

УТВЕРЖДАЮ

ректор ФГАОУ ВО «Крымский
федеральный университет имени
В.И. Вернадского» доктор
технических наук, профессор

А.П. Фалалеев

« 26 » _____ 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
на диссертацию Рыжкова Александра Игоревича

**«Моделирование динамики целенаправленного движения объектов с
упругими элементами»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Актуальность исследования.

В настоящее время особенно актуально совершенствование объектов техники с точки зрения снижения потребления ими энергии на реализацию рабочих операций. В первую очередь это связано с ростом цен на энергоносители.

Решение данной задачи отчасти возможно путем уменьшения массы исполнительных элементов, что естественно приводит к снижению жесткости элементов конструкций и, как следствие, возникновению колебаний со снижением точности позиционирования. Возникает необходимость внедрения дополнительных средств (программных и аппаратных) для подавления колебаний. Важна также задача определения наименьшей энергии, необходимой для выполнения рабочих операций.

Диссертация А.И. Рыжкова посвящена моделированию таких целенаправленных движений (с использованием полиномов ускорений или перемещений) реальных упругих систем (за приемлемое минимально возможное время), для которых без привлечения дополнительного источника энергии достигается конечное состояние с устранением колебаний.



Цель рассматриваемой работы заключается в моделировании переносного поступательного либо вращательного движений объектов с упругими элементами с использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления (от задаваемой аналитической функции перемещения – через уравнение Эйлера – к восстанавливаемому функционалу-критерию) при конструировании переносных ускорений, которые обеспечивают достижение абсолютного либо относительного покоя объекта в конечном состоянии.

Научная новизна исследований и полученных результатов заключается в том, что:

1. Предложен новый метод компьютерного моделирования целенаправленных переносных поступательных и вращательных ускорений упругих объектов и систем при перемещении на заданные расстояние или угол за время, определяемое из моментных соотношений в относительном движении.

2. С использованием пакетов прикладных программ разработан и исследован оригинальный метод конструирования и оценки энергоемкости целенаправленных переносных ускорений типа «разгон-торможение».

3. Впервые выполнены аналитические и численные эксперименты для обоснования кососимметричных ускорений, обеспечивающих достижение цели движения. Обобщение результатов привело к универсальным аналитическим зависимостям, описывающих динамику целенаправленного движения.

4. Впервые для проверки адекватности математической модели выполнено экспериментальное исследование быстрого вращения консольного элемента конечной жесткости (руки манипулятора) с целью достижения абсолютного покоя в конечном состоянии.

Теоретическая значимость диссертационной работы:

– с использованием алгоритма решения полных обратных задач вариационного исчисления найдены новые типы ускорений переносного поступательного и вращательного целенаправленного движения упругих объектов или объектов с элементами конечной жесткости;

– доказано существенное снижение энергетических затрат на реализацию движений без потери производительности и точности позиционирования при возрастании степени задаваемого полинома ускорения, полученного при решении полной обратной задачи вариационного исчисления; для поиска приемлемого времени движения использована итерационная процедура поиска общих корней системы трансцендентных уравнений;

– впервые на основании разработанной математической модели выполнена успешная экспериментальная проверка быстрого вращения упругого объекта с использованием кососимметричной функции углового ускорения типа «разгон-торможение» с целью устранения колебаний в конечном положении.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

– разработана и внедрена в учебный процесс кафедры «Приборостроительные системы и автоматизация технологических процессов» Политехнического института ФГАОУ ВО «СевГУ» методика проведенного эксперимента по реализации целенаправленного движения; результаты отражены в учебном пособии «Программное управление оборудованием» (Севастополь, 2020), рекомендованном для студентов очной формы обучения специальностей 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» Ученым советом Политехнического института СевГУ, протокол № 5 от 15.10.2020 г.;

– зарегистрирована программа для ЭВМ, определена возможность использования полученных в результате ее работы ускорений «разгон-торможение» для реализации целенаправленных движений упругих объектов с последующей оценкой адекватности модельных представлений о колебательном процессе;

– на основе проведенных исследований получен патент на способ изготовления вентиляционной панели, экранирующей электромагнитное излучение, основанный на задании перемещений исполнительным органом, движение которого осуществляется через ременную передачу; способ прошел апробацию и внедрен в производство ООО «Группа компаний «ЗАИН» (г. Москва).

Обоснованность и достоверность положений и выводов, выносимых на защиту, подтверждаются корректностью постановки задач с последующим математическим моделированием, параллельным использованием аналитических и численных методов вычислительной математики при решении задач с привлечением пакетов прикладных программ. Достоверность результатов подтверждена аналитическими и численными экспериментами, непосредственной экспериментальной проверкой и внедрением в производство.

Заключение о соответствии диссертации установленным критериям. Диссертационная работа А.И. Рыжкова в полном объеме отвечает критериям, которые установлены «Положением о присуждении

ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а именно:

– Указанная автором цель работы достигнута в представленной диссертации.

– Автореферат диссертации А.И. Рыжкова соответствует диссертационной работе по всем квалификационным признакам.

– Основные выводы и результаты сформулированы логично и содержательно, соответствуют поставленным задачам исследования.

– Научные публикации, изданные автором за период работы над диссертацией (2 – в индексированных базах цитирования Scopus, 1 – в Web of Science, 8 – с сборнике из рецензируемого перечня ВАК по техническим наукам, 15 – в сборниках, входящих в перечень РИНЦ, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на изобретение), полностью соответствуют тематике диссертации и отражают ее результаты.

– Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. **По направлению исследования** диссертация связана с разработкой моделей целенаправленных движений объектов с упругими элементами, применением математического моделирования, численных методов и программ для решения проблемы снижения амплитуд колебаний при достижении цели объектом конечной жесткости без привлечения средств пассивного и активного гашения колебаний, обеспечивая снижение энергетических затрат на реализацию таких движений. **По областям исследования** работа соответствует пунктам паспорта специальности: *пункт 1* «разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; *пункт 3* «разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», *пункт 5* «комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», *пункт 6* «разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента»; **по объекту и предмету исследования** – соответствует моделированию для систем с упругими элементами целенаправленных движений в части пунктов 1, 3, 5, 6 паспорта специальности. В работе присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей: математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Анализ содержания работы.

Диссертация А.И. Рыжкова состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных литературных источников, содержащего 126 наименований, и приложения, включающего: комплекс программ расчета систем с элементами конечной жесткости, пример использования послойного синтеза изделия; акт внедрения результатов работы, акт о результатах экспериментальных исследований.

Во введении отражена актуальность исследования динамического поведения объектов с элементами конечной жесткости в различных областях техники, обосновано направление исследований, определены цель и задачи; отражена структура работы, приведена методология исследований; перечислены основные результаты с оценкой их научной новизны, теоретического и практического значения.

В первой главе дан анализ областей использования в современной технике объектов конечной жесткости и связанных с ними средств пассивного и активного (управляемого) гашения колебательных процессов. Описан алгоритм конструирования ускорений, обращено внимание на необходимость разделения движений на переносное и относительное при поступательном и вращательном движениях, обеспечивающих состояние абсолютного либо относительного покоя в конечной точке позиционирования. Обосновывается необходимость совершенствования целенаправленных движений элементов объектов современной техники с устранением колебаний и экономией энергии.

Во второй главе с использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления в результате реверсионного конструирования получены и исследованы ускорения (управления) переносным движением объектов конечной жесткости. Показано, что с ростом степени задаваемого полинома энергия для реализации оптимального целенаправленного ускорения типа «разгон-торможение» стремится к предельному минимальному значению.

В третьей главе выполнен анализ динамики поведения функциональных элементов объектов с упругими элементами в ходе реализации перемещений в декартовой и полярной системах координат. Предложены алгоритмы синтеза целенаправленных ускорений элементов систем с конечным числом степеней свободы при поступательном и вращательном движениях. Сконструированы целенаправленные движения для перемещения упругих звеньев ряда технических систем (3D-принтер, телескопический манипулятор, привод с ременной передачей), определены усилия в приводах для реализации таких движений.

В четвертой главе выполнено моделирование целенаправленного вращательного движения консольного объекта конечной жесткости; разработан стенд (на базе робота Mitsubishi MELFA RV-1A) для проверки сконструированных переносных ускорений, решены задачи динамики объектов с сосредоточенными и распределенными параметрами; рассмотрен пример учета линейно-вязкого сопротивления и физического момента инерции ротора двигателя.

В пятой главе описана разработанная методика экспериментальной проверки и анализа практической реализации сконструированного целенаправленного переносного углового ускорения для поворота вокруг неподвижной оси (задан угол и время) консольного стержня конечной жесткости с распределенной массой из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Наглядно показано, что амплитуды колебаний конца консоли снижаются практически в 5-9 раз по сравнению со стандартной функцией робота для осуществления поворота на заданный угол. Продемонстрирована приемлемая согласованность с результатами математического моделирования.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложении приведен обзор технологий послойного синтеза, проанализирован ряд 3D-принтеров, дан классификатор систем, трансформирующих материал на основании моделей динамики исполнительных органов, реализующих вращательные и поступательные движения. Результаты исследований нашли практическое применение в мелкосерийном производстве, что привело к повышению производительности и качества продукции (акт внедрения по патенту RU №2615110). С помощью программы Prusa3D Slic3r MK2 (позволяющий настроить процесс печати: высоту первого и последующих слоёв детали; скорости – печати первого слоя, ускорение «разгон-торможение», печати внешнего периметра, печати сплошного заполнения верхней и нижней частей модели, печати поддержек, холостого перемещения по осям X и Y; степень и способ заполнения внутренней части детали) смоделированы временные затраты на создание одной вентиляционной панели. С помощью пакета MATLAB данные обобщены в поверхности, характеризующие производительность (затраты времени) технологического процесса 3D-печати вентиляционных панелей из различных материалов при варьировании степени (%) внутреннего заполнения детали материалом и скорости перемещения исполнительных элементов.

Представлен комплекс программ, акты внедрения, патент и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы.

1. На стр. 14 диссертации отмечено, что задача восстановления целевого функционала может не иметь единственного решения, то есть допускается, что таких функционалов может быть два. Этот результат требует специального пояснения.
2. На стр. 25 гамильтониан $H = \psi_0 \cdot 1 + \psi_1 x_1 - \psi_2 x_1 + \psi_1 u(t)$ в случае $u(t) = \text{sign } \psi_2$ достигает максимума, что, вероятно, требует строго доказательства. Не вполне ясно, откуда берутся величины ψ_0, ψ_1, ψ_2 .
3. На рисунке 1.7 приведен график зависимости времени движения до остановки ($x(T) \approx 0, \dot{x}(T) \approx 0$) от предельного по абсолютной величине значения релейного управления $|D|$. Далее утверждается, что с ростом D время достижимости состояния покоя убывает экспоненциально, что вероятно, должно как-то подтверждаться дополнительными выкладками. По отмеченным 5-ти точкам можно осуществить с помощью метода наименьших квадратов линейную аппроксимацию и, далее, утверждать, что время достижимости убывает линейно.
4. На стр. 37 значения функционала вычисляются по формуле: $J(\delta_i) = \int_0^T [\dot{U}_e(t)]^2 dt$. Здесь по записи трудно понять каким образом функционал J может зависеть от δ_i . Далее – таблица 2.1 – приведены значения варьируемого параметра δ_i и функционала $J(\delta_i)$. В качестве аппроксимирующего экспериментальные данные выбран биквадратный полином относительно δ , который при отрицательном старшем коэффициенте имеет три локальных экстремума, один из которых - минимум. Эмпирическая оценка этого коэффициента имеет 5-й порядок малости по отношению к остальным коэффициентам. Откуда можно предположить, что эмпирическую зависимость можно было аппроксимировать квадратичной функцией.
5. Страница 56. Не ясно, каким образом получены данные таблицы 2.4. Приведена зависимость $A(n) = m \frac{(n+2)^2 L^2}{(n+1)^2 T^2}$ и график $A(n)$ (при $m=1, L=1$ и $T=1$ близок к графику на рисунке 2.18. С другой стороны, оба выражения $A(n)$, вероятно, показывают одинаковую сходимость при $n \rightarrow \infty$.

Заключение по диссертационной работе.

Представленная диссертационная работа А.И. Рыжкова является самостоятельной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней

решена актуальная задача разработки и развития математических моделей и методов, реализованных в комплексе программ, позволяющим моделировать управляемое движение конструкций с элементами конечной жесткости, при этом снижается энергия на реализацию таких движений, а колебания в конце хода практически отсутствуют. Экспериментальная часть работы автора носит характер полноты и системности.

Содержание диссертации полностью соответствует заявленной цели и поставленным задачам, последовательно и аргументированно приводится их решение. Основные научные результаты диссертации изложены в публикациях в индексированных базах цитирования Scopus и Web of Science, в сборниках, входящих в рецензируемый перечень ВАК РФ и РИНЦ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также получен патент на изобретение.

Автореферат диссертации отражает ее содержание, полностью соответствующее специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Указанные замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа А.И. Рыжкова полностью отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а соискатель заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв подготовил:

Заведующий кафедрой
системного анализа и информатизации,
д.т.н., профессор



А.В. Степанов

Отзыв на диссертацию Рыжкова Александра Игоревича обсужден и одобрен на заседании кафедры системного анализа и информатизации Физико-технического института ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» «18» августа 2022 года, протокол № 12.

С отзывом ознакомлен 30.08.2022 г. /А.И. Рыжков/

Сведения о ведущей организации
 по диссертационной работе **Рыжкова Александра Игоревича**
 на тему «**Моделирование динамики целенаправленного движения**
объектов с упругими элементами»
 представленной на соискание ученой степени *кандидата технических наук*
 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»
Почтовый индекс, адрес организации	295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4.
Веб-сайт	https://cfuv.ru
Телефон	+7 (3652) 54-50-36
Адрес электронной почты	cf_university@mail.ru
Список основных публикаций работников структурного подразделения, в котором будет готовиться отзыв, по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Степанов, А.В. К задаче устойчивости систем дифференциальных уравнений с полиномиальными правыми частями / А.В. Степанов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 7(170). – С. 78-83. – EDN YLILH. 2. Степанов, А.В. О построении функции Ляпунова с заданными свойствами для систем дифференциальных уравнений второго порядка / А.В. Степанов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 6(169). – С. 81-86. – EDN YKQQQH. 3. Степанов, А.В. К задаче об устойчивости пространственного маневра летательного аппарата / А.В. Степанов // Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование: сборник научных трудов научно-практической конференции МИКМО-2017 и Таврической научной конференции студентов и молодых

специалистов по математике и информатике, Симферополь, 10–14 апреля 2017 года / Таврическая академия (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»; Под ред. В.А. Лукьяненко. – Симферополь: ИП Корниенко А.А., 2017. – С. 57-62. – EDN YOYHHY.

4. Stepanov, A.V. Information-system model of creation of technical complexes / A.V. Stepanov // Тенденции, направления и перспективы развития экономических отношений в современных условиях хозяйствования: Материалы II межрегиональной с международным участием научно-практической конференции: Симферополь, 21–22 февраля 2017 года. – Симферополь: Издательство Диайпи, 2017. – Р. 209-211. – EDN ZANTDZ.
5. Степанов, А.В. К задаче об устойчивости пространственного маневра беспилотного летательного аппарата при аэрофотосъемке местности / А.В. Степанов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2018. – № 15(178). – С. 26-33. – EDN YTEJBZ.
6. Determining image-distortion parameters by spectral means when processing pictures of the earth's surface obtained from satellites and aircraft / V.S. Sizikov, A.V. Mezhenin, D.I. Burlov [et al.] // Journal of Optical Technology. – 2018. – Vol. 85. – No 4. – P. 193-196. – DOI 10.1364/JOT.85.000203. – EDN XXZAXJ.
7. Степанов, А.В. Алгебраический критерий устойчивости движений динамической системы некоторого класса / А.В. Степанов // Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции МИКМО-2018 и Таврической научной школы-конференции студентов и молодых специалистов по математике и информатике, Симферополь, 17–29 апреля 2018 года / Под

редакцией В.А. Лукьяненко. – Симферополь: Индивидуальный предприниматель Корниенко Андрей Анатольевич, 2018. – С. 84-86. – EDN CDQIKV.

8. Математико-компьютерная обработка искаженных снимков поверхности земли, полученных со спутников и самолетов при дистанционном зондировании / А.В. Меженин, Д.И. Бурлов, А.В. Степанов [и др.] // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО, Санкт-Петербург, 31 января – 03 февраля 2018 года. – Санкт-Петербург: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО", 2018. – С. 351-355. – EDN WKOVOF.
9. Степанов, А.В. Методы фильтрации мультиполярного импульсного шума в задаче восстановления изображений и их программная реализация в среде с++ / А.В. Степанов // Агробиологические основы адаптивно-ландшафтного ведения сельскохозяйственного производства: Сборник тезисов докладов участников Российской теоретической и научно-практической, юбилейной конференции, посвященной 100-летию создания Академии биоресурсов и природопользования, Симферополь, 12–16 октября 2018 года. – Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2018. – С. 227-229. – EDN YCHVRJ.
10. Степанов, А.В. Модификации модели Дж. Форрестера с учетом коэффициента научно-технического прогресса / А.В. Степанов // Тенденции, направления и перспективы развития экономических отношений в современных условиях хозяйствования: Материалы IV межрегиональной с

	<p>международным участием научно-практической конференции: сборник трудов, Симферополь, 21–22 февраля 2019 года. – Симферополь: Издательство Диайпи, 2019. – С. 205-209. – EDN SXGKZU.</p> <p>11. Литвинова, Г.В. Разработка интерфейсов многомерной оптимизации на основе метода "роя частиц" / Г.В. Литвинова // Агробиологические основы адаптивно-ландшафтного ведения сельскохозяйственного производства: Сборник тезисов докладов участников Российской теоретической и научно-практической, юбилейной конференции, посвященной 100-летию создания Академии биоресурсов и природопользования, Симферополь, 12–16 октября 2018 года. – Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2018. – С. 232-235. – EDN YCHVSX.</p> <p>12. Степанова, Е.И. О равновесных положениях одной модельной системы упруго-пластических взаимодействий / Е.И. Степанова // Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции МИКМО-2018 и Таврической научной школы-конференции студентов и молодых специалистов по математике и информатике, Симферополь, 12–19 октября 2018 года. – Симферополь: ИП Корниенко А.А., 2018. – С. 86-90. – EDN YXMFED.</p>
--	---

Верно

Ректор

«27»

06

2022 г.



А.П. Фалалеев

