передней оси V_{K12}^{Π} составило $F_p = 664,35$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для скоростей колёс задней оси V_{K34}^{Π} составило $F_p = 231,55$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

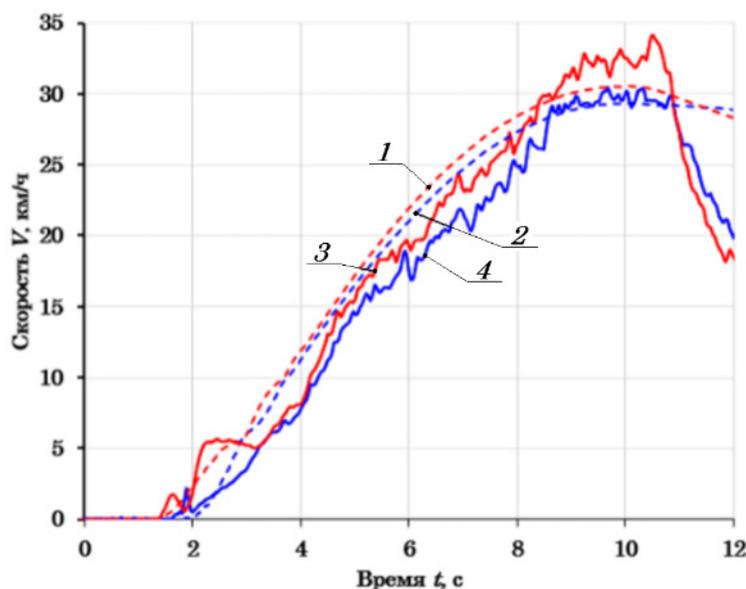


Рисунок 14 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси:
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} (расчёт);
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π} (расчёт);
 3 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} (эксперимент);
 4 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π} (эксперимент)
 Источник: составлено авторами.

Figure 14 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping:
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} (calculation);
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π} (calculation);
 3 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} (experiment);
 4 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π} (experiment)
 Source: compiled by the authors.

Результаты сравнения зависимостей сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс передней оси, полученные в ходе экспериментального и аналитического исследований, представлены на рисунке 15. Рассчитанное значение критерия Фише-

ра для сил тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} составило $F_p = 401,85$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для сил тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} составило $F_p = 561,55$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

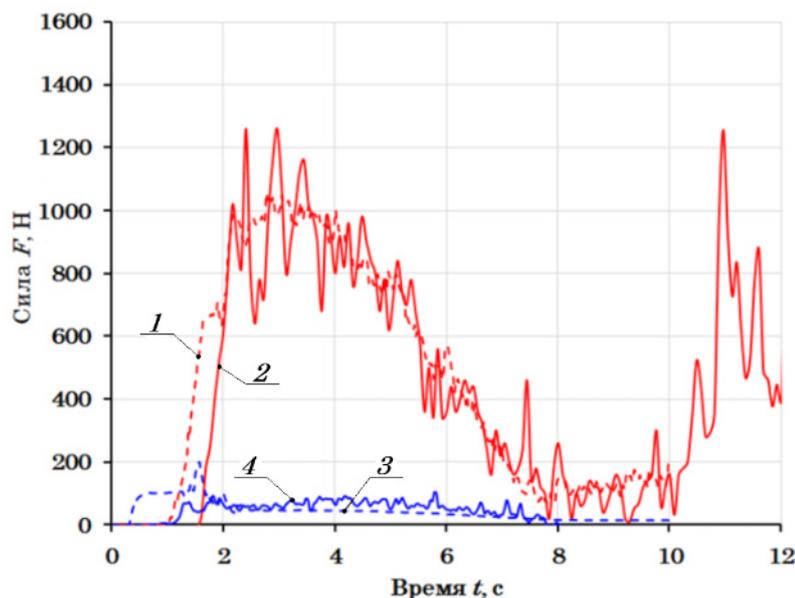


Рисунок 15 – Зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси:

- 1 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} (расчёт);
 - 2 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} (эксперимент);
 - 3 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} (расчёт);
 - 4 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} (эксперимент)
- Источник: составлено авторами.

Figure 15 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping:

- 1 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} (calculation);
 - 2 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} (experiment);
 - 3 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π} (calculation);
 - 4 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π} (experiment)
- Source: compiled by the authors.

На рисунке 16 представлены результаты сравнения зависимостей скоростей ведущих колёс V_{Ki}^3 в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс задней оси, полученных аналитически и экспериментально. Рассчитанное значение критерия

Фишера для скоростей колёс передней оси V_{K12}^3 составило $F_p = 504,22$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для скоростей колёс задней оси V_{K34}^3 составило $F_p = 630,64$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

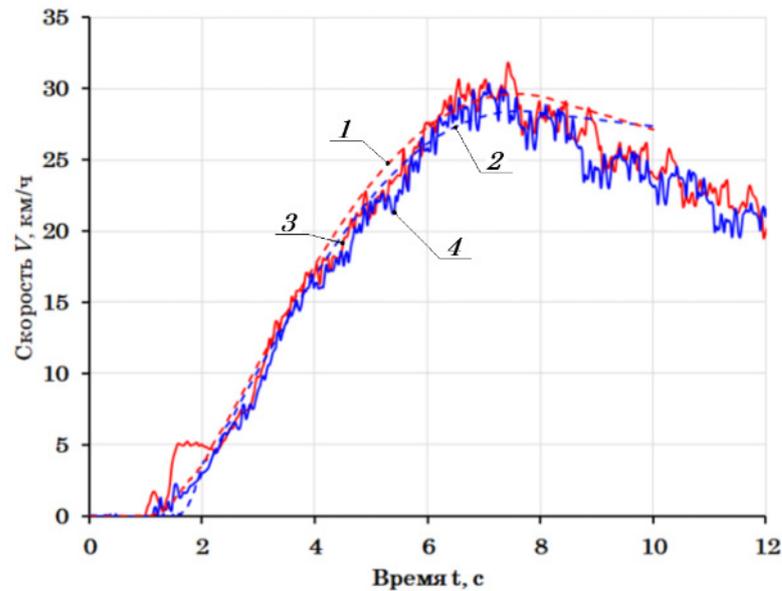


Рисунок 16 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси:

- 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^3 (расчёт);
 - 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^3 (расчёт);
 - 3 – скорость колёс передней оси V_{K12}^3 (эксперимент);
 - 4 – скорость колёс задней оси V_{K34}^3 (эксперимент)
- Источник: составлено авторами.

Figure 16 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping:

- 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^3 (calculation);
 - 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^3 (calculation);
 - 3 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^3 (experiment);
 - 4 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^3 (experiment)
- Source: compiled by the authors.

Результаты сравнения представлены на рисунке 17, где видны зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс задней оси, полученные в результате экспериментального и аналитического исследований. Рассчитанное значение критерия

Фишера для сил тяги колёс передней оси F_{K12}^3 составило $F_p = 140,41$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для сил тяги колёс задней оси F_{K34}^3 составило $F_p = 681,74$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

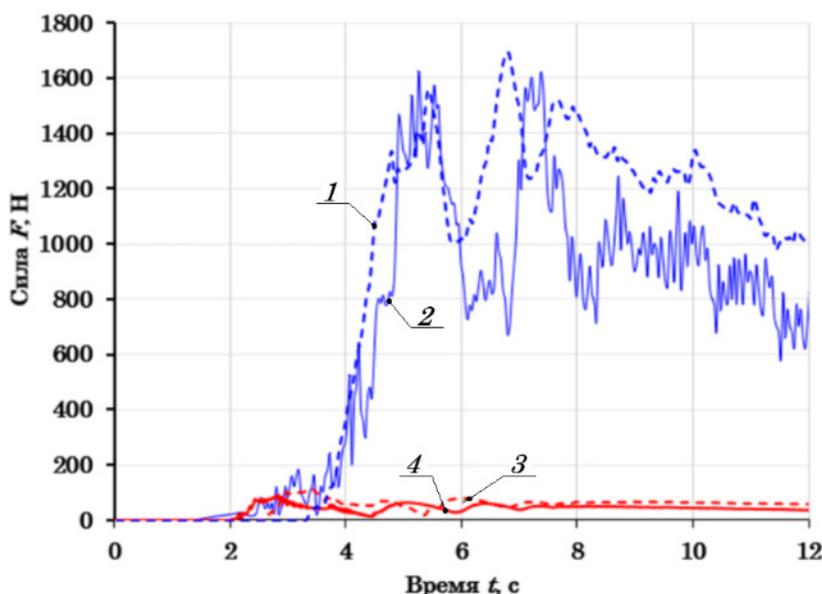


Рисунок 17 – Зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси:
 1 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^3 (расчёт);
 2 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^3 (эксперимент);
 3 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^3 (расчёт);
 4 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^3 (эксперимент)
 Источник: составлено авторами.

Figure 17 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping:
 1 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^3 (calculation);
 2 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^3 (experiment);
 3 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^3 (calculation);
 4 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^3 (experiment)
 Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты аналитических и экспериментальных исследований позволяют восполнить недостаток знаний о процессах функционирования современных КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах, реализующих принцип обратимости движения. Это доказывает возможность выполнять качественное и количественное исследование процессов функционирования КТС с системами управления подключаемым полным приводом.

При сравнении результатов расчетных и экспериментальных исследований наблюдается качественное совпадение характеристик процесса разгона КТС с муфтой HALDEX II поколения на стенде с беговыми барабанами. Проверка адекватности комплекса разра-

ботанных математических моделей по силам тяги F_{K34}^3 на ведущих колёсах КТС и средним скоростям, имитируемым на стенде, показывает, что для уровня значимости 0,05 расчетные значения критерия Фишера F_p значительно превышают их табличные значения $F_{(v_1, v_2, \%)}^T$. Таким образом, с достоверностью 95% комплекс математических моделей можно считать значимым. Проведение дальнейших исследований с использованием комплекса математических моделей позволит:

- 1) оптимизировать тестовые воздействия при испытаниях КТС на стендах;
- 2) выявлять зависимости изменения параметров функционирования автоматизированных систем управления подключаемым полным приводом от параметров их технического состояния;

3) разрабатывать новейшие стендовые методы и доступное по стоимости оборудование для выполнения комплексного исследования эксплуатационных свойств современных КТС не только с системами управления подключаемым полным приводом, но и с другими автоматизированными системами, такими как системы индивидуального привода на каждом ведущем колесе для КТС с электрическими силовыми установками.

Такой подход значительно снизит временные, трудовые и материальные затраты на производство КТС, проведение технической экспертизы, диагностики и ремонта, что в конечном итоге повысит активную безопасность КТС, а также показатели эффективности их эксплуатации и работы предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахмутов С.В., Куликов И.К., Барашков А.А. Исследование динамических характеристик автомобиля с системами активной безопасности посредством виртуальных и дорожных испытаний // Труды НАМИ. 2016. № 265. С. 53–65.

2. Заватский А.М., Харитонов С.А. Имитационное моделирование критических режимов, выявленных при эксплуатации систем автоматически подключаемого полного привода // Труды НАМИ. 2018. № 2 (273). С. 26–34.

3. Zavatsky A.M., Keller A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Y.M. Development of an Electric All-Wheel-Drive Simulation Model Used to Test Torque Distribution Algorithms. *Energies* 2023, 16, 7144. <https://doi.org/10.3390/en16207144> Ascosta M., Kanarachos S., Blundell M. Road Friction Virtual Sensing A Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7(12).

4. Bill Post, Xiaodi Kang and Theodore Klaus, «The Influence of Direct Yaw Control AWD Systems on Vehicle Stability and Response in All Driving Conditions», SAE Technical Paper 2008-01-059, 2008

5. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015.

6. Huang, T., Zhao, J., and Li, H., «Research on Stability Control of a Rear Wheel Distributed Drive Electric Formula SAE Vehicle Based on Differential Drive», SAE Technical Paper 2020-01-5234, 2020.

7. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015, DOI:10.1109/VPPC.2015.7352887.

8. Lenssen, D., Bertipaglia, A., Santafe, F., and Shyrokau, B., «Combined Path Following and Vehicle Stability Control using Model Predictive

Control», SAE Technical Paper 2023-01-0645, 2023, DOI:10.4271/2023-01-0645.

9. Lu Q., Gentile P., Tota A., Sorniotti A., Gruber P., Costamagna F., De Smet J., «Enhancing vehicle cornering limit through sideslip and yaw rate control. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. 75, pp. 455–472.

10. Анкинович Г.Г., Вержбицкий А.Н., Жилейкин М.М. Метод определения параметров движения двухосных колесных машин для обеспечения работы системы динамической стабилизации // *Известия ВУЗов. Сер. «Машиностроение»*. 2017. № 4. С. 11–20.

11. Guo, J. Integrated Control of Variable Torque Distribution and Electronic Stability Program Based on Slip Angle Phase/ Guo. J. – 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT). 2011. P. 133–141, DOI:10.1109/EMEIT.2011.6023881.

12. Ухватов Д.О., Яньков О.С., Федотов А.И. [и др.] Процесс функционирования КТС с автоматизированной системой полного привода на стенде с беговыми барабанами // *Грузовик*. 2024. № 8. С. 12–16. DOI 10.36652/1684-1298-2024-8-12-16.

REFERENCES

1. Bakhmutov S.V. S.V., Kulikov I.K., Barashkov A.A. Investigation of the dynamic characteristics of a car with active safety systems through virtual and road tests. *Trudy NAMI*. 2016; 265: 53-65. (in Russ.)

2. Zavatskiy A.M., Kharitonov S.A. Simulation of the critical modes of automatically connected four-wheel drive systems detected in operation. *Trudy NAMI*. 2018; (2): 26–34. (In Russ.)

3. Zavatskii A., Zavatskii M., Veduta O. Applying Simulation for the Development of Active All-wheel-drive Systems. *International Journal of Applied Exercise Physiology*. 2023; Vol.8 No.3.1 (in Russ.)

4. Bill Post, Xiaodi Kang and Theodore Klaus, «The Influence of Direct Yaw Control AWD Systems on Vehicle Stability and Response in All Driving Conditions», SAE Technical Paper 2008-01-059, 2008

5. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015.

6. Huang T., Zhao J., and Li H., Research on Stability Control of a Rear Wheel Distributed Drive Electric Formula SAE Vehicle Based on Differential Drive, SAE Technical Paper 2020-01-5234, 2020.

7. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015, DOI:10.1109/VPPC.2015.7352887.

8. Lenssen D., Bertipaglia A., Santafe F., and Shyrokau B. Combined Path Following and Vehicle Stability Control using Model Predictive Control, SAE Technical Paper 2023-01-0645, 2023, DOI:10.4271/2023-01-0645.

9. Lu Q., Gentile P., Tota A., Sorniotti A., Gruber P., Costamagna F., De Smet J., Enhancing vehicle cornering limit through sideslip and yaw rate control. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016; 75: 455-472.

10. Ankinovich G.G., Verzhbitsky A.N., Zhileikin M.M. A method for determining the motion parameters of biaxial wheeled vehicles to ensure the operation of a dynamic stabilization system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2017; 4: 11-20. (in Russ.)

11. Guo J. Integrated Control of Variable Torque Distribution and Electronic Stability Program Based on Slip Angle Phase. 2011 *International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*. 2011: P.133-141, DOI:10.1109/EMEIT.2011.6023881.

12. Ukhvatov D.O., Yankov O.S., Fedotov A. The process of functioning of a CCC with an automated all-wheel drive system on a stand with running drums. *Truck*. 2024; No. 8: 12-16. DOI 10.36652/1684-1298-2024-8-12-16. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

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

Яньков О.С. Общая организация. Разработка методик экспериментальных исследований, обработка и анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Ухватов Д.О. Оформление рисунков и описание их, подготовка текста статьи, выполнение экспериментальных исследований, аналитических исследований.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Fedotov A.I. Scientific supervisor, consulting, writing the manuscript.

Yankov O.S. General organization of work, drafting experimental research methods, data processing and analysis, writing the manuscript.

Ukhvatov D.O. Design of drawings and their description, writing the manuscript, contribution to experimental research, data analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), ORCID: 0009-0002-8329-6785, SPIN-код: 1342-4073, Scopus Author ID: 56341065000, Researcher ID: AAZ-7059-2021, e-mail: fai.abs@yandex.ru

Яньков Олег Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), ORCID: 0000-0001-6709-4820, SPIN-код: 3127-7106, Scopus Author ID: 57212165852, Researcher ID: AAG-5898-2022, e-mail: yos913005@mail.ru

Ухватов Дмитрий Олегович – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), ORCID: 0009-0006-8467-4804, SPIN-код: 1763-4986, e-mail: dim.ia@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedotov Alexander I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontov str.), ORCID: 0009-0002-8329-6785, SPIN-код: 1342-4073, Scopus Author ID: 56341065000, Researcher ID: AAZ-7059-2021, e-mail: fai.abs@yandex.ru

Yankov Oleg S. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontov str.), ORCID: 0000-0001-6709-4820, SPIN-код: 3127-7106, Scopus Author ID: 57212165852, Researcher ID: AAG-5898-2022, e-mail: yos913005@mail.ru

Ukhvatov Dmitrii O. – postgraduate student at the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontov str.), ORCID: 0009-0006-8467-4804, SPIN-код: 1763-4986, e-mail: dim.ia@mail.ru