

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Семенова Артема Семеновича на диссертацию Смирнова Алексея Сергеевича на тему «Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения колебаний пространственного двойного маятника», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Диссертация А.С. Смирнова посвящена исследованию динамического поведения пространственного двойного маятника в различных режимах его функционирования. На примере таких многозвенных маятниковых систем можно качественно и количественно описать динамику различных робототехнических конструкций, снабженных силовыми приводами и контурами управления, а также выявить новые положения в теоретическом отношении и оценить возможность их применения в инженерном деле. При рассмотрении пространственного двухзвенника с цилиндрическими шарнирами, оси которых не коллинеарны друг другу, конфигурации системы приобретают более сложный вид, чем в плоском случае, что приводит к определенным трудностям при анализе, однако именно такой вариант нередко находит применение на практике. Подобные модели двухзвенного манипулятора исследованы еще не достаточным образом, и при их изучении возникают вопросы о построении нелинейных форм колебаний, о формировании рациональных управляющих воздействий, приводящих к достижению тех или иных целей, а также о поиске наилучших параметров пассивного и активного гашения их колебаний по различным критериям оптимизации. При этом помимо использования модели двойного маятника в робототехнике он находит применение в задачах биодинамики, поскольку может имитировать движение конечностей разнообразных живых организмов. В этой связи тема диссертационной работы А.С. Смирнова является очень актуальной.

В диссертации А.С. Смирнова впервые получен ряд результатов, проясняющих особенности поведения двойного математического маятника с идентичными параметрами его звеньев и концевых грузов и неколлинеарными шарнирными осями, при изучении его консервативных, диссипативных и управляемых моделей в линейной и нелинейной постановках, а также при решении задач об оптимальном подавлении его колебаний. В частности, в работе построено наиболее подробное аналитическое решение для задачи о малых колебаниях этого пространственного двойного маятника и определены зависимости частот и форм колебаний от угла между шарнирными осями. Также в рамках линейной модели было установлено влияние сил вязкого трения в шарнирах с идентичными диссипативными коэффициентами на характер затухания движений данной системы и показано, что в этом случае формы колебаний остаются такими же, как в консервативной модели. Помимо этого, был исследован вопрос о нелинейных формах колебаний системы с помощью асимптотических методов, и для них получены достаточно компактные аналитические выражения, которые позволяют определить все величины, отражающие поведение системы при движении по нелинейным формам. Эти решения были приведены в графическом виде и сопоставлены с результатами, найденными при помощи процедуры численного интегрирования уравнений движения. Кроме того, были сформированы управляющие воздействия на основе принципа коллинеарного управления, которые позволили разгонять систему с малых и до достаточно больших амплитуд по каждой из форм колебаний в отдельности. При этом были рассмотрены варианты управления с

постоянным и переменным коэффициентом усиления, а также выявлен постепенный дрейф форм колебаний с увеличением уровня энергии. Также была рассмотрена управляемая модель системы при наличии диссипативных эффектов и определены возможные режимы движения такой системы. Наконец, были найдены наилучшие параметры пассивного и активного гашения колебаний системы по отдельности и при их совместном учете в соответствии с двумя критериями оптимизации и дано сопоставление полученных результатов, причем все они представлены в наглядной графической форме.

Все полученные в диссертации результаты являются новыми. Их достоверность обеспечивается использованием существующих точных и приближенных математических методов исследования линейных и нелинейных колебаний механических систем при отсутствии и наличии диссипативных эффектов и управляющих воздействий, а также путем сопоставления аналитических выражений с результатами, найденными при помощи численного интегрирования уравнений движения. Несомненным достоинством диссертационной работы является разумное сочетание аналитических и численных методов решения поставленных задач, а также графическое сопровождение полученных решений. Рассмотренные в работе математические модели и приведенные решения вносят существенный вклад в один из бурно развивающихся разделов механики – динамику маятниковых конструкций, и они представляют основу для изучения характера движения более сложных маятников, имеющих несколько степеней свободы. Найденные результаты играют большую роль при разработке, конструировании и анализе динамического поведения разнообразных устройств, например, двухзвенных манипуляторов, элементов сложных многосвязных систем, андроидов и мобильных роботов.

По работе имеются следующие **замечания**:

1) В работе изучается динамика пространственного двойного маятника, шарнирные оси которого составляют между собой некоторый угол  $\alpha$ , и обсуждаются частные варианты плоского ( $\alpha=0$ ) и ортогонального двойного маятника ( $\alpha=\pi/2$ ). Однако было бы интересно более детально рассмотреть также и случаи, когда угол  $\alpha$  является близким к 0 или  $\pi/2$ , и, в частности, получить упрощенные выражения для основных величин, характеризующих движение системы по нелинейным формам колебаний.

2) В диссертации рассматриваются два критерия оптимизации – максимизация степени устойчивости и минимизация интегрального энерго-временного показателя качества. При этом возможность конструирования других критериев оптимизации в работе не обсуждается, хотя отмечается, что представляет интерес использование различных критериев и сопоставление результатов, полученных по этим критериям. Было бы полезно обозначить, какие еще критерии, отличные от рассмотренных двух в работе, можно принимать для оценки эффективности процессов гашения колебаний системы.

3) При анализе колебаний и оптимизации режимов их гашения автор ограничился учетом линейного вязкого трения. Представляет интерес вопрос о чувствительности полученных результатов к выбору альтернативных диссипативных моделей, например замену на степенную модель вязкого трения или на модель сухого трения.

Указанные замечания нисколько не умаляют значимости и новизны полученных результатов и не снижают общего положительного впечатления от работы. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, содержащее целый ряд новых результатов в области теории линейных и нелинейных колебаний, управления движением механических систем и оптимизации в механике и управлении, которые имеют не только фундаментальное значение, но также важны и для практических приложений.

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из которых 2 работы опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, а 7 работ опубликовано в изданиях, индексируемых в Scopus. Основные результаты, полученные в диссертации, достаточно полно изложены в указанных публикациях, а также они были представлены на международных и всероссийских конференциях и заседаниях научных семинаров.

Диссертация Смирнова Алексея Сергеевича на тему: «Динамика, управление движением и оптимизация режимов гашения колебаний пространственного двойного маятника» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Смирнов Алексей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор Высшей школы механики и  
процессов управления Санкт-Петербургского  
политехнического университета Петра Великого

23.12.2024

