

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский
государственный морской
технический университет»
(СПбГМТУ)**

Лощманская ул., 3, Санкт-Петербург, 190121
телефон 714-07-61; факс 713-81-09
e-mail: office@smtu.ru
http://www.smtu.ru

12.11.2024

№ 0205-26-29

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Ректор СПбГМТУ, д.т.н.

Г. А. Туричин



20 __ г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»
на диссертацию Смирнова Алексея Сергеевича на тему:
«Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения
колебаний пространственного двойного маятника»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Диссертация Смирнова А.С. посвящена актуальным вопросам динамики пространственного двойного маятника с идентичными параметрами его грузов и концевых звеньев, шарнирные оси которого не коллинеарны друг другу, при этом изучаются консервативные, диссипативные и управляемые модели этой системы в линейной и нелинейной постановках. В работе представлено разумное сочетание аналитических и численных методов исследования, причем в качестве первых используются как точные методы, так и приближенные асимптотические методы нелинейной механики. В диссертации делается акцент на построении и анализе нелинейных форм колебаний пространственного двойного маятника, т. е. одночастотных режимов движения нелинейной системы по всем ее степеням свободы,

которые являются естественным развитием и обобщением форм колебаний линейной модели. Кроме того, важную часть работы составляет изучение вопросов управляемого разгона системы по формам ее колебаний с постепенным переходом из линейной области в нелинейную. Особое внимание также уделяется и вопросу о поиске оптимальных параметров пассивного и активного гашения колебаний системы в соответствии с двумя критериями оптимизации, характеризующими эффективность процессов затухания ее движений. Следует подчеркнуть, что анализ движения пространственного варианта двойного маятника с неколлинеарными осями шарниров имеет не только фундаментальное теоретическое значение, но и играет большую роль для многих практических приложений. Это связано с тем, что подобная неколлинеарность, характерная для многих современных конструкций манипуляторов, охватывает более широкое множество конфигураций, чем в случае, когда оси шарниров параллельны.

Научная новизна и основные научные результаты работы.

Диссертационная работа отличается научной новизной за счет получения целого ряда принципиально новых результатов, проясняющих особенности динамического поведения пространственного двойного маятника в различных режимах его функционирования. В качестве основных научных результатов следует отметить следующие:

1) Найдены зависимости частот и форм малых колебаний пространственного двойного маятника с идентичными параметрами грузов и звеньев от угла между шарнирными осями. Также продемонстрировано, что силы вязкого трения в шарнирах маятника при идентичных диссипативных коэффициентах не искажают форм колебаний консервативной модели, а лишь уменьшают их амплитуды; в результате решения определены все ключевые 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 с увеличением уровня энергии системы. Определены зависимости основных величин поведения нелинейной динамической системы от

параметра, определяющего амплитуды колебаний, и угла между осями шарниров.

3) Показано, что коллинеарное управление при постоянном коэффициенте усиления не искажает форм малых колебаний исходной консервативной модели пространственного двойного маятника и его плоского варианта, позволяя осуществлять разгон системы по каждой из них в отдельности с постепенным переходом из линейной зоны в нелинейную вплоть до достаточно больших отклонений. При переменном коэффициенте усиления это управление 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 движений системы. По каждому из критериев определены зависимости оптимальных значений параметров активного гашения от заданных параметров пассивного гашения и угла между осями шарниров.

Теоретическая и практическая значимость работы. Исследование движений пространственного двойного маятника представляет значительный теоретический интерес, а так же вносит определенный вклад в один из бурно развивающихся разделов механики – динамику маятниковых конструкций. В этой связи можно отметить следующие аспекты, которые обуславливают значимость диссертационной работы:

1) Рассмотренные в работе математические модели и приведенные аналитические и численные решения представляют основу для изучения характера движения более сложных маятников, имеющих несколько степеней свободы, а также для рассмотрения множества смежных вопросов.

2) Полученные результаты могут найти практическое применение в области робототехники при разработке, конструировании и анализе динамического поведения различных устройств: двухзвенных манипуляторов, которые должны совершать рабочие движения как с малыми, так и с весьма

большими амплитудами колебаний; элементов сложных многозвенных систем; многочисленных андроидов и прочих мобильных роботов.

3) Сделанные выводы представляют большой интерес для биомеханики, поскольку двухзвенный маятник может служить простейшей моделью конечностей живых организмов, а описанные в работе управляемые режимы движения широко распространены в животном мире, где фактически все бегающие, плавающие и летающие животные совершают свои локомоции в резонансном режиме по одной из форм колебаний.

4) Представленные в работе задачи и их подробные решения интересны также и в качестве наглядных примеров прикладной механики маятниковых систем в педагогической и инженерной практике.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 171 страницу с 67 рисунками. Список литературы содержит 156 наименований.

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования ввиду использования двухзвенных маятниковых конструкций в прикладных задачах биомеханики и робототехники. Изложена методика исследований, приведены цели и задачи работы, отмечена ее научная новизна, а также представлены теоретическая и практическая значимость работы; подчеркнута достоверность результатов. Помимо этого, описаны структура и объем работы, приведен список публикаций автора по теме диссертации, обозначена апробация работы на научных семинарах и конференциях, объявлены благодарности, а также резюмированы основные научные результаты и сформулированы положения, выносимые на защиту.

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

этой информации выявлены те области, в рамках которых исследования двойного маятника могут быть продолжены и углублены.

Во **второй главе** изучена расчетная схема пространственного двойного маятника с идентичными параметрами грузов и звеньев, у которого оси шарниров не коллинеарны друг другу. На основе данной расчетной схемы выведены нелинейные уравнения движения системы, рассмотрены частные варианты плоского и ортогонального двойного маятника и подробно изучена линейная модель малых колебаний системы. Помимо этого, произведен учет вязкого трения в обоих шарнирах двойного маятника с одним и тем же диссипативным коэффициентом 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, а также его частных вариантов плоского и ортогонального двойного маятника в первом и втором приближениях. Отмечены основные особенности нелинейных форм колебаний в сравнении с линейными формами колебаний, обобщением которых они являются. Приведено графическое сопоставление полученных аналитических решений с результатами, которые были найдены при помощи численного интегрирования уравнений движения.

В **четвертой главе** дано аналитическое и численное исследование управляемого движения пространственного двойного маятника и его частных вариантов плоского и ортогонального двойного маятника под действием шарнирных моментов, сформированных по принципу коллинеарного управления. При рассмотрении наиболее простого случая постоянного коэффициента усиления было показано, что это управление позволяет осуществлять авторезонансный разгон системы по каждой из ее форм колебаний по отдельности с постепенным переходом из линейной зоны в нелинейную. Кроме того, предложена модификация коллинеарного закона управления с переменным коэффициентом усиления, связанным с текущей

энергий системы, что позволяет осуществлять плавный выход на режим движения с наперед заданным уровнем энергии. Также в рамках линейной управляемой модели при постоянном коэффициенте усиления произведен учет вязкого трения и дана классификация возможных режимов движения системы при действии диссипативных и управляющих воздействий.

В **пятой главе** исследованы вопросы оптимального выбора параметров пассивного и активного гашения колебаний пространственного двойного маятника в отдельности и при их совместном действии. Были рассмотрены два критерия оптимизации: максимизация ее степени устойчивости и минимизация интегрального энерго-временного показателя качества, а также отмечены основные достоинства и недостатки каждого из этих критериев. Кроме того, на основе полученных решений было сделано сопоставление оптимальных параметров гашения, найденных по указанным критериям.

В **заключении** подведены итоги проведенного исследования и сделаны основные выводы по работе. Так, отмечается, что в работе впервые построено наиболее подробное аналитическое решение для задачи о малых колебаниях пространственного двойного маятника с неколлинеарными осями при отсутствии и наличии вязкого трения в его шарнирах. Кроме того, было осуществлено аналитическое и численное исследование нелинейных форм колебаний пространственного двойного маятника. Также были изучены авторезонансные разгонные режимы этой системы под действием управляющих моментов в шарнирах, сформированных по принципу коллинеарного управления с постоянным и переменным коэффициентом усиления. Наконец, в работе был осуществлен совместный учет диссипативных и управляющих воздействий и определены оптимальные параметры пассивного и активного гашения колебаний на основе двух критериев (максимальная степень устойчивости; минимизация энерго-временного критерия).

Таким образом, результаты, представленные в диссертационной работе Смирнова А.С., отражают высокий уровень научного анализа и глубокое

понимание автором поставленной проблематики. Использование автором существующих точных и приближенных математических методов исследования линейных и нелинейных колебаний механических систем при отсутствии и наличии диссипативных эффектов и управляющих воздействий, а также сравнение аналитических выражений с результатами, найденными при помощи численного интегрирования уравнений движения, позволили получить автору достоверные результаты. Одним из заметных достоинств диссертационной работы является детальное обсуждение и графическое сопровождение всех найденных результатов. Сделанные в работе выводы представляют большой интерес для специалистов в области аналитической механики, теории механических колебаний, теории управления и оптимизации в механике, а также для инженеров и научных работников, занимающихся исследованием многозвенных маятниковых конструкций.

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1) Рассмотренные автором колебания двойного математического маятника с идентичными характеристиками соответствуют достаточно частному случаю, редко встречающемуся в технике и биомеханике. Хотелось бы видеть, как на параметры движения будет сказываться отличие этих характеристик.

2) Достаточно хорошее совпадение результатов расчета параметров движения по формулам, полученным автором, с результатами расчетов по программам численного интегрирования свидетельствует, на наш взгляд, скорее об одинаковости математических моделей, лежащих в их основе. Как известно, основным критерием правильности математических моделей является совпадение расчетов с результатами наблюдений или экспериментов.

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают значимости диссертационной работы Смирнова А.С.

Заключение

Диссертационная работа Смирнова Алексея Сергеевича «Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения колебаний пространственного двойного маятника» является законченным научным исследованием и выполнена на высоком научном уровне. Автором получены новые результаты, имеющие теоретическую и практическую ценность, при этом полученные автором результаты достоверны. Работа изложена с соблюдением аккуратности при оформлении и соответствует актуальным направлениям развития современной механики.

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертации опубликованы в 17 научных работах, при этом 7 статей опубликовано в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, а 2 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Результаты работы были представлены на 7 профильных научных конференциях и на 9 заседаниях научных семинаров и секций.

Диссертационная работа Смирнова Алексея Сергеевича является завершенной научно-квалифицированной работой на актуальную тему. Она соответствует всем требованиям, установленным Порядком присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете (утвержден Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете»), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Отзыв на диссертационную работу Смирнова Алексея Сергеевича «Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения колебаний пространственного двойного маятника» подготовлен кандидатом технических наук, профессором кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» Мелконяном Арменом Леоновичем, обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры теоретической механики и сопротивления материалов СПбГМТУ, протокол № 2-24/25 от «30» октября 2024 года. На заседании присутствовали 15 чел, в том числе 12 из 14 представителей профессорско-преподавательского состава кафедры и приглашенных научных работников д.т.н., проректор по научной работе Д.И. Кузнецов, д.т.н., профессор кафедры океанотехники и морских технологий Д.В. Никущенко, профессор кафедры строительной механики корабля А.И. Фрумен.

Профессор кафедры
теоретической механики и
сопротивления материалов СПбГМТУ,
кандидат технических наук



А.Л. Мелконян

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Почтовый адрес: 190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3.

Телефон: 8 (812) 714-07-61

Адрес электронной почты: office@smtu.ru

Зав.Кафедрой теоретической механики и
сопротивления материалов СПбГМТУ
Секретарь




Ю.Ф. Титова

А.И. Полякова