

87. *Yamano A., Shintani A., Ito T., Nakagawa C., Ijima H.* Influence of boundary conditions on a flutter-mill // J. Sound and Vibr. 2020. **478**. 115359.
88. *Shoole K., Mittal R.* Energy harvesting by flow-induced flutter in a simple model of an inverted piezoelectric flag // J. Fluid Mech. 2016. **790**. 582–606.
89. *Bae J., Lee J., Kim S.* et al. Flutter-driven triboelectrification for harvesting wind energy // Nature Commun. 2014. **5**. 4929.
90. *Tcho I.-W., Kim W.-G., Kim J.-K.* et al. A flutter-driven triboelectric nanogenerator for harvesting energy of gentle breezes with a rear-fixed fluttering film // Nano Energy. 2022. **98**. 10719.
91. *Shi B., Wang Q., Su H.* et al. Progress in recent research on the design and use of triboelectric nanogenerators for harvesting wind energy // Nano Energy. 2023. **116**. 108789.
92. *Wang Y., Cai S., Wang Y.* et al. Study on dynamics and power generation performance coupling of galloping-based triboelectric nanogenerator for harvesting broadband wind energy // Nano Energy. 2024. **130**. 110126.

Поступила в редакцию
16.07.2024

УДК 531:517.977

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КАФЕДРЫ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Ю. В. Болотин,¹ П. А. Кручинин,² С. С. Лемак³

Статья посвящена обзору научных достижений сотрудников кафедры прикладной механики и управления, лабораторий управления и навигации и математического обеспечения имитационных динамических систем в XXI веке.

Ключевые слова: управление механическими системами, навигация, имитация, биомехатроника.

The article is devoted to the review of scientific achievements of the staff of the Chair of Applied Mechanics and Control, the Laboratories of Control and Navigation and Mathematical Support of Simulation Dynamic Systems in the 21st century.

Key words: control of mechanical systems, navigation, simulation, biomechatronics.

DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-66-1-14

Кафедра прикладной механики, выделившаяся из кафедры теоретической механики в 1941–1942 гг., была сформирована из сотрудников, не уезжавших из Москвы в эвакуацию. Основные научные интересы этой группы специалистов были связаны с разделами механики систем твердых тел, развития которых требовала военная приборостроительная промышленность. Организаторами кафедры были профессора Борис Владимирович Булгаков и Иван Иванович Артоболевский, который исполнял обязанности заведующего кафедрой с 1941 по 1944 г. Наибольший вклад в становление кафедры внес Борис Владимирович Булгаков (1900–1952), заведовавший кафедрой с 1944 по 1952 г. Ему принадлежит также ряд выдающихся работ в области общей механики, теории колебаний, инерциальной навигации и теории управления. После безвременной кончины Б. В. Булгакова обязанности заведующего кафедрой с 1952 по 1956 г. исполнял профессор Яков Наумович Ройтенберг, а с 1956 по 2003 г. кафедрой руководил академик РАН Александр Юльевич Ишлинский —

¹Болотин Юрий Владимирович — доктор физ.-мат. наук, проф. каф. прикладной механики и управления мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: ybolotin@yandex.ru.

Bolotin Yuriy Vladimirovich — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Applied Mechanics and Control.

²Кручинин Павел Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент каф. прикладной механики и управления мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: pkruch@mech.math.msu.su.

Kruchinin Pavel Anatolievich — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Applied Mechanics and Control.

³Лемак Степан Степанович — доктор физ.-мат. наук, проф. каф. прикладной механики и управления мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: lemaks2004@mail.ru.

Lemak Stepan Stepanovich — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Applied Mechanics and Control.

один из крупнейших ученых-механиков, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственных премий.

С 2003 г. кафедрой руководит профессор, дважды лауреат Государственной премии Владимир Васильевич Александров.

С развитием систем автоматического управления на кафедре большое внимание уделяется задачам управления динамическими объектами, и название кафедры было изменено на “кафедра прикладной механики и управления”.

В русле исследований, проводимых на кафедре, на мехмате МГУ были созданы в 1987 г. лаборатория управления и навигации (с 2004 г. заведующий А. А. Голован) и в 1991 г. лаборатория математического обеспечения имитационных динамических систем (МОИДС) (с 2016 г. научный руководитель С. С. Лемак). Тесное научное сотрудничество связывает кафедру с лабораториями Института механики МГУ: лабораторией общей механики (заведующий Ю. М. Окунев) и лабораторией робототехники (и.о. заведующего В. М. Буданов). Сотрудники указанных лабораторий принимают активное участие в работе кафедры, в проведении физико-механического практикума, руководят научной работой студентов и аспирантов.

В настоящее время кафедра обучает студентов — специалистов и магистрантов. Ежегодно на кафедре прикладной механики и управления обучается около 50 студентов, 10 аспирантов механико-математического факультета и около 10 магистрантов факультета космических исследований (ФКИ), специализирующихся в области технологий виртуальной реальности. Общим для студентов 4-го курса отделения механики является годовой курс “Механика управляемых систем”, основы которого были заложены Я. Н. Ройтенбергом. В этом курсе рассматриваются современные методы анализа и синтеза управления движением механических систем. Специальные курсы отражают научные направления, развиваемые преподавателями кафедры и сотрудниками лабораторий. Студенты и аспиранты кафедры получают широкое представление об актуальных направлениях в современной механике управляемых систем, что является важным элементом университетского образования. Совместно с Институтом механики МГУ проводятся общий и специальный практикумы по теоретической и прикладной механике.

Большую роль при выборе на кафедре читаемых курсов, тематики научных исследований, а также формирования стиля преподавания сыграло то, что ряд сотрудников имеют значительный опыт работы на специализированных предприятиях, разрабатывающих современные технические системы. Среди них следует отметить Н. А. Парусникова, Ю. В. Болотина, А. А. Голована, А. И. Матасова, С. С. Лемака, Н. Б. Вавилову.

Научная деятельность сотрудников кафедры на пороге XXI века достаточно подробно отражена в публикациях [1–3]. Здесь отметим основные направления исследований и некоторые научные достижения сотрудников кафедры и лабораторий в последние десятилетия.

Математическое моделирование. Кафедра имеет значительные достижения в развитии методов математического моделирования механических управляемых систем. Под руководством И. В. Новожилова была разработана и внедрена в практику методика фракционного анализа, объединяющая методы теории размерности и подобия и методы теории возмущений. С применением фракционного анализа предложена методика моделирования динамики механических систем общего вида, которые содержат тела, взаимодействующие с малыми относительными проскальзываниями и хрупким разрушением их поверхностей. Выделены случаи, когда при наличии разрушения предельная модель, получаемая после пренебрежения проскальзываниями тел, отлична от классической неголономной модели динамики системы за счет появления в ее лагранжиане дополнительных слагаемых, по структуре схожих с кинетической энергией “присоединенных масс” вакономной модели (А. В. Влахова [4, 5]). Эта методика вводится в практику анализа сложных механических и биомеханических систем. Построены упрощенные математические модели движения автомобиля, позволяющие описывать движение автомобиля как без потери сцепления колес с дорогой, так и в режиме заноса (А. В. Влахова, А. П. Новодерова [6]).

Развитие приближенных методов исследования колебательных движений механических систем нашло отражение в работах В. М. Буданова [7, 8].

Теория навигационных систем и приложения. В предшествующие годы на кафедре прикладной механики и управления и в лаборатории управления и навигации были созданы способы описания метода инерциальной навигации, включающие в себя различные интерпретации и формы представления уравнений инерциальной навигации. Это позволило сделать соответствующую теорию ясной и логичной с теоретико-механической точки зрения, легко доступной для усвоения и использования в конкретных разработках. Подобная работа была проделана и в области корректируемых инерциальных навигационных систем.

В 1987 г. увеличение числа практических задач навигации привело к созданию лаборатории управления и навигации механико-математического факультета МГУ. Руководителем лаборатории был назначен А.Ю. Ишлинский, а идейным вдохновителем и научным руководителем работ лаборатории стал профессор Н.А. Парусников. В настоящее время лабораторией руководит А.А. Голован. На разработанном методическом фундаменте к настоящему времени выстроена система сотрудничества с индустриальными партнерами, основу которой составляют совместные научно-исследовательские работы в области навигации и приложений. Работы охватывают морские, подземные, наземные, воздушные, космические навигационные приложения, в которых сферой ответственности лаборатории служат разработка и внедрение соответствующего программно-математического обеспечения. Отдельно следует отметить работы лаборатории в области аэрогравиметрии, которые позволили обосновать и внедрить в геофизическую практику новую технологию проведения гравиметрических съемок с подвижных носителей — самолетов, вертолетов, БПЛА. В этой технологии ключевым моментом является разработанное в лаборатории (Ю.В. Болотин, В.С. Вязьмин, А.А. Голован, А.В. Козлов) программно-математическое обеспечение аэрогравиметров разного типа (платформенные, бескарданые) [9, 10].

Отличительной особенностью педагогической деятельности сотрудников лаборатории управления и навигации является преподавание заказных профильных курсов лекций по прикладной навигации как для инженеров российских научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, приборостроительных компаний, так и для иностранных специалистов (на английском языке). Было издано несколько учебных пособий по математическим основам навигационных систем и приложениям (Н.А. Парусников, Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, А.И. Матасов [11–15]).

Управление движением. Традиционным для кафедры является исследование методов построения управления для различных механических систем. В этом направлении отметим разработку принципов управления нестационарными нелинейными системами и их линеаризованными моделями. Нестационарность системы вносит принципиальные трудности как в изучение структурных свойств системы (устойчивости, управляемости и наблюдаемости), так и в разработку алгоритмов оценивания и управления. Разработанная теория приводимости к стационарным системам нестационарных линейных систем управления и оценивания применяется к решению ряда конкретных задач уточнения ориентации ИСЗ и управления движением космических аппаратов (В.М. Морозов, В.И. Каленова и др. [16, 17]).

Еще одним значимым направлением являются методы построения управления системами с ограниченными ресурсами. Огромный опыт разработки управления такими системами и их исследований накоплен А.М. Формальским [18]. Характерным отличием таких систем является ограниченная область управляемости системы, что требует развития специальных методов управления такими системами (А.М. Формальский, Д.И. Бугров, П.А. Кручинин и др. [19, 20]).

Исследованы задачи выбора формы оптимальных траекторий и силы тяги при движении центра масс летательного аппарата в сопротивляющейся среде. Для исследования краевых задач, полученных в результате применения принципа максимума Л.С. Понтрягина, используются методы качественного анализа грубых динамических систем (О.Ю. Черкасов [21, 22]).

Представляет интерес применение методов теории оптимального управления к задачам биомеханики (А.М. Формальский, А.Г. Якушев, П.А. Кручинин, А.П. Кручинина [19, 23–25]).

Биомехатронные системы. Разработана математическая модель полной замкнутой схемы управляемой биомеханической системы вестибулоокулярного аппарата. Работы выполнены на стыке макро- и микроуровней. Намечены пути, дающие возможность получить необходимую информацию для более точного понимания процесса нейронного управления биомеханической системой. Показана возможность применения этих результатов при разработке систем гальванической стимуляции вестибулярного аппарата с целью коррекции стабилизации взгляда в экстремальных ситуациях визуального управления полетом (В.В. Александров, А.П. Кручинина, Н.В. Куликовская, С.С. Мигунов, Е.А. Муратова, К.В. Тихонова, Н.Э. Шулина [26]).

Примером развития этого направления на кафедре и в лаборатории МОИДС является математическое обеспечение тестирующих динамических тренажеров, имитационных стендов и систем виртуальной реальности. Был создан новый метод алгоритмического обеспечения — максиминное тестирование качества визуального управления космическими объектами (устройство спасения космонавта, космический корабль “Союз ТМ” [27]). Программное обеспечение, созданное на базе этих алгоритмов (В.А. Фёдоров, А.В. Мамасуев, Е. Лобашёв), входит в состав космического тренажера Центра подготовки космонавтов, принятого Государственной комиссией к эксплуатации в 2002 г. В течение прошедших десяти лет все экипажи российских и зарубежных космонавтов проходят тестирование на этом тренажере перед полетом на МКС.

Программное обеспечение имитационного стенда для испытаний и тестирования во Всероссийском научно-исследовательском институте электромеханики системы стабилизации международного университетского спутника “Татьяна” было создано лабораторией МОИДС (С.С. Лемак, Д.И. Бугров, А.В. Лебедев [28]).

Для тестирования прототипов вестибулярных протезов коллективом преподавателей кафедры и сотрудников лаборатории (В.В. Александров, С.С. Лемак, Г.Ю. Сидоренко, Н.Э. Шульгина) была разработана биомехатронная система “Мобильный имитатор вертикальной позы для разработки и тестирования вестибулярных протезов” [29] и в 2010 г. получен патент на данное устройство. В 2013 г. была введена в эксплуатацию панорамная система виртуальной реальности, которая используется для задач практикума (в том числе для построения управления при стыковке с МКС) и ряда междисциплинарных курсов [30]. В 2017 г. на базе лаборатории заработала первая в России магистратура по тематике виртуальной реальности на факультете космических исследований МГУ (“Технологии смешанной реальности для аэрокосмических систем”, руководитель — В.А. Садовничий).

В 2020 г. в рамках научно-образовательной школы МГУ “Математические методы анализа сложных систем” создан межфакультетский центр “Математическое и программное обеспечение технологий виртуальной и смешанной реальности” под руководством профессора В.В. Александрова. Коллективом центра проводятся исследования по развитию, применению и внедрению в науку и образование технологий виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR). Центр основан сотрудниками механико-математического, исторического, химического факультетов, факультетов психологии и космических исследований МГУ. Важно отметить междисциплинарность исследований, сопровождающих разработку и внедрение VR-технологий. В рамках работы центра велись исследования по развитию и применению следующих технологий виртуальной реальности: динамическая имитация (В.В. Александров, С.С. Лемак [31]); стереовизуализация (В.А. Чертополохов [32]); отслеживание и анализ движений человека (П.А. Кручинин, А.П. Кручинина, В.В. Латонов, В.А. Чертополохов [33, 34], Ю.В. Болотин, А.В. Брагин [35]).

Еще одним новым направлением стало применение дифференциальных нейронных сетей (ДНС) в задачах идентификации и отслеживания движений человека (В.А. Чертополохов, Г.С. Бугрий, А.М. Мухамедов [36]). ДНС представляют собой класс искусственных нейронных сетей, динамика которых описывается системой дифференциальных уравнений. Особенностью ДНС является то, что веса между нейронами меняются динамически согласно дифференциальным правилам обучения, которые могут быть получены исходя из условий устойчивости. Развитие этого направления стало возможным благодаря проекту “Сверхзвук” по созданию научных основ сверхзвукового самолета нового поколения и сопутствующих пилотажных стендов, а также международной кооперации с Мексикой в рамках проекта.

В заключение отметим применение вышеупомянутых методик совместно с сотрудниками исторического факультета к задачам виртуальной реконструкции исторического центра Москвы — Белого города (С.С. Лемак, В.А. Чертополохов, А.П. Кручинина, М.Д. Белоусова [37]) и совместно с факультетом психологии к созданию симуляторов для спортсменов (В.А. Чертополохов, А.П. Кручинина, М.Д. Белоусова, Г.С. Бугрий, А.М. Мухамедов [38]).

Научные работы сотрудников кафедры отмечены Государственными премиями: И.В. Новожилов, Е.А. Девянин в 1976 г., В.И. Борзов, В.В. Александров, Ю.М. Окунев, И.В. Дылевский в 1989 г., В.В. Александров, С.С. Лемак в 2002 г., Н.А. Парусников в 2005 г. Заведующий лабораторией управления и навигации профессор А.А. Голован был удостоен премии им. Н.Н. Острякова — выдающегося конструктора морских гироскопических приборов (2018) и премии РАН им. академика Б.Н. Петрова (2019).

Подробные сведения о кафедре можно получить в интернете на сайте: <http://www.damc.ru>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафедра прикладной механики и управления // Механика в Московском университете на пороге XXI века/ Под ред. И.А. Тюлиной, Н.Н. Смирнова. М.: Изд-во ЦПУ при мех.-мат. ф-те МГУ, 2002. 122–139.
2. Кафедра прикладной механики и управления // Механика в Московском университете/ Под ред. И.А. Тюлиной, Н.Н. Смирнова. М.: Изд-во Айрис-пресс, 2005. 164–198.
3. Кафедра прикладной механики и управления механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова (к 60-летию со дня образования) // Сборник научно-методических статей. Теоретическая механика/ Под ред. Ю.Г. Мартыненко. М.: Изд-во МГУ, 2003. 195–204.

4. *Влахова А.В.* Математические модели движения колесных аппаратов. М.; Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2014.
5. *Влахова А.В.* Моделирование движения железнодорожного экипажа при вкатывании гребня колеса на рельс с использованием подхода Дирака // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2013. № 2. 67–71.
6. *Влахова А.В., Новодерова А.П.* О влиянии стабилизирующих моментов на динамику колесного аппарата на миксте // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2021. № 1. 46–54.
7. *Буданов В.М.* Применение метода неопределенных частот для анализа двухпланетной задачи // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2021. **501**. 49–53.
8. *Буданов В.М.* Метод построения периодических решений нелинейных дифференциальных уравнений // Дифференц. уравнения. 2024. **60**, № 5. 590–603.
9. *Голован А.А., Вязьмин В.С.* Методика проведения аэрогравиметрических съемок и обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра // Гироскопия и навигация. 2023. **31**, № 1(120). 58–75.
10. *Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В.* Новые алгоритмы бескарданной аэрогравиметрии: проверка на экспериментальных данных // Сб. мат-лов XXVIII Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам (МКИНС2021). СПб.: ЦНИИ “Электроприбор”, 2021. 48–55.
11. *Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А., Трубников С.А.* Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. М.: Изд-во МГУ, 2009.
12. *Матасов А.И.* Метод гарантирующего оценивания. М.: Изд-во МГУ, 2009.
13. *Матасов А.И.* Основы теории фильтра Калмана. М.: Изд-во МГУ, 2021.
14. *Голован А.А., Парусников Н.А.* Математические основы навигационных систем. М.: Изд-во МГУ, 2020.
15. *Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.* Краткий курс теории инерциальной навигации: учебное пособие. М.: ИПУ РАН, 2022.
16. *Морозов В.М., Каленова В.И.* Линейные нестационарные системы и их приложения к задачам механики. М.: КУРС: ИНФРА-М, 2016.
17. *Каленова В.И., Морозов В.М.* Линейные нестационарные системы и стабилизация движения спутника около центра масс в геомагнитном поле. М.: Изд-во МГУ, 2023.
18. *Формальский А.М.* Управление движением неустойчивых объектов. М.: Физматлит, 2012.
19. *Формальский А.М., Кручинин П.А., Войцיצкая К.Л.* Стабилизация двойного перевернутого маятника, установленного на качелях seesaw // Прикл. матем. и механ. 2021. **85**, № 6. 683–698.
20. *Бугров Д.И., Формальский А.М.* Особенности областей достижимости при ограниченном импульсе управляющего воздействия // Прикл. матем. и механ. 2018. **82**, № 5. 631–643.
21. *Cherkasov O.Yu., Smirnova N.V.* On the Brachistochrone problem with state constraints on the slope angle // Int. J. Non-Linear Mech. 2022. **139**. 103871.
22. *Cherkasov O.Yu., Malykh E.V., Smirnova N.V.* Brachistochrone problem and two-dimensional Goddard problem // Nonlinear Dyn. 2023. **111**. 243–254.
23. *Кручинина А.П., Якушев А.Г.* Параметризация траектории саккадического движения глаза // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2018. № 2. 68–71.
24. *Кручинина А.П.* Задача быстрогодействия при моделировании саккадического движения глаза // Рос. журн. биомех. 2020. **24**, № 1. 39–46.
25. *Кручинин П.А.* Анализ результатов стабилметрических тестов со ступенчатым воздействием с точки зрения механики управляемых систем // Биофизика. 2019. **64**, № 5. 1010–1020.
26. *Александров В.В., Кручинина А.П., Мигунов С.С.* и др. Введение в биомеханику вестибулоокулярной системы. М.: Изд-во МГУ, 2024.
27. *Александров В.В., Лемак С.С., Садовничий В.А.* Максимальное тестирование качества визуального управления устройством спасения космонавта // Вестн. Моск. гос. ун-та леса. Лесной вестник. 2005. № 4. 6–11.
28. *Александров В.В., Беленький А.Д., Бугров Д.И.* и др. Оценка точности ориентации по телеметрии спутника “Татьяна-2” // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2011. № 3. 69–72.
29. *Александров В.В., Лемак С.С., Александрова Т.Б.* и др. МЭМС вестибулярной функции как база системы управления мобильным имитатором вертикальной позы // Итог. конф. по результатам выполнения мероприятий за 2008 г. в рамках приоритетного направления “Живые системы”. М.: Ин-т молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта РАН, 2008. 46–47.
30. *Александров В.В., Бугров Д.И., Лемак С.С.* и др. Новые задачи физико-математического практикума. Часть II. Тестирование качества сближения устройства спасения космонавта с международной космической станцией. М.: Изд-во попечительского совета мех.-мат. ф-та МГУ, 2015.

31. Александров В.В., Лемак С.С., Тихонова К.В. и др. Биомехатроника — космические исследования // Пилотируемые полеты в космос. 2023. 4, № 49. 77–94.
32. Chertopolokhov V. A. On the problem of synchronization of virtual and real movements for virtual reality systems // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. **2056**, N 1. 012052.
33. Кручинин П.А., Кручинина А.П., Кудряшов И.А. и др. Количественная оценка изменения функционального состояния человека за время полета летательного аппарата // Мехатрон., автомат., упр. 2022. **23**, № 12. 651–660.
34. Кручинин П.А., Латонов В.В., Матвеев Д.С. К задаче определения взаимной ориентации блока акселерометров и тела системы видеоанализа // Рос. журн. биомех. 2020. **24**, № 3. 323–329.
35. Болотин Ю.В., Брагин А.В. О некоторых свойствах фильтра Калмана в задаче навигации пешехода // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2023. № 3. 56–61.
36. Chairez I., Mukhamedov A., Prud V. et al. Differential neural network-based nonparametric identification of eye response to enforced head motion // Mathematics. 2022. **10**. 855.
37. Лемак С.С., Чертополохов В.А., Кручинина А.П. и др. Задачи оптимизации расположения элементов интерфейса в виртуальной реальности (в контексте создания виртуальной реконструкции исторического рельефа Белого города) // Истор. информ. 2020. № 1. 81–93.
38. Поликанова И.С., Леонов С.В., Якушина А.А. и др. Разработка технологии виртуальной реальности vr-race для диагностики и тренировки уровня мастерства хоккеистов // Вестн. Моск. ун-та. Психология. 2022. № 1. 269–297.

Поступила в редакцию
15.10.2024