

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.186-203>EDN: <https://elibrary.ru/cfaqtr>

УДК 658.274

Оригинальная статья / Original article

Прототип беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land

М. В. Чугунов✉, И. Н. Полунина, А. Ю. Овчинников*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,
г. Саранск, Российская Федерация*✉ m.v.chugunov@mail.ru

Аннотация

Введение. Современное электромобилестроение активно развивается по многим направлениям. Разработка и реализация проектного решения для электромобиля являются актуальными задачами, включающими в себя множество частных взаимосвязанных исследовательских, конструкторских и технологических задач. В данной статье рассматривается прототип электромобиля, реализующий проектное решение, основанное на комбинированном управлении, включающем в себя ручное, дистанционное и программное управление. **Цель исследования.** Разработать и реализовать проектное решение для прототипа электромобиля с системой комбинированного управления в ручном, дистанционном (по радио) и беспилотном режимах с возможностью для пилота легко и безопасно менять режим управления.

Материалы и методы. В качестве методов и инструментов решения поставленной задачи используются современные методы моделирования и проектирования, основанные на интегрированном подходе, предполагающем разработку виртуальных (CAx) и натуральных моделей, построенных на базе конструктора Bigo.Land и ArduPilot.

Результаты исследования. Результатом исследования является интегрированная модель прототипа электромобиля в целом и, в частности, натурная модель, CAx-модели, система управления, обеспечивающая комбинированное дистанционное, программное и ручное управление. Компоненты (натурные и виртуальные) интегрированного объекта связаны этой же системой управления.

Обсуждение и заключение. Разработанная интегрированная программно-аппаратная модель прототипа электромобиля, система траекторного управления и результаты анализа этой модели обеспечивают функционал комбинированной системы управления электромобилем и могут быть использованы разработчиками и производителями данного вида техники.

Ключевые слова: электромобиль, CAD/CAE (CAx), автономизация мобильной техники, натурные и виртуальные модели, комбинированное управление, обгонная муфта двуправленного действия, прототипирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: публикация осуществляется в рамках проекта «Разработка САПР и анализ проектных решений», реализуемого победителем грантового конкурса для преподавателей 2023/2024 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

© Чугунов М. В., Полунина И. Н., Овчинников А. Ю., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Благодарности: авторы благодарят анонимных рецензентов и фонд Владимира Потанина, поддержавший данный проект.

Для цитирования: Чугунов М.В., Полунина И.Н., Овчинников А.Ю. Прототип беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):186–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.186-203>

Prototype of an Electric Vehicle Based on Bigo.Land

M. V. Chugunov✉, I. N. Polunina, A. Yu. Ovchinnikov

National Research Mordovia State University,

Saransk, Russian Federation

✉ m.v.chugunov@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern electric vehicle industry is actively developing in many areas. Developing design and implementing a design decision for an electric vehicle are urgent tasks, including many specific interconnected research, design and technological problems. This article discusses a prototype electric vehicle, in which there is implemented a design decision based on combined control, which includes manual, remote and program control.

Aim of the Study. The study is aimed at developing and implementing a design decision for an electric vehicle prototype with a combined control system in manual, remote (by radio) and unmanned mode that allows the pilot to easily and safely change the control mode.

Materials and Methods. To solve the problem, there were used modern modeling and design methods based on an integrated approach involving the development of virtual (CAx) and full-scale models based on the Bigo.Land constructor and ArduPilot.

Results. The result of the study is an integrated model of an electric vehicle prototype in general and, in particular, a full-scale model, CAx models, a control system providing combined remote, software and manual control. The components (full-scale and virtual) of the integrated object are connected by the same control system.

Discussion and Conclusion. The developed integrated software and hardware model of an electric vehicle prototype, trajectory control system and the results of this model analysis provide the functional of a combined electric vehicle control system and can be used by designers and manufacturers of this type of machinery.

Keywords: electric vehicle, CAD/CAE, autonomous mobile machinery, full-scale and virtual models, combined control, overrunning clutch portion, prototyping

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: The publication is carried out within the framework of the project “CAD development and analysis of design solutions”, implemented by the winner of the grant competition for teachers 2023/2024 of the Vladimir Potanin Scholarship Program.

Acknowledgements: The authors thank the anonymous reviewers, and also express their gratitude to the Vladimir Potanin Foundation, which supported this project.

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Ovchinnikov A.Yu. Prototype of an Electric Vehicle Based on Bigo.Land. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):186–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.186-203>

Введение. Разработка и реализация проектного решения для электромобиля является сложной междисциплинарной задачей, включающей в себя множество частных взаимосвязанных исследовательских, конструкторских и технологических задач. В связи с этим особое значение приобретает разработка прототипа электромобиля, позволяющая в условиях ограниченных ресурсов создать и реализовать

некое концептуальное проектное решение, а на его основе – решить одну или несколько частных инженерных задач. Таким образом, разрабатываемый прототип в рамках своей концепции предусматривает акцент на какую-то одну или несколько из своих многочисленных функций, реализуемых, в частности, электрическими роботизированными транспортными средствами и широко используемыми в промышленном и агропромышленном комплексах (например, в системах параллельного вождения «подруливание»).

При этом ключевым моментом является выбор платформы для реализации проекта, в качестве которой в данной работе был использован конструктор Bigo.Land. Платформа позволяет реализовать проект с самого начала, при этом обеспечивает многовариантность конструирования и проектирования.

Одной из частных инженерных задач является реализация функции комбинированного управления, сочетающая в себе дистанционное (по радиоканалу), программное и ручное управление. Дистанционное и программное управление для краткости и во избежание путаницы с терминологией ArduPolot будем называть телематическим. В случае нештатных ситуаций, когда у пилота возникает необходимость взять управление на себя, или же в случае, когда по той или иной причине пилот решает изменить программную траекторию движения – указанная функция является необходимой.

В данной работе рассматриваются бюджетные варианты реализации системы управления электромобилем, которые удовлетворяли бы всем техническим требованиям проекта в целом.

Целью исследования является разработка прототипа электромобиля, обладающего указанным функционалом комбинированного управления, под которым мы понимаем возможность простого и безопасного переключения пилотом режимов управления с ручного на телематический и обратно.

Обзор литературы. Перспективы развития электромобилестроения широко обсуждаются в литературе в экономическом [1], техническом [2] и экологическом аспектах [3; 4].

В ряду технических проблем прототипирования особое место занимает рассмотрение вопросов, связанных с информационными технологиями, используемыми для управления электромобилем, его автопилотированием и функциями автономного поведения [5–7]. Наиболее близкими к нашему исследованию являются те работы, которые рассматривают задачи прототипирования электромобиля, в частности, проекты, выполненные по программе инженерного соревнования Formula Student Russia¹.

Одной из частных инженерных задач, решаемых в рамках данного проекта, является реализация комбинированного (ручного, дистанционного, программного) управления. Среди подходов к решению этой задачи рассмотрим те из них, которые используют только механические системы без электронных компонент.

Как правило, в этом случае предлагается использовать роликовые или зубчатые (планетарные) муфты, предусматривающие два варианта работы. Первый вариант в основном используется в схватах роботов андроида типа и обеспечивает передачу

¹ Международный образовательный проект «Формула студент» [Электронный ресурс] : сайт. URL: <http://fstudent.ru/> (дата обращения: 23.09.2024); Студенческие инженерные проекты : сборник материалов и докладов 6-го Всероссийского форума. М. : Мир науки, 2020. URL: <https://izd-mn.com/PDF/50MNNPK20.pdf> (дата обращения: 23.09.2024).

крутящего момента от входного вала к выходному, а также блокировку выходного вала (самоторможение) при необходимости. Второй вариант (как в нашем случае) предусматривает суммирование углов поворота двух входных валов на выходном валу.

В кинематической схеме механизма, обеспечивающего второй вариант работы, необходимо предусмотреть дополнительную вращательную степень свободы для детали, которая в первом варианте фиксируется. В остальном принципиальная разница между этими механизмами отсутствует.

Так, в исследование [8] был предложен механизм двунаправленного действия с использованием планетарного зубчатого зацепления, обеспечивающий малую потерю мощности и малый люфт по сравнению с муфтой роликового типа и при высокой скорости вращения.

В работах [9; 10] приведены проекты муфт роликового типа, ориентированные на первый вариант работы, представлен их подробный кинематический, статический и динамический анализ, даны рекомендации по поводу назначения размеров конструктивных элементов.

Анализ обгонных муфт сопряжен со значительными трудностями и предусматривает моделирование контактного взаимодействия твердых деформируемых тел с учетом сил трения. Авторами исследования [11] представлен усовершенствованный метод анализа фрикционных контактов в муфтах свободного хода, позволяющий оценить возможность проскальзывания в контакте и потери сцепления в зависимости от сценария использования муфты. В работе [12] выполнен анализ энергоэффективности муфты при значительных нагрузках.

Сложность задачи предполагает широкий арсенал средств и инструментов анализа конструкции. Например, ANSYS используется в исследованиях [9; 10], инструменты ADAMS/SOLVER SUBROUTINE – в статье [13], SIMULINK – в работе [14].

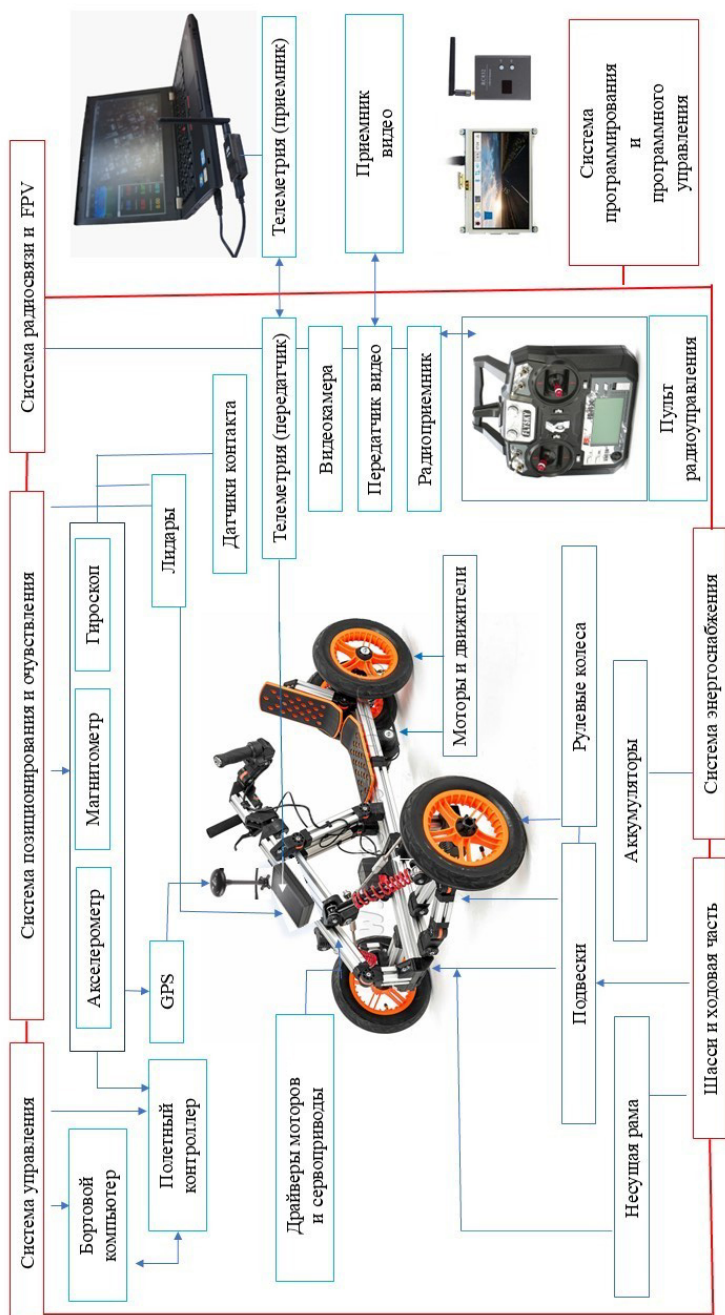
В целом, представленное нами исследование продолжает опыт авторов по разработке беспилотных мобильных систем на базе ArduPilot/APM/Pixhawk [15–18].

Материалы и методы. Архитектура прототипа электромобиля в общем виде представлена на рисунке 1 и включает в себя следующие компоненты и системы: шасси и ходовую часть; электродвигатель (как правило, более одного); системы энергоснабжения, управления, радиосвязи (FPV), позиционирования и осязательства, программирования и программного управления.

Управление движением электромобиля (мобильного колесного робота) осуществляется по классической схеме (рис. 1) с двумя приводными (задними) колесами и двумя рулевыми (передними) колесами. Механизм поворота обеспечивает принцип управления Аккермана [19] и включает в себя вал руля, маятник, установленный на валу руля и осуществляющий поворот рулевой трапеции. В случае программного и дистанционного управления конструкция дополняется сервоприводом. Таким образом, согласно классификации [20] рассматриваемый робот относится к типу 4X2K2Py.

В программно-аппаратную часть системы управления², построенную на базе ArduPilot и используемую нами в работах [16–18], внесли некоторые изменения.

² Программно-аппаратное решение для мобильной роботизированной платформы / И. А. Лакоткин [и др.] // L. Огарёвские чтения : материалы Всеросс. с междунар. участием науч. конф. 3 ч. (6 ноября – 11 декабря 2021 г., г. Саранск). Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, 2022. Ч. 1. С. 774–779. <https://elibrary.ru/hacxjs>



Р и с. 1. Архитектура электромобиля

Источник: рисунки 1, 11 составлены авторами статьи.

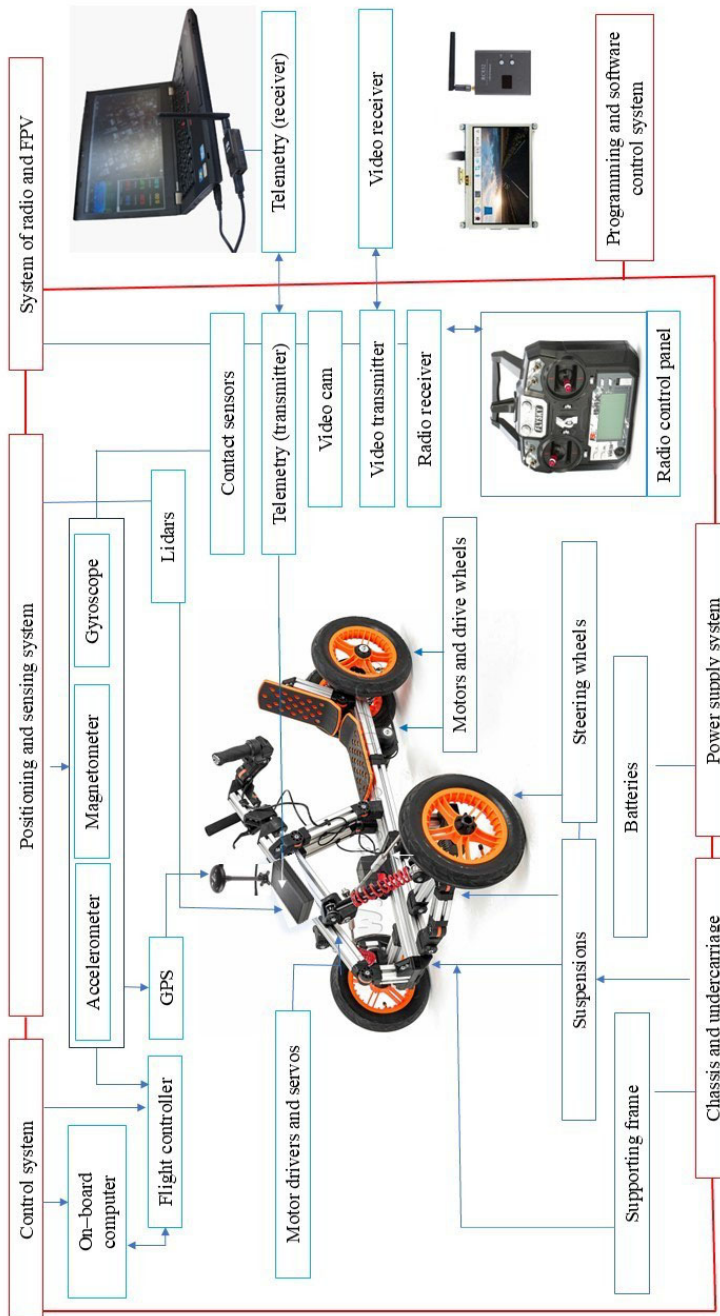


Fig. 1. Electric vehicle architecture

Source: figures 1, 11 are made by the authors of the article.

Штатный вариант ArduPilot (ArduRover) предусматривает использование ШИМ-сигнала в качестве управляющего для драйвера мотора, а драйвер Bigo.Land в качестве управляющего использует аналоговый сигнал, получаемый непосредственно от ручки газа (с использованием датчика Холла). В этой связи необходимо между соответствующим портом Pixhawk, передающим управляющий ШИМ-сигнал, и драйвером мотора установить настраиваемый конвертер, преобразующий ШИМ в аналоговый сигнал, соответствующий по диапазону изменения напряжения штатным значениям Bigo.Land. Во всем остальном программно-аппаратная часть системы управления совпадает с представленной в работах [15–18].

Виртуальная САх-модель электромобиля разработана в соответствии с конструктивными особенностями Bigo.Land в параметрической форме, при этом глобальными переменными являются основные геометрические параметры шасси: L (колесная база) и H (размер колес) [15]. Видеоролик³ иллюстрирует основные параметрические свойства модели, а также процесс тестирования прототипа электромобиля как в натурном, так и виртуальном вариантах в различных режимах управления.

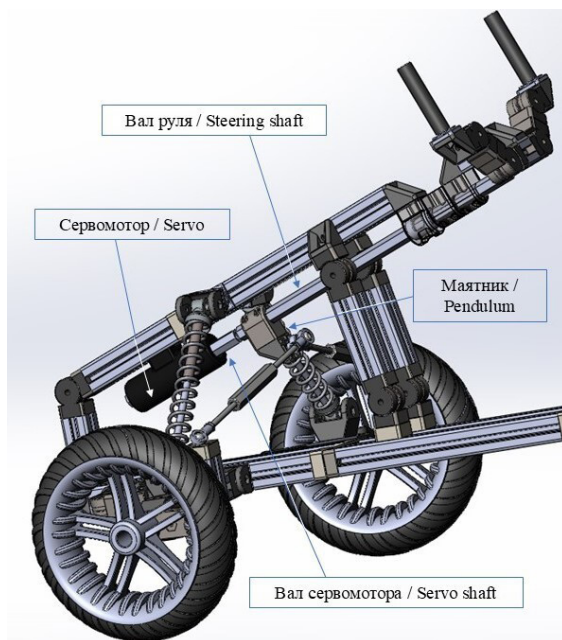
Основным инструментом интеграции виртуальной и натурной модели является единая система траекторного управления и путевой стабилизации [15–18]. К сожалению, для виртуальной модели в виде САх реализовать процесс управления синхронно в реальном времени не удастся в виду вычислительной трудоемкости САх-модели. Средства имитационного моделирования, включенные в состав наземных станций управления (например, ArduPilot SITL, Mission Planner⁴), позволяют синхронизировать управление натурной виртуальной модели и модели, созданной в среде MissionPlanner. При этом необходимо обеспечить комбинированное дистанционное (программное) и ручное управление. Это означает, что поворот вала руля, соединенного с рулевой трапецией, должен совершаться в дополнение к повороту вала сервомотора, реализующему функции автопилотирования. Иными словами, необходимо дополнительное устройство, установленное между валом сервомотора и валом руля, обеспечивающее функцию «подруливания» со стороны пилота (рис. 2). Необходимость такой функции очевидна и связана прежде всего со всякого рода нештатными ситуациями, в которых автопилот не в состоянии справиться, и требуется вмешательство пилота.

Указанную задачу можно решить, используя обгонную муфту двустороннего действия. На рисунке 3 приведена сборка обгонной муфты, которая включает в себя полумуфту и вал рулевой трапеции, полумуфту и вал сервомотора, ролики, пружины роликов, подшипники, а также вал руля с кулачками. На рисунке 4 показана установка обгонной муфты на актуальную для решения этой задачи часть всей конструкции электромобиля. Видеоролик иллюстрирует сборку муфты⁵.

³ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/smFo/Ygfm7ecce>

⁴ SITL Simulator (Software in the Loop) [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html> (дата обращения: 23.09.2024).

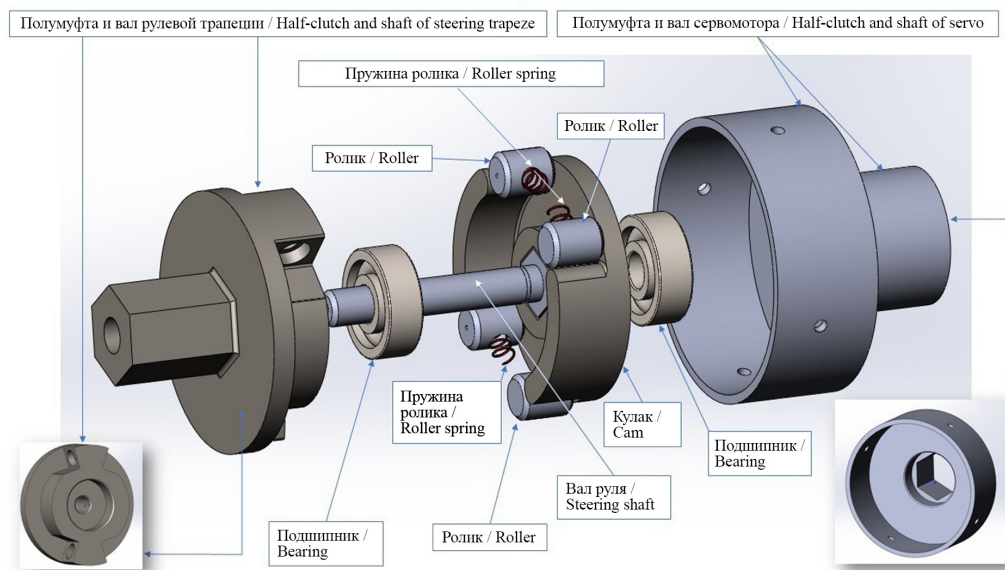
⁵ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/mgXo/FfbBQtV5z>



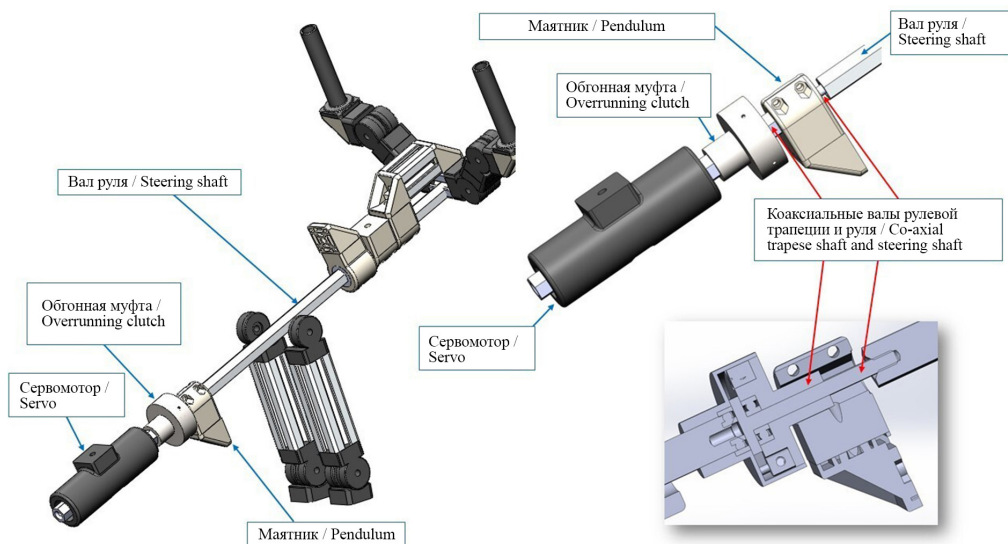
Р и с. 2. Система управления движением
F i g. 2. Motion control system

Источник: модели для рисунков 2–10 построены в САХ-системе SolidWorks.

Source: models for figures 2–10 are created with the use of the CAx-SolidWorks.



Р и с. 3. Сборка обгонной муфты
F i g. 3. Overrunning clutch portion assembly



Р и с. 4. Обгонная муфта в контексте сборки всей конструкции

Fig. 4. Overrunning clutch in the context of the assembly of the complete structure

Круглый вал руля от муфты и шестигранный вал рулевой трапеции с цилиндрическим отверстием расположены относительно друг друга коаксиально. При повороте рулевых колес в ручном режиме управления силы трения колес о контактируемую поверхность тормозят поворот полумуфты и вала рулевой трапеции, что обеспечивает разблокирование этого вала с полумуфтой и валом сервомотора.

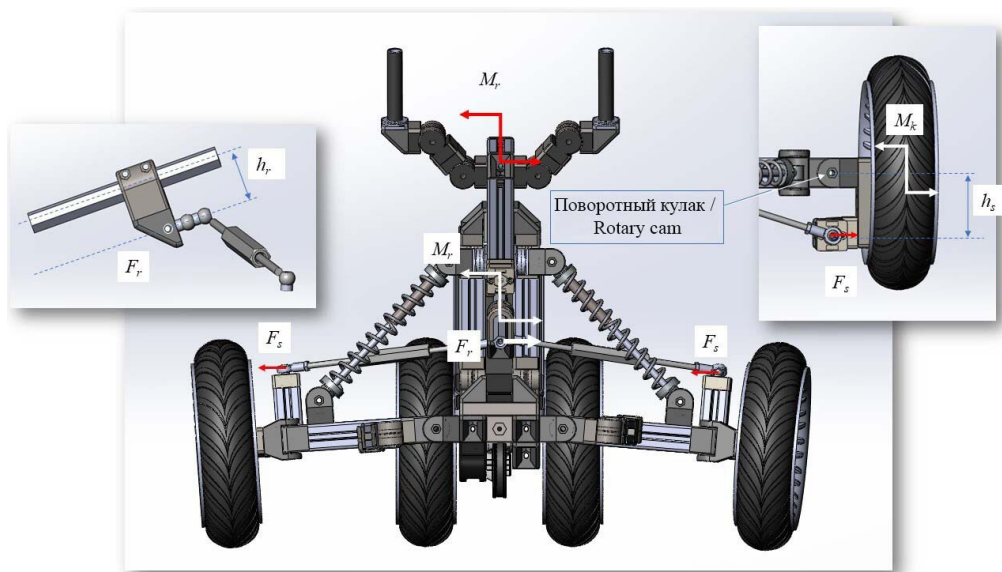
В результате пилот получает возможность управлять электромобилем при фиксированном положении вала сервомотора, заданного автопилотом. В свободном состоянии руля пружины выталкивают ролики, механизм блокируется от взаимного поворота полумуфт, и сервомотор поворачивает вал рулевой трапеции вместе с валом руля на угол, заданный автопилотом.

Функциональность обгонной муфты обеспечивается множеством параметров. Среди них основными являются геометрические и массово-инерционные параметры деталей, а также жесткости пружин. Кроме того, помимо заданных габаритов, необходимо обеспечить передачу крутящего момента, достаточного для поворота рулевых колес.

Для определения необходимых крутящих моментов следует определить момент M_k на поворотном кулаке передней подвески и, соответственно, момент M_r на валу руля в состоянии покоя (рис. 5). Из условий статического равновесия

$$M_r = F_r h_r = 2F_s h_s = 2M_k,$$

где F_r и F_s – силы, создающие момент на маятнике и рулевой тяге, а h_r и h_s – плечи этих сил для моментов M_r и M_k соответственно.



Р и с. 5. Крутящий момент на руле
F i g. 5. Steering wheel torque

Примечание: M_k – момент на поворотном кулаке передней подвески; M_r – момент на валу руля; F_r и F_s – силы, создающие момент на маятнике и рулевой тяге; h_r и h_s – плечи этих сил для моментов M_r и M_k соответственно.

Note: M_k – the torque on the steering cam of the front suspension; M_r – the torque on the steering shaft; F_r and F_s are the forces creating the moment on the pendulum and steering rod; h_r and h_s are the arms of these forces for the moments M_r and M_k , respectively.

Для определения момента на поворотном кулаке предлагается упрощенная модель, включающая в себя колесо, смонтированное на оси и несущей вилке (рис. 6).

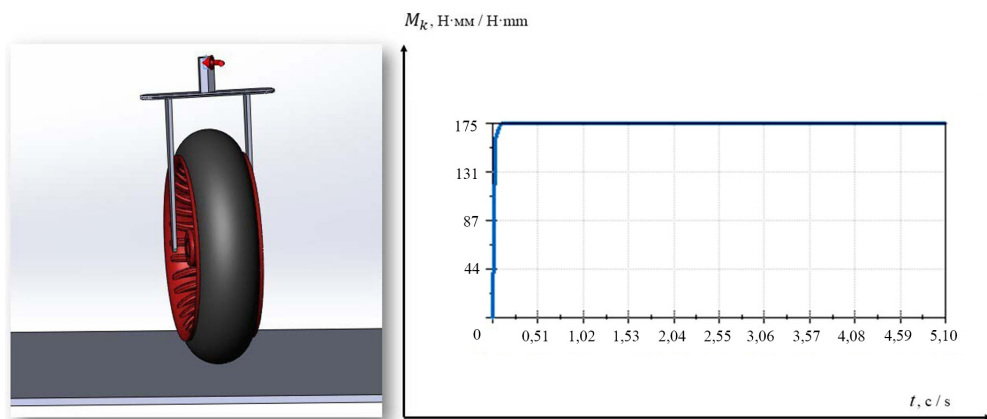
Крутящий момент на валу вилки колеса может быть определен согласно известному соотношению [21]:

$$M_k = \int_0^{2\pi} \int_0^R \mu p r^2 dr d\varphi = \int_0^{2\pi} \frac{\mu p R^3}{3} d\varphi = \frac{2\pi}{3} \mu p R^3 = 0,178743 \text{ Н} \cdot \text{м} = 178,7 \text{ Н} \cdot \text{мм},$$

где $\mu = 0,8$ (коэффициент трения покоя); $p = 1,5 \text{ атм} = 151\,988 \text{ Па}$ (давление в шине); $R = 0,08885 \text{ м}$ (радиус пятна контакта шины с поверхностью парковки).

Таким образом, требуемая величина $M_r^0 = 358 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

Результат численного эксперимента с использованием модели SolidWorks Motion (рис. 6) дает для искомой величины $M_k^{sw} = 175 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

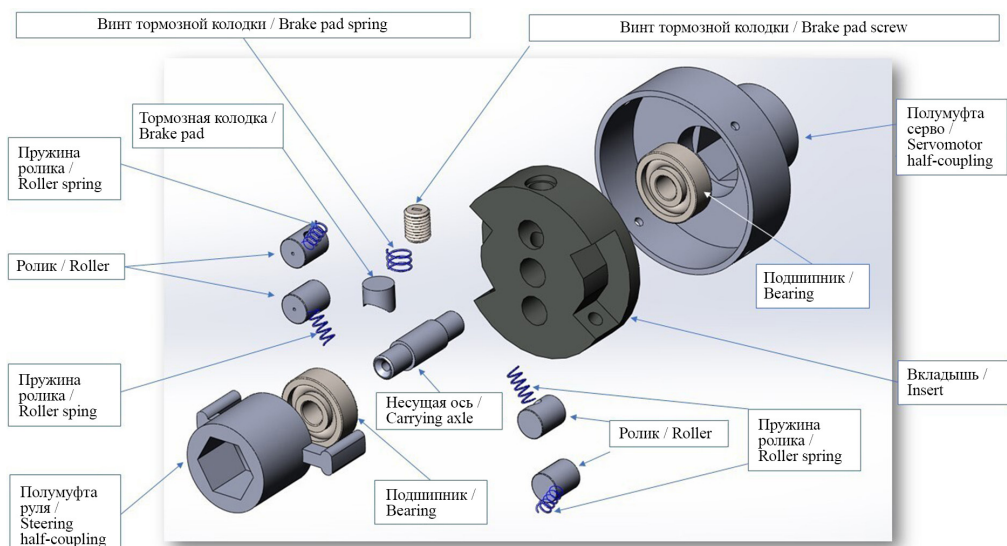


Р и с. 6. Крутящий момент на поворотном кулаке (вилке)

Fig. 6. The rotary cam torque

Для определения необходимых параметров механизма разработана аналогичная представленной на рисунке 3 модель, позволяющая проводить численные эксперименты независимо от модели всей системы управления, включающей в себя колеса, подвески, рулевую трапецию и т. д. Исследование такой громоздкой модели требует существенных вычислительных затрат.

Рассматриваемая модель (рис. 7) дополнена несущей осью, тормозной колодкой, пружиной и винтом тормозной колодки. Силы трения тормозной колодки о поверхность несущей оси определяются силой сжатия пружины тормозной колодки. Соответствующий момент трения относительно оси вращения аналогичен тому самому «полезному» моменту M_r , передаваемому от полумуфты рулевой трапеции на вал рулевой трапеции.



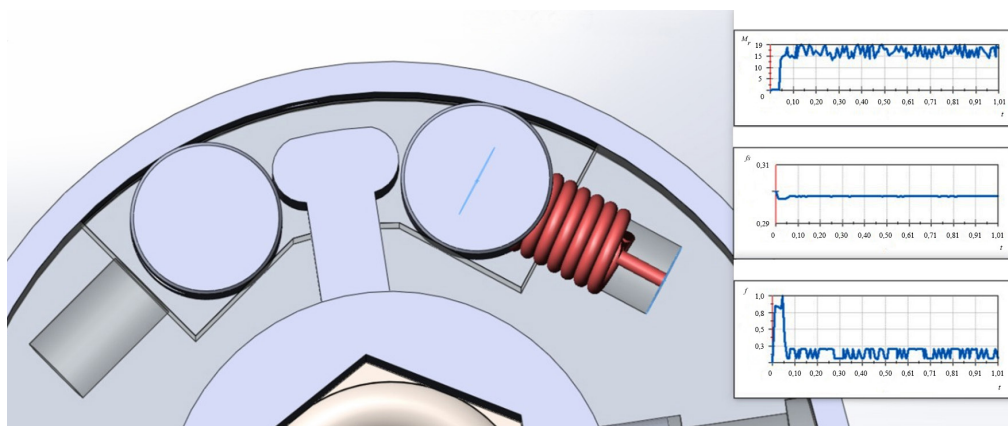
Р и с. 7. Сборка обгонной муфты

Fig. 7. Overrunning clutch assembly

Результаты исследования. Для определения необходимой жесткости пружин при заданной силе прижима тормозной колодки была проведена серия численных экспериментов. Если крутящий момент приложен на валу серво, то вал руля фиксируется. И наоборот: если момент приложен на валу руля, то вал серво фиксирован. Первую задачу будем условно называть прямой, вторую – обратной.

Рисунок 8 иллюстрирует механизм разблокирования муфты при очень малой ($k = 0,05 \text{ Н} \cdot \text{мм}$) жесткости пружин роликов. При этом сила прижима тормозной колодки задана значением $P = 0$. В этом случае функция разблокирования обеспечивается только инерционными свойствами вкладыша, поскольку трение во вращательной кинематической паре «ось несущая – вкладыш» в рамках данной модели также не учитывается, и сопряжение работает как идеальный подшипник скольжения.

При возрастании крутящего момента (первый сверху график на рисунке 8) происходит разблокировка муфты, и сила трения в кинематической паре «ролик – обойма полумуфты серво» быстро уменьшается (третий сверху график). На рисунке 8 приведен также график (второй сверху) зависимости от времени силы упругого сжатия пружины ролика. Вначале эта сила увеличивается, затем значение ее стабилизируется. В целом механизм разблокирования муфты показан в видеоролике⁶. Величина внешнего крутящего момента, соответствующая установившемуся движению, составляет $18 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.



Р и с. 8. Механизм разблокирования муфты

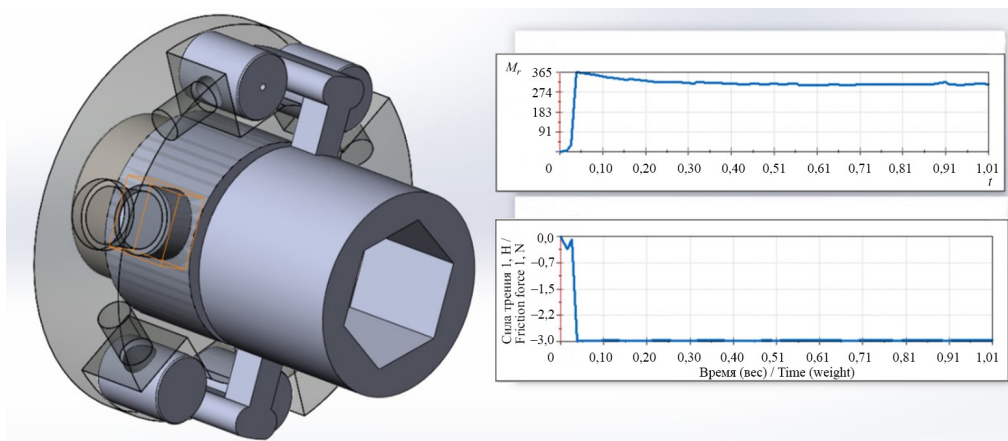
Fig. 8. Clutch release mechanism

В рассматриваемых условиях, то есть при малых значениях жесткости пружин роликов, функция разблокирования наблюдается явным образом. Однако при решении обратной задачи, то есть при фиксации вала руля и нагружении внешним крутящим моментом вала сервомотора, можно наблюдать слишком малую величину момента трения покоя, которая значительно меньше ранее определенного нами момента $M_r^0 = 358 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, необходимого для поворота рулевых колес. Так,

⁶ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/vYzM/dJYeQxoY6>

в рассматриваемом случае ($k = 0,05 \text{ Н} \cdot \text{мм}$) величина крутящего момента трения, соответствующая переходу от статического трения к кинематическому, составила всего лишь $79 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

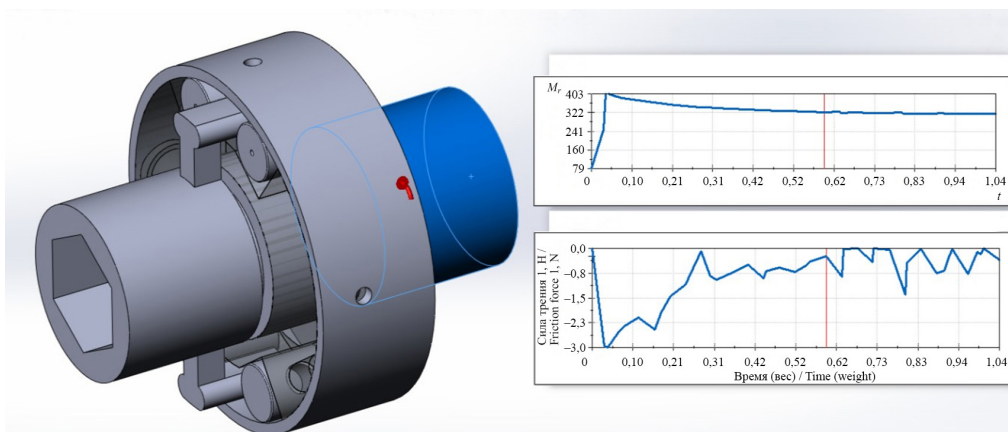
Требуемый функционал муфты в рамках данной модели может быть обеспечен увеличением жесткости пружин роликов k и силы прижима тормозной колодки. При достаточно высоком значении момента трения в кинематической паре «вкладыш – несущая ось» будет обеспечено требуемое торможение вкладыша в начальном моменте движения и, как следствие, деформация пружин роликов с последующим разблокированием муфты. Так, при $k = 1,00 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ и силы прижима колодки $P = 10 \text{ Н}$ наблюдаем надежное разблокирование муфты в начальный момент движения и с моментом $310 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ при установившемся движении (рис. 9). На рисунке 9 аналогично случаю, представленному на рисунке 8, при возрастании крутящего момента (первый сверху график на рисунке 9) происходит разблокировка муфты, и сила трения в кинематической паре «ролик – обойма полумуфты серво» быстро уменьшается (второй сверху график).



Р и с. 9. Крутящий момент приложен к валу руля

F i g. 9. The torque is applied to the steering shaft

Рисунок 10 иллюстрирует решение обратной задачи. При этом крутящий момент, приложенный к валу сервомотора, достигает в статическом состоянии величины $403 \text{ Н} \cdot \text{мм}$. Для получения «полезного» значения момента M_r , реализуемого сервомотором, необходимо вычесть из найденного значения величину момента трения, обусловленного прижимом тормозной колодки. На графике (первый сверху) это значение соответствует точке с абсциссой $t = 0$. Итак, в нашем случае полезная величина $M_r = 403 - 79 = 324 \text{ Н} \cdot \text{мм}$. На рисунке 10 приведена также зависимость от времени силы трения в кинематической паре «ролик – обойма полумуфты серво» (второй график сверху), которая быстро достигает максимальной величины, соответствующей силе трения покоя в начальной стадии движения.



Р и с. 10. Крутящий момент приложен к валу сервомотора

F i g. 10. The torque is applied to the shaft of the servo motor

Для пары значений $k = 2 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ и $P = 10 \text{ Н}$ аналогичная разность для крутящего момента составила $M_r = 500 - 79 = 421 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, что больше M_r^0 и, таким образом, удовлетворяет заданным требованиям для поворота рулевых колес.

Проведенная серия численных экспериментов позволила исследовать качественные особенности механизма и сделать приблизительные оценки для параметров, задаваемых количественно.

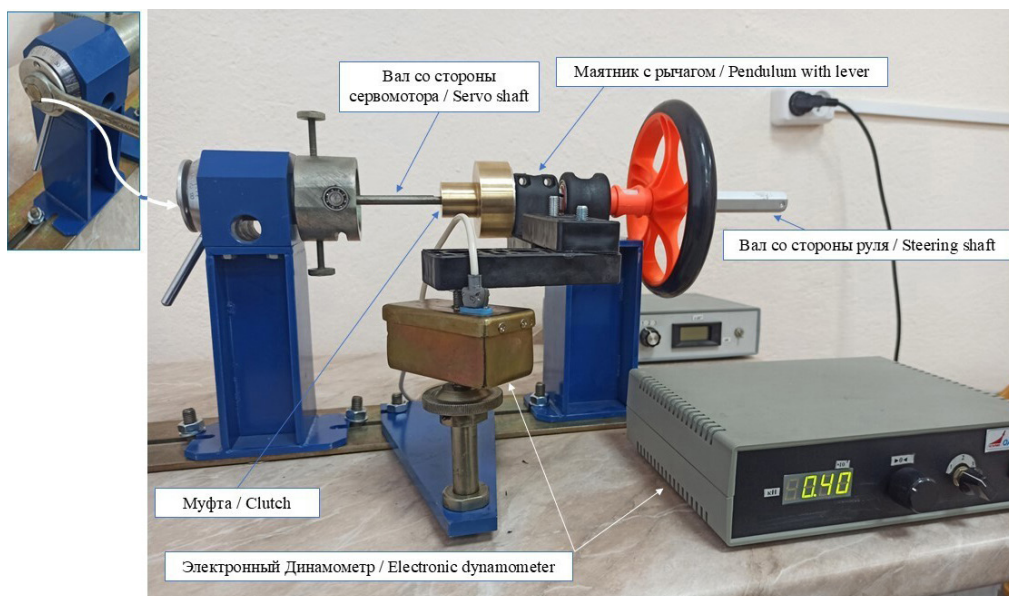
Для испытания обгонной муфты в ее натурном исполнении был собран экспериментальный стенд (рис. 11). Стенд включает в себя обгонную муфту, вал со стороны сервомотора, вал со стороны руля, маятник с рычагом (в рулевом механизме он предназначен для поворота рулевой трапеции и рулевых колес), электронный динамометр.

Назначение стенда состоит в тестировании основной функции муфты – комбинированного управления, непосредственно связанного с блокировкой и разблокировкой муфты. Этот функционал уже был протестирован нами на виртуальной модели в процессе решения двух задач: прямой и обратной.

В процессе натурального эксперимента для прямой задачи вал сервомотора освобождается и, таким образом, свободно поворачивает как маятник, так и вал руля. Этот вариант работы муфты соответствует телематическому режиму управления. При этом динамометр фиксирует крутящий момент, передаваемый на рулевую трапецию.

В процессе натурального эксперимента для прямой задачи вал сервомотора фиксируется ключом (рис. 11). Это состояние соответствует фиксированному валу сервомотора при телематическом управлении. При этом вал руля свободно поворачивает маятник с рычагом, а динамометр фиксирует передаваемый на рулевую трапецию крутящий момент аналогично предыдущему эксперименту.

Полученные численные значения свидетельствуют о том, что передаваемый муфтой крутящий момент как в первом (ручном), так и во втором (телематическом) режимах управления в пересчете к требуемой величине крутящего момента $M_r^0 = 358 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, соответствует заданному необходимому значению этого момента.



Р и с. 11. Экспериментальный стенд для испытания обгонной муфты

F i g. 11. Experimental bench for overrunning clutch test

Процедуру тестирования электромобиля как в натурном, так и в виртуальном исполнении иллюстрирует видеоролик⁷.

Обсуждение и заключение. Разработана интегрированная натурная и САх-модель прототипа электромобиля с комбинированным ручным и программным (дистанционным) управлением.

Обгонная муфта двунаправленного действия, установленная между валом сервомотора и валом руля, обеспечивает функцию «подруливания» со стороны пилота наряду с дистанционным (программным) управлением.

Проведенные численные эксперименты с САх-моделью и натурные эксперименты подтверждают работоспособность муфты и системы управления в целом.

Проект представляет собой законченную разработку, выполненную на базе принципов системного инжиниринга, позволяющего объект проектирования и все его подсистемы рассматривать как единое целое и в конструкторском, и в функциональном аспектах. Параметрические свойства разработанных САх-моделей обеспечивают возможность масштабирования и адаптации проекта для решения широкого круга практических задач проектирования конструкций данного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Афанасьев А.Н., Сазонов М.В. Перспективы развития электротранспорта. *Символ науки*. 2020;(12-1):29–31. URL: <https://os-russia.com/SBORNIKI/SN-2020-12-1.pdf> (дата обращения: 23.09.2024).

⁷ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/smFo/Ygfm7ecce>

- Afanasyev A.N., Sazomov M.V. [Prospects for the Development of Electric Transport]. *Simvol Nauki*. 2020;(12-1):29–31. (In Russ.) Available at: <https://os-russia.com/SBORNIKI/SN-2020-12-1.pdf> (accessed 23.09.2024).
2. Мубаракшина Р.Р. Валеева Ю.С. Аналитика развития рынка электротранспорта в России. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Экономика и управление*. 2022;53(1):57–65. <https://doi.org/10.25686/2306-2800.2022.1.57>
Mubarakshina R.R., Valeeva Yu.S. Market Development Analysis Electric Transport in Russia. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Economics and Management*. 2022;53(1):57–65. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25686/2306-2800.2022.1.57>
 3. Малышев В.П., Русскова И.Г. Электромобили в РФ: за и против. *Вестник МАНЭБ*. 2023;28(3):23–26. <https://www.elibrary.ru/sdidthp>
Malyshev V.P., Russkova I.G. Electric Vehicles in the Russian Federation: Pro and Contra. *Vestnik IAELPS*. 2023;28(3):23–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/sdidthp>
 4. Левицкий Е.Н., Зеленина А.Н., Львович И.Я. Влияние производства и эксплуатации электромобилей на экологию. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2023;46(3):6–7. <https://www.elibrary.ru/atnxtl>
Levitskiy E.N., Zelenina A.N., Lvovich I.Ya. The Impact of the Production and Operation of Electric Vehicles on the Environment. *Vestnik Voronezhskogo Instituta Vysokih Tekhnologij*. 2023;46(3):6–7. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/atnxtl>
 5. Macharia V.M., Garg V.K., Kumar D. A Review of Electric Vehicle Technology: Architectures, Battery Technology and its Management System, Relevant Standards, Application of Artificial Intelligence, Cyber Security, and Interoperability Challenges. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2023:e12083. <https://doi.org/10.1049/els2.12083>
 6. Buechel M., Frtunikj J., Becker K., Sommer S., Buckl C., Armbruster M., et al. An Automated Electric Vehicle Prototype Showing New Trends in Automotive Architectures. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2015:1274–1279. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.209>
 7. Hubert M.A., Valdiero A.C., Goergen R., Stein E., Regner R.R., Maciel B.-H. Low-Cost Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Project for Autonomous Electric Vehicle Prototype. *Proceedings of IDEAS 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2020;198:416–424. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55374-6_41
 8. Waragai M., Takayama T. Development of a High-Speed and Low-Torque Loss Two-Way Clutch. *Robomech Journal*. 2022;9:21. <https://doi.org/10.1186/s40648-022-00236-6>
 9. Controzzi M., Cipriani C., Carrozza M.C. Miniaturized Non-Back-Drivable Mechanism for Robotic Applications. *Mechanism and Machine Theory*. 2010;45(10):1395–1406. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2010.05.008>
 10. Controzzi M., Luciani L.B., Montagnani F. Unified Approach to Bi-Directional Non-Back Drivable Roller Clutch Design. *Mechanism and Machine Theory*. 2017;116:433–450. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.06.010>
 11. Nagler N., Lohrengel A. Improved Design Criterion for Frictionally Engaged Contacts in Overrunning Clutches. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2021;85:1053–1063. <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00496-5>
 12. Siedel T., Lukac D., Geppert T., Benckendorff C., Hild M. Operating Characteristics of a Passive, Bidirectional Overrunning Clutch for Rotary Joints of Robots. *XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*. 2011. <https://doi.org/10.1109/ICAT.2011.6102087>
 13. Imran M.N., Baharom M.B. Simplified Modelling Method to Predict Output Speed of an Overrunning Clutch Using ADAMS/Solver Subroutine. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(22):13038–13041. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1116_5343.pdf (accessed 23.09.2024).

14. Zhao H., Wang B., Zhang G., Li J. Concept of a New Overrunning Clutch with the Characteristic of Reverse Force Transfer at High Speed. *Engineering Reports*. 2021;3(11):e12415. <https://doi.org/10.1002/eng2.12415>
15. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Дивин А.Г., Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С. Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы. *Инженерные технологии и системы*. 2021;31(4):609–627. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Divin A.G., Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S. Integrated Mobile Robotic Platform Model. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):609–627. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>
16. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Ермишов И.А. Интегрированные модели транспортной платформы мобильного робота. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(11):528–534. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-11-528-529>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Ermishov I.A. Integrated Models of Mobile Robot Transport Platform. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*. 2023;(11):528–534. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-11-528-529>
17. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Ермишов И.А. Программное обеспечение для траекторного управления виртуальным мобильным роботом на базе Ardupilot. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022;(8):386–389. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-386-390>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Ermishov I.A. Ardupilot-Based Virtual Mobile Robot Trajectory Control Software. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*. 2022;(8):386–389. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-386-390>
18. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Пьянзин А.М. Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(3):464–479. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Pjanzin A.M. E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):464–479. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479>
19. Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А. Кинематическое управление движением колесных транспортных средств. *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2015;25(2):254–266 <https://doi.org/10.20537/vm150210>
Berestova S.A., Misyura N.E., Mityushov E.A. Kinematic Control of Vehicle Motion. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye Nauki*. 2015;25(2):254–266. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20537/vm150210>
20. Васильев А.В. Обобщенная классификация мобильных роботов. *Экстремальная робототехника*. 2014;25(1):41–45. <https://www.elibrary.ru/wtdcyt>
Vasiliev A.V. Aspects of Mobile Robots Classification. *Extreme Robotics*. 2014;25(1):41–45. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/wtdcyt>
21. Sharp R.S., Granger R. On Car Steering Torques at Parking Speeds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2003;217(2). <https://doi.org/10.1177/095440700321700202>

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, SPIN-код: 5861-0050, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, SPIN-код: 3406-3859, my_pk@mail.ru

Овчинников Александр Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6796-1824>, ovchinnikov.alexander@rambler.ru

Вклад авторов:

М. В. Чугунов – формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации, осуществление научно-исследовательского процесса, включая САХ-моделирование.

И. Н. Полунина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая САХ-моделирование; создание и подготовка рукописи, включая его перевод на иностранный язык; визуализация результатов исследования.

А. Ю. Овчинников – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение натурных экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 02.12.2024; поступила после рецензирования 18.12.2024;
принята к публикации 27.12.2024*

About the authors:

Mikhail V. Chugunov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Chair of Design and Technology Informatics, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, SPIN-code: 5861-0050, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Cand.Sci. (Ped.), Associate Professor of Chair of Design and Technology Informatics, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, SPIN-code: 3406-3859, my_pk@mail.ru

Alexander Yu. Ovchinnikov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6796-1824>, ovchinnikov.alexander@rambler.ru

Authors contribution:

M. V. Chugunov – formulating the idea, goals and objectives of the study; preparing the manuscript: critical analysis of the manuscript draft and comments and of the corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages, carrying out of the studies including CAX modeling.

I. N. Polunina – carrying out the studies including CAX modeling; preparing the manuscript including its translation into a foreign language; visualizing the study results.

A. Yu. Ovchinnikov – carrying out the studies including the carrying out of physical experiments and collecting of data; preparing the manuscript: writing a manuscript draft.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 02.12.2024; revised 18.12.2024; accepted 27.12.2024