

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569204>

Оригинальное исследование



Принципы адаптивного управления устойчивостью реконфигурируемого шасси с планетарно-колёсным движителем

Р.Ю. Добрецов^{1, 2}, А.О. Канинский², Д.С. Попов¹, И.Б. Прямыцын¹¹ Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Российская Федерация;² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Проблема управления поперечной устойчивостью является актуальной для транспортных платформ в целом. При проектировании транспортных средств различных типов применяются известные методы управления устойчивостью. Однако, данные методы не всегда применимы при проектировании малогабаритных необитаемых платформ, что вызывает необходимость разработки специальных решений.

Цель работы — обоснование целесообразности применения уравнивающих механизмов, увеличивающих устойчивость против поперечного опрокидывания малогабаритных необитаемых мобильных платформ.

Материалы и методы. Исследование построено на анализе технических решений, реализованных в конструкции платформ экстремальной проходимости, а также планетоходов. В качестве основных инструментов выступают известные методы теории движения транспортных машин.

Результаты. Рассмотрены варианты систем управления поперечной устойчивостью малогабаритных автономных платформ. Сделаны выводы о применимости различных конструкций уравнивающих механизмов для решения задачи противодействия потери устойчивости и опрокидыванию.

Заключение. Рассмотренные принципы стабилизации поперечной устойчивости могут применяться на специальных малогабаритных мобильных необитаемых машинах практически вне зависимости от типа движителя. Дальнейшие исследования в этом направлении предполагают построение математических моделей, позволяющих оценить потребные кинематические, энергетические и мощностные параметры системы адаптивной стабилизации поперечной устойчивости, а также испытания на макете мобильной платформы.

Ключевые слова: управление поворотом; транспортная машина; проходимость; подвижность; устойчивость.

Как цитировать:

Добрецов Р.Ю., Канинский А.О., Попов Д.С., Прямыцын И.Б. Принципы адаптивного управления устойчивостью реконфигурируемого шасси с планетарно-колёсным движителем // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 1. С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569204>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569204>

Original Study Article

Principles of adaptive control of roll stability of reconfigurable chassis with planetary-wheeled propulsion system

Roman Yu. Dobretsov^{1, 2}, Andrey O. Kaninsky², Dmitry S. Popov¹, Igor B. Pryamitsyn¹

¹ Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Roll stability control is a relevant issue in transport platforms' design in general. Well-known methods of roll stability control are used in development of vehicles of various types. However, these methods can not always be applied in design of small unmanned platforms, so development of special solutions is needed.

AIM: Justification of feasibility of application of anti-roll balancing mechanisms in small unmanned vehicles.

METHODS: The study is based on the analysis of technical solutions implemented in the design of platforms with extreme off-road capabilities and space rovers. Well-known methods of fundamentals of vehicle dynamics are the main tools of the study.

RESULTS: The options of roll stability control system for small unmanned platforms are described. The conclusions regarding feasibility of different options of balancing mechanisms for addressing the issue of counteraction of stability losing and overturning are made.

CONCLUSIONS: The discussed principles of roll stability control could be implemented in special small unmanned vehicles with any type of propulsion system. The further research in this field considers building of mathematical models capable of evaluating the required kinematics and power properties of the system of adaptive roll stability control, as well as testing using the mockup of a moving platform.

Keywords: steering control; transport vehicle; off-road capability; vehicle mobility; roll stability.

To cite this article:

Dobretsov RYu, Kaninsky AO, Popov DS, Pryamitsyn IB. Principles of adaptive control of roll stability of reconfigurable chassis with planetary-wheeled propulsion system. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(1):45–53. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569204>

Received: 09.09.2023

Accepted: 01.12.2023

Published online: 15.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Проблема управления поперечной устойчивостью движения актуальна для многих типов транспортных машин и мобильных платформ. Потеря поперечной устойчивости может выражаться в виде заноса и опрокидывания. В теории движения транспортных машин различают частичный и полный занос. В последнем случае шасси становится неконтролируемым, в процессе поперечного скольжения может встретиться с препятствием (например, в городских условиях, — поребрик) и опрокинуться.

Для борьбы с развитием заноса используется принцип создания стабилизирующего крутящего момента за счёт перераспределения сил тяги между ведущими колёсами бортов. Для легковых автомобилей это реализуется в серии за счёт системы динамической стабилизации (см., например, работы [1, 2] и др.). Для платформы с индивидуальным электромеханическим приводом колёсных блоков аналогичный эффект возможен при перераспределении крутящих моментов между соответствующим тяговыми электродвигателями.

При математическом моделировании опрокидывания рассматривают два критических случая — начало опрокидывания (нормальная реакция под движителем одного борта становится равной нулю) и полное опрокидывание перенос центра — тяжести шасси через критическую линию, например, для колёсной монокопрусной машины — линию, проходящую через центры пятен контакта колёс борта, не потерявшего связь с грунтом. После начала опрокидывания машину трудно контролировать на траектории, хотя, например, при снижении скорости движения, развитие опрокидывания можно исключить.

Некоторые типы шасси обладают специфическим потенциалом конструкции. Например, реконфигурируемое шасси с планетарно-колёсным движителем (ПКД, см., например, описание в патенте [3]) может дополнительно увеличить устойчивость против поперечного опрокидывания за счёт разворота колёсных блоков одного борта (рис. 1).

Запас устойчивости позволит систематически двигаться по откосу с углом наклона

$$\beta = \arctg(\Delta h / B^*).$$

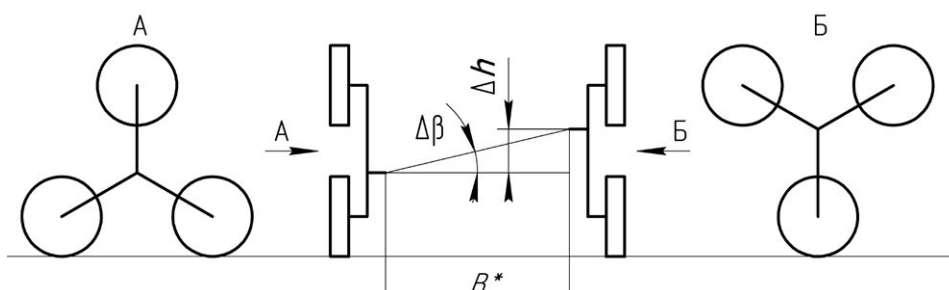


Рис. 1. Схема к оценке запаса поперечной устойчивости по опрокидыванию для реконфигурируемого шасси.

Fig. 1. The diagram illustrating anti-roll capabilities of reconfigurable chassis.

Значение Δh будет зависеть от расстояния между осями колёс, входящих в колёсный блок ПКД. Для конкретной конструкции несложно оценить значение этого угла, но обеспечение возможности применения этой конструктивной особенности шасси с ПКД потребует дополнительных прочностных расчётов, а диапазон изменения угла наклона при отсутствии подвески будет зависеть в основном от упругости шин. Кроме того, шасси должно быть реконфигурировано до начала движения по откосу, что не всегда возможно оперативно обеспечить.

Родственное техническое решение описано, например, работе [4]: шасси может ограниченно адаптироваться к геометрии опорной поверхности за счёт изменения конфигурации.

В общем случае к моделированию процесса потери поперечной устойчивости реконфигурируемого шасси с ПКД можно подойти в концепции рассмотрения влияния на поперечную устойчивость произвольно приложенной внешней силы [5]. Действие внешних сил будет определять значения критических скоростей движения и углов поперечного наклона опорной поверхности. В иллюстративном плане полезно рассмотреть традиционные для отрасли частные случаи движения мобильной платформы на «чистом косогоре» (т.е. в случае движения шасси поперёк склона) и на «вираже» (см. [6–8]).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является обоснование целесообразности применения уравнивающих механизмов, увеличивающих устойчивость против поперечного опрокидывания малогабаритных необитаемых мобильных платформ.

Решаемые задачи:

- рассмотреть математическое описание характерных опасных ситуаций, приводящих к потере поперечной устойчивости по опрокидыванию и проиллюстрировать влияние уравнивающего механизма на поперечную устойчивость шасси;
- предложить варианты построения уравнивающих механизмов, позволяющих улучшить поперечную

устойчивость малогабаритных необитаемых транспортных средств и проанализировать особенности таких механизмов на уровне схем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе подходов лежат результаты анализа технических решений в области создания платформ с экстремальной проходимостью от фирм «Летуно» и «Локхид» (США) [3] и «Мэиле» (Швейцария), подходов к созданию планетоходов во ВНИИ Транспортного Машиностроения (РФ, Санкт-Петербург), методов теории движения транспортных машин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поперечная устойчивость при повороте на косогоре

При моделировании поперечной устойчивости на косогоре более сложной ситуацией оказывается случай поворота в сторону подъёма.

Принимаются следующие допущения:

- движение равномерное, радиус поворота постоянный;
- свойства опорной поверхности изотропны;
- центр тяжести платформы находится в ее геометрическом центре;
- буксование и юз колёс отсутствуют;
- упругость шин и влияние системы поддрессирования не рассматривается.

Отсутствие системы поддрессирования и гипотеза о симметрии конфигурации колёсных блоков бортов для шасси с ПКД упрощают расчётную схему, представленную на рис. 2. Существенных отличий от случая, рассматриваемого для двухосного автомобиля (например, в публикации [6]) не наблюдается.

На рис. 2 использованы следующие обозначения: C — центр тяжести платформы; B — ширина колеи; h_c — высота центра тяжести; β — угол поперечного наклона опорной поверхности; G — вес платформы; $Z_{1,2}$ — нормальные реакции под колёсами внутреннего (отстающего) и внешнего (забегающего) бортов; Y — суммарная поперечная реакция, уравнивающая поперечную силу, обусловленную действием инерции:

$$P_{jy} = MV^2/R.$$

В последнем выражении, в свою очередь, M — масса платформы, V — скорость центра масс, R — радиус поворота.

Соответственно, для оценки значений критических по началу опрокидывания скорости движения платформы и угла наклона опорной поверхности при принятых допущениях можно использовать уравнение:

$$P_{jy} + G \left(\sin \beta - \frac{B}{2h_c} \cos \beta \right) = 0.$$

В частности, получим:

$$V = \sqrt{gR \left(\frac{B}{2h_c} \cos \beta - \sin \beta \right)}$$

и

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{B}{2h_c} - \frac{V^2}{gR} \frac{1}{\cos \beta}.$$

Введение уравнивающей массы m создаёт стабилизирующий момент, пропорциональный плечу y_m ее выноса относительно точки C :

$$T = mgy_m$$

и

$$V = \sqrt{gR \left(\frac{m}{M} \frac{y_m}{h_c} + \frac{B}{2h_c} \cos \beta - \sin \beta \right)}.$$

Из последнего выражения следует, что критическая скорость по началу опрокидывания нелинейно увеличивается с ростом стабилизирующего момента (чему способствуют увеличение относительной массы груза m/M и соотношения y_m/h_c — чем больше масса груза и ниже расположение центра тяжести платформы, тем эффективнее влияние стабилизатора).

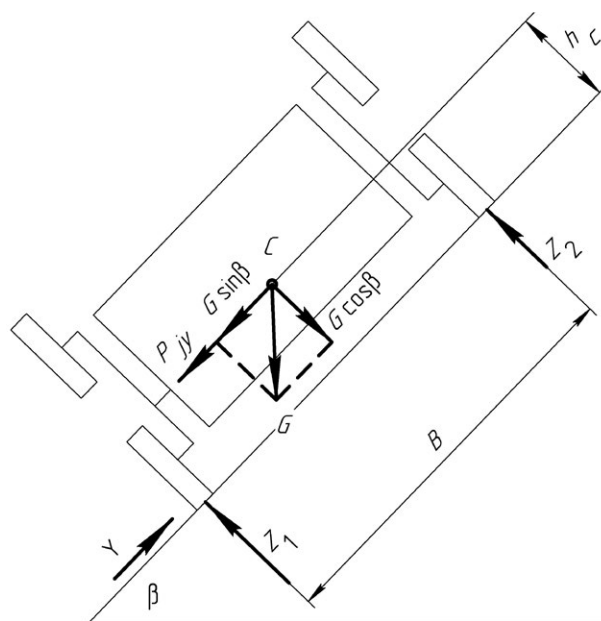


Рис. 2. Расчётная схема для анализа устойчивости при повороте на косогоре в сторону спуска.

Fig. 2. The diagram for the analysis of roll stability in the case of turning on the inclination towards the bottom side.

Аналогичное влияние стабилизирующий момент оказывает и на значения критического наклона дорожного полотна, однако, уравнение для оценки будет иметь более сложный вид:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{B}{2h_c} - \left(\frac{V^2}{gR} - \frac{m}{M} \frac{y_m}{h_c} \right) \frac{1}{\cos \beta}.$$

В практических задачах такое уравнение целесообразно решать итерационными методами.

Например, $V=2$ м/с; $M=80$ кг; $m/M=0,2$; $B=0,4$ м; $y_m=0,75B$; $h_c=0,195$ м и $R=2B$ м, получим приращение значения критического угла по опрокидыванию (по сравнению со случаем отсутствия стабилизатора) $\Delta\beta=6,3^\circ$ (приблизительно 25%).

Поперечная устойчивость при повороте на вираже

При моделировании потери устойчивости в случае поворота на вираже принимают те же допущения, что и при повороте на косогоре. Схема сил, действующих на платформу, показана на рис. 3. Центр поворота располагается в точке О, теоретический радиус поворота составляет $R = |OC|$.

Для оценки значений, критических по началу опрокидывания, скорости движения платформы и угла наклона опорной поверхности при принятых допущениях можно составить уравнение:

$$(P_{jy} \cos \beta - G \sin \beta) h_c - (P_{jy} \sin \beta + G \cos \beta) \frac{B}{2} = 0.$$

Откуда для рассматриваемых параметров можно получить следующие выражения:

$$V = \sqrt{Rg \frac{(2h_c \operatorname{tg} \beta + B)}{1 - B \operatorname{tg} \beta}},$$

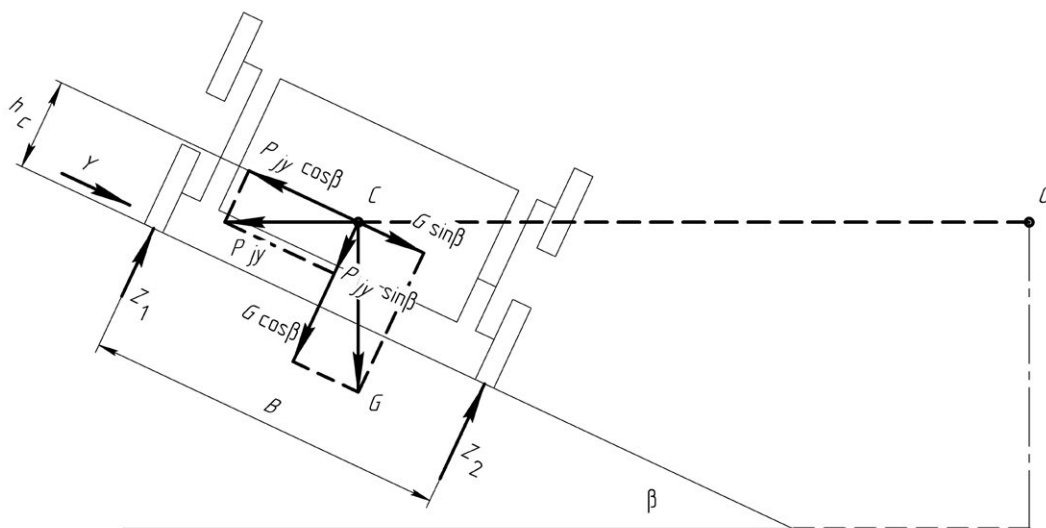


Рис. 3. Расчётная схема для анализа устойчивости при повороте на вираже.

Fig. 3. The diagram for the analysis of roll stability in the case of cornering on inclined surface.

$$\beta = \arctg \left(\frac{2V^2 h_c - gRB}{2gRh_c + V^2 B} \right).$$

При учёте стабилизатора уравнение для критической скорости принимает вид:

$$V = \sqrt{gR \frac{(2h_c \operatorname{tg} \beta + B) + 2y_m (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) m/M}{1 - B \operatorname{tg} \beta}}.$$

Данное выражение можно использовать при значениях $\beta < 45^\circ$, при дальнейшем росте угла наклона опорной поверхности расчётная схема должна быть скорректирована.

Для оценки изменения значения критического угла может быть рассмотрено уравнение:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2gR \frac{m}{M} \frac{y_m}{\cos \beta} + (2V^2 h_c - gRB)}{2gRh_c + V^2 B}.$$

В практических случаях такое уравнение также целесообразно решать итерационными методами, однако, из опыта известно, что шасси с низким расположением центра тяжести малочувствительны к потере поперечной устойчивости по опрокидыванию на вираже.

Принципы управления поперечной устойчивостью

Принцип активного управления поперечной устойчивостью можно реализовать путём создания стабилизирующего момента за счёт использования некоторого груза. Груз может быть «внешним», но для малогабаритных платформ на электрической тяге в качестве противовеса целесообразно использовать бортовой накопитель энергии, так как он обладает существенной массой. Можно предложить три основных варианта:

- маятниковый стабилизатор;
- вращающийся стабилизатор;
- поперечно-линейный стабилизатор.

Во всех случаях создание стабилизирующего момента достигается за счёт изменения положения бортового накопителя, что ведёт к менее эффективному использованию внутренних объёмов платформы и усложнению конструкции.

Маятниковый стабилизатор по принципу работы родственен маятниковому приводу, применяемому на сферических роботах (см. работу [9] и др.). Конструктивные ограничения затрудняют использовать этот принцип для шасси с ПКД. Практический интерес представляют оставшиеся варианты, но выбор схемного решения будет зависеть от особенностей конструкции мобильной платформы и спектра решаемых задач.

На рис. 4 приведены варианты схемы двухмассового (слева) и одномассового (справа) вращающегося стабилизатора. Цифрами обозначены: 1 — корпус машины,

2 — грузы, 3 — шариковый погон, 4 — вращающееся контактное устройство (ВКУ).

Конструкция шарикового погона аналогична решениям, используемым для поворота башни танка или командирской башенки военной гусеничной машины (примеры конструкций и методы расчёта приведены, например, в книге [10]). Там же рассматриваются апробированные конструкции электромеханического привода вращения и стопорения погона. ВКУ обеспечивает поддержание электрического контакта вращающейся части, опирающейся на погон, и корпуса мобильной платформы.

Двухмассовая схема позволяет более плавно перераспределять нагрузку между бортами и между осями. Эта схема является и более сложной. Использовать данный тип стабилизатора целесообразно, если на необитаемой платформе установлен погон для размещения специального оборудования.

На рис. 5 показана упрощённая схема стабилизатора с поперечным перемещением груза: одномассовая

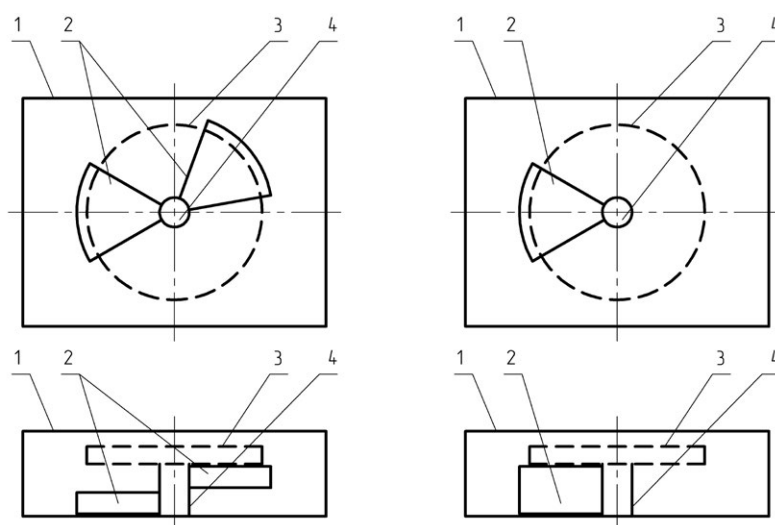


Рис. 4. Принцип управления устойчивостью вращением уравнивающей массы.

Fig. 4. The principle of roll stability control with balancing mass rotation.

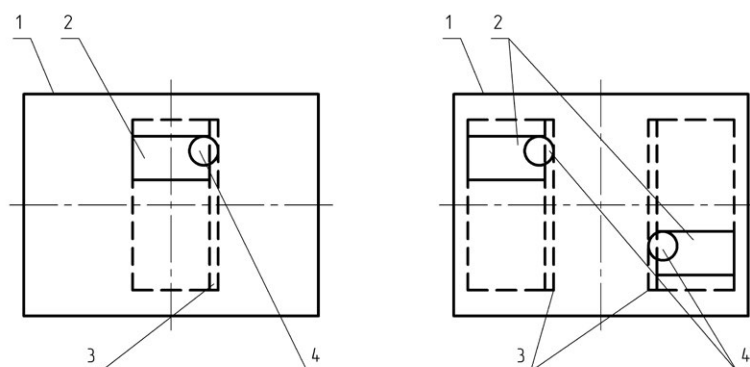


Рис. 5. Принцип управления устойчивостью поперечным перемещением уравнивающей массы.

Fig. 5. The principle of roll stability control with lateral moving of balancing mass.

(слева) и двухмассовая (справа). Цифрами обозначены: 1 — корпус машины, 2 — грузы, 3 — зубчатая рейка на направляющей раме, 4 — узел привода. В отличие от стабилизатора с вращающейся массой, нет необходимости в использовании ВКУ, что существенно упрощает узел и увеличивает надёжность. Такой стабилизатор не позволяет контролировать перераспределение масс по осям, однако проще по конструкции и (в одномассовом исполнении) компактнее.

Для любой из рассмотренных конструкций необходимо будет создать замкнутую (следящую) систему управления с обратной связью по углу крена корпуса мобильной платформы и положению груза (грузов).

Оценка быстродействия и выбор параметров привода перемещения уравнивающей массы представляет отдельную задачу и здесь не рассматривается.

Однако, следует указать, что точность позиционирования для обоих вариантов будет определяться боковым зазором в шестерённом зацеплении привода (то есть, в первую очередь, точностью изготовления зубчатых колёс), а при оценке быстродействия необходимо будет учесть мёртвый ход в зубчатом зацеплении (см., например, работы [11, 12]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для лёгкой необитаемой мобильной платформы с целью обеспечения адаптивного управления поперечной устойчивостью можно рекомендовать механизм поперечного перемещения уравнивающей массы.
2. Система адаптивного управления устойчивостью с вращательным движением двух уравнивающих масс позволит дополнительно контролировать продольное распределение нормальных нагрузок и может быть востребована при наличии у платформы погона для специального оборудования.
3. Рассмотренные принципы стабилизации поперечной устойчивости могут применяться на специальных малогабаритных мобильных необитаемых машинах практически вне зависимости от типа движителя.

Дальнейшие исследования в этом направлении предполагают построение математических моделей, позволяющих оценить необходимые кинематические, энергетические и мощностные параметры системы адаптивной стабилизации поперечной устойчивости, а также испытания на макете мобильной платформы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи. Р.Ю. Добрецов — составление плана статьи, распределение ролей в авторском коллективе, формулировка идеи построения вариантов схем уравнивания и принципов управления системой, работа

над текстом (сведение частей рукописи), общее руководство, а также решение методологических и практических вопросов; А.О. Канинский — проработка вариантов схем, работа над иллюстрациями, описанием схем, проведение расчётов, работа над текстом совместно с соавторами; Д.С. Попов и И.Б. Прямыцын — проработка вопросов, связанных с кинематикой и принципами построения, конструкции реконфигурируемого шасси, построение соответствующей части рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

Источник финансирования. Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 2023 года FNRG-2022-0026 1022031700007-3-2.2.2 «Исследование путей реализации адаптивной устойчивости наземного модульного реконфигурируемого робототехнического шасси лёгкого класса при движении в недетерминированной среде с различными полезными нагрузками».

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. R.Yu. Dobretsov — preparation of the article plan, distribution of roles in the authors' team, formulation of the idea for variants of balancing systems and principles of system management, text editing (consolidation of parts of the manuscript), general guidance, solving methodological and practical issues; A.O. Kaninsky — elaboration of the variants of systems, creating images, description of systems, making calculations, working on the text together with co-authors; D.S. Popov and I.B. Pryamitsyn — study of issues related to kinematics and principles of development and design of the reconfigurable chassis, writing the corresponding part of the manuscript.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. The results were obtained as part of the state task FNRG-2022-0026 1022031700007-3-2.2.2 "Research on ways to implement the adaptive stability of a ground-based modular reconfigurable robotic chassis of a light class when moving in a non-deterministic environment with various payloads" of Russian Ministry of Education and Science in 2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ushiroda Y., Sawase K., Takahashi N., et al. Development of Super AYC // *Technical review*. 2003. № 15. С. 73–76.
2. Ghosh J., Tonoli A., Amati N. A torque vectoring strategy for improving the performance of a rear wheel drive electric vehicle // In 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Montreal: IEEE, 2015. doi: 10.1109/VPPC.2015.7352887
3. Forsyth R.W., inventor; Lockheed Corp., assignee. Amphibious star-wheeled vehicle. United States Patent US 3348518 A. 1967 Oct 24. Дата обращения: 09.09.2023. Режим доступа: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/6e/fd/827d0492ed9502/US3348518.pdf>
4. Мамити Г.И., Плиев С.Х., Тедеев В.Б. Расчёт устойчивости трицикла с наклоняющимся кузовом // *Вестник машиностроения*. 2015. № 7. С. 30–34. EDN: WFAOPX
5. Бао Л., Добрецов Р.Ю., Войнаш С.А. и др. О возможности повышения управляемости и устойчивости движения колёсной машины путём применения управляемых дифференциалов // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023. № 19. С. 84–91. EDN: UYIGMO doi: 10.26160/2658-3305-2023-19-84-91
6. Добрецов Р.Ю., Поршнев Г.П. Автомобиль: поворот, устойчивость, проходимость. Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2011.
7. Павлов В.В., Кувшинов В.В. Теория движения многоцелевых гусеничных и колёсных машин: учеб. для вузов. Чебоксары: Чебоксарская типография №1, 2011.
8. Петренко А.М. Устойчивость специальных транспортных средств: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2013.
9. Chase R., Pandya A. A Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots // *Robotics*. 2012. Vol. 1, N. 1. P. 3–23. doi: 10.3390/robotics1010003
10. Носова Н.А., Галышев В.Д., Волков Ю.П. и др. Расчёт и конструирование гусеничных машин: учебник для вузов. Л.: Машиностроение, 1972.
11. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968.
12. Тайц Б.А., Марков Н.Н. Точность и контроль зубчатых передач. Л.: Машиностроение, 1978.

REFERENCES

1. Ushiroda Y, Sawase K, Takahashi N, et al. Development of Super AYC. *Technical review*. 2003;15:73–76.
2. Ghosh J, Tonoli A, Amati N. A torque vectoring strategy for improving the performance of a rear wheel drive electric vehicle. In: *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Motnreal: IEEE, 2015. doi: 10.1109/VPPC.2015.7352887
3. Forsyth RW, inventor; Lockheed Corp., assignee. *Amphibious star-wheeled vehicle*. United States Patent US 3348518 A. 1967 Oct 24. Cited: 09.09.2023. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/6e/fd/827d0492ed9502/US3348518.pdf>
4. Mamiti GI, Pliev SKH, Tedeev VB. Calculation of stability of a tricycle with a tilting body. *Vestnik mashinostroeniya*. 2015;7:30–34. (In Russ). EDN: WFAOPX
5. Bao L, Dobretsov RYu, Voinash SA, et al. On the possibility of increasing the controllability and stability of movement of a wheeled vehicle by using controlled differentials. *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2023;19:84–91. (In Russ). EDN: UYIGMO doi: 10.26160/2658-3305-2023-19-84-91
6. Dobretsov RYu, Porshnev GP. *Car: turning, stability, cross-country ability*. Saint Petersburg: Politekh. un-t; 2011.
7. Pavlov VV, Kuvshinov VV. *Theory of motion of multi-purpose tracked and wheeled vehicles: textbook. for universities*. Cheboksary: Cheboksarskaya tipografiya №1; 2011. (In Russ).
8. Petrenko AM. Stability of special vehicles: textbook. allowance. Moscow: MADI; 2013. (In Russ).
9. Chase R, Pandya A. A Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots. *Robotics*. 2012;1(1):3–23. doi: 10.3390/robotics1010003
10. Nosova NA, Galyshev VD, Volkov YuP, et al. *Calculation and design of tracked vehicles: a textbook for universities*. Leningrad: Mashinostroenie; 1972. (In Russ).
11. Litvin FL. *Gear theory*. Moscow: Nauka; 1968. (In Russ).
12. Tait BA, Markov NN. *Precision and control of gears*. Linigrad: Mashinostroenie; 1978. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*** Канинский Андрей Олегович,**
аспирант Высшей школы транспорта;
адрес: Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 29;
ORCID: 0000-0002-3057-1504;
eLibrary SPIN: 6057-7632;
e-mail: kaninsky@yandex.ru

Добрецов Роман Юрьевич,
д-р техн. наук,
профессор Высшей школы транспорта;
ORCID: 0000-0002-3827-0220;
eLibrary SPIN: 6168-3091;
e-mail: dr-idpo@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Andrey O. Kaninsky,**
Postgraduate of the Higher School of Transport;
address: 29 Polytechnicheskaya street, 195251 Saint Petersburg,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-3057-1504;
eLibrary SPIN: 6057-7632;
e-mail: kaninsky@yandex.ru

Roman Yu. Dobretsov,
Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Higher School of Transport;
ORCID: 0000-0002-3827-0220;
eLibrary SPIN: 6168-3091;
e-mail: dr-idpo@yandex.ru

Попов Дмитрий Сергеевич,
начальник конструкторского бюро;
ORCID: 0000-0003-4575-9195;
eLibrary SPIN: 2474-9479;
e-mail: d.popov@rtc.ru

Прямыцын Игорь Борисович,
начальник отдела;
ORCID: 0009-0007-1085-3233;
eLibrary SPIN: 5769-7603;
e-mail: pib@rtc.ru

Dmitry S. Popov,
Head of the Design Bureau;
ORCID: 0000-0003-4575-9195;
eLibrary SPIN: 2474-9479;
e-mail: d.popov@rtc.ru

Igor B. Pryamitsyn,
Head of Department;
ORCID: 0009-0007-1085-3233;
eLibrary SPIN: 5769-7603;
e-mail: pib@rtc.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author