

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана

Математико-механического факультета  
Елена Владимировна Кустова

  
(подпись) (инициалы, фамилия)  
« 11 » июня 2024 г.  
  
М.П.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения  
Диссертации Смирнова Алексея Сергеевича  
(ФИО соискателя ученой степени)

представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
Ученая степень

по теме «Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения колебаний пространственного двойного маятника»  
(тема диссертации)

по научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин  
шифр и наименование научной специальности (научных специальностей)

и выполненной в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, 2024  
наименование организации и год представления

а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения, замечания и рекомендации:

Диссертация Смирнова Алексея Сергеевича посвящена исследованию динамического поведения пространственного двойного маятника с идентичными параметрами его грузов и концевых звеньев, шарнирные оси которого не коллинеарны друг другу, в различных режимах его функционирования. В данной работе подробно изучаются консервативные, диссипативные и управляемые модели этой системы в линейной и нелинейной постановках, а также рассматривается вопрос о нахождении оптимальных параметров пассивного и активного гашения колебаний в соответствии с двумя критериями оптимизации, характеризующими эффективность процессов затухания движений системы. При решении поставленных задач используется разумное и гармоничное сочетание аналитических и численных методов исследования, причем в качестве первых принимаются как точные методы, так и приближенные асимптотические методы нелинейной механики.

Актуальность данной работы обеспечивается тем, что исследование динамики пространственного варианта двойного маятника с неколлинеарными шарнирами имеет серьезное теоретическое значение для механики маятниковых систем и играет большую роль для практических приложений в области робототехники. Такая неколлинеарность

свойственна многим конструкциям современных манипуляторов, и это связано с тем, что движения пространственных двухзвенников имеют более разнообразный характер и охватывают более широкое множество конфигураций по сравнению со случаем плоского двойного маятника. Кроме того, данная тематика представляет интерес и для биомеханики, поскольку двойной маятник, который совершает пространственное движение, может служить моделью конечностей живых организмов. В этой связи результаты, полученные при углубленном изучении пространственного двойного маятника, могут найти применение при разработке, конструировании и анализе динамического поведения самых разнообразных устройств, например, двухзвенных манипуляторов, снабженных силовыми приводами и контурами управления, элементов сложных многосвязных систем, различного рода андроидов, предназначенных заменить человека при работе в опасных условиях, и прочих мобильных роботов.

Работа содержит 171 страницу и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

В первой главе дан подробный обзор исследований двойного маятника, охватывающий последние три столетия, а также обозначены его исторические практические приложения. Кроме того, выделены основные направления современных исследований двойного маятника в последние три десятилетия, сопровождаемые ссылками на публикации отечественных и зарубежных ученых.

Во второй главе рассмотрена расчетная схема пространственного двойного маятника с идентичными параметрами грузов и звеньев, у которого шарнирные оси не коллинеарны друг другу. Выведены нелинейные уравнения движения системы, рассмотрены частные варианты плоского и ортогонального двойного маятника и подробно изучена линейная модель малых колебаний системы. Произведен учет вязкого трения в шарнирных сочленениях и установлено их влияние на характер затухания движений системы.

В третьей главе с помощью асимптотических методов нелинейной механики построены и детально изучены нелинейные формы колебаний пространственного двойного маятника в первом приближении и его частных вариантов плоского и ортогонального двойного маятника в первом и втором приближениях, которые представляют собой одночастотные режимы движения по всем степеням свободы в нелинейной системе и являются естественным развитием линейных форм колебаний. Полученные аналитические решения сопоставлены с результатами численного интегрирования уравнений движения.

В четвертой главе рассмотрено аналитическое и численное исследование управляемого движения пространственного двойного маятника и его частных вариантов под действием шарнирных моментов, сформированных по принципу коллинеарного управления с постоянным коэффициентом усиления, что позволило осуществить авторезонансный разгон системы по каждой из ее форм колебаний по отдельности с плавным переходом из линейной зоны в нелинейную. Предложена модификация коллинеарного закона, которая содержит переменный коэффициент усиления, связанный с текущей энергией системы. В рамках линейной управляемой модели при постоянном коэффициенте усиления рассмотрен учет вязкого трения и дана классификация возможных режимов движения такой системы.

В пятой главе исследованы вопросы оптимального выбора параметров пассивного и активного гашения колебаний пространственного двойного маятника в отдельности и при их совместном действии, при этом были приняты два критерия оптимизации: максимизация степени устойчивости системы и минимизация интегрального энерго-временного показателя. Дано сопоставление оптимальных параметров гашения, найденных по указанным критериям.

---

### **Наиболее значимые научные результаты, полученные автором лично:**

1. Найдены зависимости частот и форм колебаний пространственного двойного маятника с идентичными параметрами грузов и звеньев от угла между шарнирными осями, а также продемонстрировано, что при идентичных диссипативных коэффициентах силы вязкого трения в шарнирах не искажают форм колебаний консервативной модели, лишь убавляя их амплитуды, причем определены все характеристики диссипативного процесса.

2. Установлено, что нелинейные формы колебаний пространственного двойного маятника и его частного варианта плоского двойного маятника заметно усложняются по сравнению с традиционными линейными формами колебаний при увеличении уровня энергии системы, и определены ключевые величины, отражающие динамическое поведение системы при движении по нелинейной форме, от амплитуды и угла между шарнирными осями.

3. Показано, что коллинеарное управление при постоянном коэффициенте усиления не искажает форм малых колебаний исходной консервативной модели пространственного двойного маятника и его плоского варианта и позволяет осуществлять разгон системы по каждой из них в отдельности с постепенным переходом из линейной зоны в нелинейную вплоть до достаточно больших отклонений, а при переменном коэффициенте усиления позволяет добиться плавного выхода системы на установившийся режим нелинейных периодических колебаний с заданным уровнем энергии.

4. Поставлена и решена задача о нахождении наилучших значений параметров гашения колебаний пространственного двойного маятника в соответствии с двумя критериями оптимизации, характеризующими эффективность процессов затухания движения системы, и определены зависимости оптимальных значений параметров активного гашения от заданных параметров пассивного гашения и угла между шарнирными осями по этим критериям.

Смирнов Алексей Сергеевич окончил с отличием программы бакалавриата (2011–2015 гг.) и магистратуры (2015–2017 гг.) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки «Прикладная механика». Научный руководитель – старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук Смольников Борис Александрович. Результаты научных исследований Смирнова А.С. были представлены на 7 конференциях и на 9 заседаниях научных семинаров и секций. Всего диссертантом опубликовано 17 работ по теме исследования, из которых 7 статей опубликовано в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, 2 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Считаем, что диссертация Смирнова Алексея Сергеевича на тему «Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения колебаний пространственного двойного маятника» представляет теоретический и практический интерес, вносит вклад в развитие аналитической механики, теории колебаний, управления механическими системами и оптимизации в механике. Работа диссертанта содержит целый ряд новых интересных результатов для указанных областей. Работа хорошо оформлена, удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и рекомендуется к защите по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Нарушения со стороны Смирнова Алексея Сергеевича

ФИО соискателя

п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. №11181/1

НЕ ВЫЯВЛЕНЫ

*не выявлены, выявлены*

и Приказа СПбГУ от 03.07.2023 № 9287/1

НС ВЫЯВЛЕНЫ

*не выявлены, выявлены*

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертации опубликованы в предложенных соискателем статьях.

**Коллектив сотрудников Кафедры теоретической и прикладной механики**

*наименование подразделения*

**рекомендовал**

*рекомендовал / не рекомендовал / рекомендовал при условии устранения замечаний*

диссертацию Смирнова Алексея Сергеевича

*ФИО соискателя*

по теме «Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения колебаний пространственного двойного маятника»

*тема диссертации*

к защите на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

*ученая степень*

по научной специальности \_\_\_\_\_

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

*шифр и наименование научной специальности (научных специальностей)*

При проведении голосования коллектива сотрудников Кафедры теоретической и прикладной механики (протокол заседания № 44/8/19-02-5 от 07.06.2024) в количестве 12 человек, участвовавших в заседании из 12 человек штатного состава: Проголосовали «за»: 11 (Смирнов А.С. участие в голосовании не принимал), «против»: 0, «воздержались»: 0.

Подписал: профессор

*(должность)*

Кафедры теоретической и прикладной механики

*(наименование структурного подразделения)*

д.ф.-м.н.

*(ученая степень)*

профессор

*(ученое звание)*

  
*(подпись)*

С.М. Бауэр / 07.06.2024

*Расшифровка подписи, дата*