

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –
проректор по научной работе,
д.м.н., профессор,
корреспондент РАН



(А. А. Костин)

2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН)

Диссертация «Использование модификаций метода стабилизаций связей для решения задач динамики физических систем» выполнена в Институте физических исследований и технологий РУДН.

Каспирович Иван Евгеньевич, 23.05.1993 года рождения в 2017 г. окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

В 2021 г. окончил аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдано в феврале 2023 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов»

Научный руководитель — Мухарлямов Роберт Гарабшевич, доктор физико-математических наук, профессор по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», профессор Института физических исследований и технологий РУДН (ИФИТ РУДН).

В настоящее время работает ассистентом института физических исследований и технологий РУДН, также работает ассистентом математического института имени С.М. Никольского (внутреннее совместительство).

Тема диссертационного исследования была утверждена в окончательной редакции на заседании Ученого совета факультета физико-математических и естественных наук РУДН 24.01.2023, протокол № 0201-08/06.

По итогам обсуждения диссертации «Использование модификаций метода стабилизаций связей для решения задач динамики физических систем» принято следующее заключение:

В диссертационной работе Каспировича И.Е. изложены результаты исследований по одному из основных направлений классической механики – решению обратных задач динамики. Предложены новые методы построения уравнений динамики систем со связями и алгоритмы численного решения соответствующих систем дифференциально-алгебраических уравнений. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Приводится краткая история становления и анализ проблемы стабилизации связей, обосновывается актуальность темы и основные методы исследования.

Для построения уравнений динамики используется принцип Гамильтона-Остроградского с определением множества виртуальных перемещений системы, соответствующих уравнениям связей и стабилизации. Предложено описание динамики системы уравнениями Лагранжа, Чаплыгина, Воронца, приведено решение задачи управления движением тележки по наклонной плоскости и сингулярной задачи качения шара на вращающейся плоскости. Приводится алгоритм построения уравнений возмущений связей, обеспечивающих заданные пределы отклонений в процессе интегрирования уравнений динамики системы. Предлагается способ составления уравнений динамики непосредственно по уравнениям связей с последующим приведением системы дифференциальных уравнений к форме уравнений Лагранжа с использованием модифицированных условий Гельмгольца. Устанавливается связь между функцией стабилизации связей и диссипативными силами, обеспечивающими стабилизацию. Исследуется задача моделирования движения многозвенной системы, представляющей мобильный робот или экзоскелет. Получено устойчивое численное решение уравнений динамики с голономными и неголономными связями. Разработаны методы стабилизации частных интегралов уравнений динамики систем оптимального управления. Предложено развитие решения задачи Лоудена об оптимальных траекториях космического аппарата с использованием известных интегралов движения.

Актуальность темы

Динамика механических систем обычно описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Систем, допускающих аналитическое решение немного. В основном для их решения используются численные методы, представляющие собой многократное повторение арифметических операций внутри цикла. Невозможность проведения компьютерных операций над числами с большим числом значащих цифр за конечное время приводит к необходимости их округления. Накопление ошибок округления на каждом шаге и ошибок численного интегрирования приводят к неустойчивости численного решения. Модификации методов стабилизации связей, использованные в работе, позволяют получить устойчивое численное решение относительно уравнений связей. Проблеме повышения эффективности приближенных методов решения дифференциальных уравнений посвящено значительное число публикаций и построение алгоритмов построения уравнений динамики и составления алгоритмов решения с требуемой точностью представляют актуальную задачу.

Новизна и практическая значимость

В диссертационной работе представлены новые подходы к решению задач построения уравнений движений и стабилизации связей. Составлены уравнения динамики в форме уравнений Лагранжа и уравнения динамики неголономных систем. Предложено решение сингулярных задач методом стабилизации связей. Исследованы решения системы уравнений в частных производных, следующих из обобщенных условиях Гельмгольца. Определена зависимость диссипативной функции от уравнений возмущений связей при решении обратной задачи динамики для систем, сводимых к уравнениям Лагранжа. В задаче оптимизации траектории космического аппарата переменной массы определены условия стабилизации интегралов уравнений динамики. Разработаны методы построения и численного решения уравнений динамики систем твердых тел, моделирующих движения антропоморфных и биомеханических систем. Результаты диссертационной работы могут быть непосредственно использованы для математического моделирования и проектирования мобильных роботов, экзоскелетов и систем, содержащих элементы различной физической природы.

Личное участие соискателя в получении результатов

Автор диссертационной работы Каспирович И.Е принимал непосредственное личное участие в исследованиях по теме по выбранной теме. С 2017 по 2021 гг.

Личный вклад автора состоит в

- определении выражения для оценки величины погрешности численного решения при заданной функции стабилизации связи;
- разработке метода решения задачи стабилизации динамики многозвенной системы, описывающей динамику робототехнических и биомеханических систем;
- стабилизации первых интегралов в задаче оптимизации движения космического аппарата переменной массы;
- установлении функциональной зависимости между диссипативной функцией и функцией стабилизации при решении обратных задач динамики;
- разработке алгоритма решения задач с обходом точек сингулярности при помощи метода стабилизации связей.

Личное участие автора в получении изложенных в диссертационной работе результатов подтверждено соавторами и отражено в совместных публикациях.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались и опубликованы в трудах всероссийских и международных конференций:

- 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи, 9-16 Сентября 2018;
- Четырнадцатая международная Казанская научная школа-конференция, 29-31 октября 2018, Казань;
- XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ 2019), 17-19 июня 2019, Москва;
- LI, LII, LIII, LIV, LV, LVI, LVII Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, май 2015-2021 года, Москва;
- XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 19-24 августа, 2019, Уфа;
- XI международная Четаевская конференция «Аналитическая механика, устойчивость и управление», 14-18 июня, Казань, 2017г.
- Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики, посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского», декабрь 2019, 2020, Москва;
- Применение технологий виртуальной реальности и смежных информационных систем в междисциплинарных задачах FIT-M 2020/2021, декабрь, Москва.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных результатов проведенных исследований подтверждена их сравнением с результатами численного моделирования и теоретических расчетов.

Выносимые на защиту положения диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, относящихся к списку ВАК РФ и Scopus, доложены на семинарах, конференциях и рабочих совещаниях.

Полнота изложения материалов диссертации обеспечена публикацией 33 работ соискателя, перечисленных в библиографии диссертации, в том числе, 3 статьи в рецензируемом журнале из «Перечня ВАК РФ» и 8 статей в рецензируемых журналах, индексированных WoS/Scopus.

Список публикаций в журналах перечня ВАК РФ

- [1] А. В. Борисов, И. Е. Каспирович, и Р. Г. Мухарлямов, “Управление динамикой составной конструкции со звеньями переменной длины,” *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*, no. 2, стр. 72–87, 2021, doi: 10.31857/S0572329921020057.
- [2] А. В. Борисов, И. Е. Каспирович, и Р. Г. Мухарлямов, “О математическом моделировании динамики многозвенных систем и экзоскелетов,” *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*, no. 5, стр. 162–176, 2021, doi: 10.31857/S0002338821040028.
- [3] А. В. Борисов, И. Е. Каспирович, О. В. Матухина, и Р. Г. Мухарлямов, “Моделирование лыжника-сноубордиста звеном переменной длины с двумя весовыми абсолютно твердыми участками,” *Вестник Казанского технологического университета*, том. 23, no. 6, стр. 78–85, 2020.
- [4] И. Е. Каспирович и Р. Г. Мухарлямов, “О методах построения уравнений динамики с учетом стабилизации связей,” *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*, no. 3, стр. 124–135, 2019, doi: 10.1134/S0572329919030115.
- [5] И. Е. Каспирович и Р. Г. Мухарлямов, “Численное решение задачи динамики с обходом сингулярностей,” *Вестник Казанского технологического университета*, том. 20, no. 9, стр. 89–92, 2017.
- [6] И. Е. Каспирович, В. А. Попова, и В. И. Санюк, “Исследование неголономности некоторых гамильтоновых полей,” *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: математика, информатика, физика*, no. 3, стр. 54–60, 2015.

Список публикаций в базе Scopus

- [7] I. E. Kaspirovich, “Application of constraint stabilization to nonholonomic mechanics,” 2016. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910921.
- [8] I. E. Kaspirovich and R. G. Mukharlyamov, “Constraint Stabilization Application to Chaplygin Systems,” 2018 Int. Russ. Autom. Conf., pp. 1–4, Sep. 2018, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501693.
- [9] I. Kaspirovich, “Constraint stabilization of two-wheeled sleigh,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 468, p. 012037, Dec. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/468/1/012037.
- [10] I. E. Kaspirovich and R. G. Mukharlyamov, “On Constructing Dynamic Equations Methods with Allowance for Stabilization of Constraints,” *Mech. Solids*, vol. 54, no. 4, pp. 589–597, Jul. 2019, doi: 10.3103/S0025654419040137.
- [11] I. E. Kaspirovich, K. Z. Askarova, and R. G. Mukharlyamov, “Determination of constraint stabilization parameters with multiple roots of characteristic equation,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1301, p. 012024, Oct. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1301/1/012024.
- [12] O. V. Matukhina, R. G. Mukharlyamov, and I. E. Kaspirovich, “On a Problem of Programming the Movement of a Mobile Robot,” in 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Oct. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271535.
- [13] I. E. Kaspirovich and R. G. Mukharlyamov, “Possible solutions of inverse dynamical problems with regards for nonlinear constraint stabilization function,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1705, p.

- 012013, Dec. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1705/1/012013.
- [14] A. V. Borisov, I. E. Kaspirovich, and R. G. Mukharlyamov, "DYNAMIC CONTROL OF COMPOUND STRUCTURE WITH LINKS OF VARIABLE LENGTH," *Mech. Solids*, vol. 56, no. 2, pp. 197–210, Mar. 2021, doi: 10.3103/S0025654421020059.
- [15] A. V. Borisov, I. E. Kaspirovich, and R. G. Mukharlyamov, "On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons," *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, vol. 60, no. 5, Sep. 2021, doi: 10.1134/S106423072104002X.

Положения, выносимые на защиту:

1. Решена задача стабилизации движения неголономных систем [7-9].
2. Решена задача по обходу сингулярных точек с помощью метода стабилизации связей в задачах динамики твердого тела со связями [5]
3. Получено соотношение между параметрами возмущений связей и диссипативной функцией при решении обратной задачи динамики [4], [10], [13].
4. Решена задача стабилизации связей при движении многозвенной системы. [1-3], [12], [14], [15].

Диссертация «Использование модификаций метода стабилизаций связей для решения задач динамики физических систем» соответствует специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин по направлениям исследования 5. Управление движением, наблюдаемость и идентификация механических систем, 14. Математическое и компьютерное моделирование кинематики и динамики механических систем, в том числе машин, приборов и их элементов при динамических, статических, тепловых и других видах воздействий.

Пометка «Для служебного пользования» не требуется, так как выполненная диссертационная работа и все публикации по ней носят открытый характер.

Текст диссертации был проверен на использование заимствованного материала без ссылки на авторов и источники заимствования. После исключения всех корректных совпадений иных заимствований не обнаружено.

Диссертация «Использование модификаций метода стабилизаций связей для решения задач динамики физических систем» Каспировича Ивана Евгеньевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Заключение рассмотрено и принято на заседании Института физических исследований и технологий РУДН (ИФИТ РУДН).

Присутствовало на заседании работников ППС ИФИТ РУДН 24 чел.

Результаты голосования: "за" – 24 чел., "против" – 0 чел., "воздержалось" 0 –чел., протокол № 0200-53/05 (№7) от 21.02.2023 г.

Директор ИФИТ РУДН
Доктор физ.-мат наук, профессор

О. Т. Лоза

*Подпись директора ИФИТ
заверяю, учений секретарь
ученно совета ИФИТ РУДН*



ЗУС / Зарядов И.С.