

На правах рукописи



Рыжков Александр Игоревич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО
ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (ФГАОУ ВО «СевГУ») на кафедре «Цифровое проектирование».

Научный руководитель: **Бохонский Александр Иванович,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Цифровое проектирование» ФГАОУ ВО
«СевГУ», г. Севастополь.

Официальные оппоненты: **Жуков Иван Алексеевич,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Машиностроение», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет», г. Санкт-Петербург.

Сухоруков Андрей Львович,
доктор технических наук, заместитель начальника
проектного отдела АО «ЦКБ МТ «Рубин»,
г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», г. Симферополь.

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 10:00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем» (ИПТС), Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (СевГУ) по адресу: **299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.**

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря ИПТС (или в библиотеке СевГУ) и на сайте www.иптс.рф. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте www.иптс.рф.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28 на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь объединенного
диссертационного совета Д999.231.02
кандидат физико-математических наук



В.П. Евстигнеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современной технике возникает необходимость моделирования целенаправленных движений реальных упругих систем (за приемлемое минимально возможное время), для которых без привлечения дополнительного источника энергии достижение конечного состояния сопровождается устранением колебаний.

Повышение производительности современной техники связано в том числе с реализацией быстрых поступательных и вращательных движений объектов с упругими элементами и, как следствие, появлением колебаний, влияющих на качество технических процессов. К объектам, участвующим в современном производстве, относятся, например, мехатронные модули, упругие подвесы, краны, манипуляторы минимальной массы (с упругими элементами), в космосе – разворачиваемые из транспортной укладки и участвующие в сборочных операциях крупногабаритные нежесткие конструкции.

В конструируемых программах движения приоритетно само достижение цели с оценкой на заключительном этапе качества используемых средств (по восстановленному функционалу-критерию). В механике, например, при решении первой задачи динамики (ее называют обратной) по геометрическим свойствам движения находятся причины (силы), вызывающие такое естественное движение. Целенаправленное движение предполагает обоснование средств принуждения для достижения заранее поставленных целей.

Принципиальным отличием решения полной обратной задачи вариационного исчисления (А.И. Бохоном названо реверсионным) является отсутствие предварительно задаваемого критерия оптимальности на начальном этапе реализации алгоритма. Синтез ускорения целенаправленного движения объекта предполагает по заданной аналитической функции перемещения либо ускорения и ограничениях с использованием разработанных программ получение уравнения Эйлера как первой вариации восстановленного функционала-критерия.

Разработаны и исследованы модели целенаправленного движения систем с упругими элементами, в том числе – 3D-принтера для послойного синтеза деталей при формообразовании наплавлением (fused deposition modeling, FDM).

Степень разработанности темы исследования.

Теория колебаний механических систем развита в работах В.Л. Бидермана, Я.Г. Пановко, С.П. Тимошенко и других. Причинам возникновения колебаний, их пассивному и активному гашению посвящены работы В.А. Светлицкого, В.А. Троицкого, К.В. Фролова, Ф.Л. Черноусько, М. Eghtesad, S.A. Fazelzadeh. Управляемое движение объектов отражено в работах Л.Д. Акуленко, А.П. Батенко, В.Г. Болтянского, И.А. Карновского, Н.Н. Красовского, П.Д. Крутько, Н.Н. Моисеева, Л.С. Понтрягина.

До настоящего времени конструированию переносных поступательных и вращательных ускорений деформируемых систем с устранением их колебаний в конце движения все ещё не уделялось должного внимания.

Экспериментальная проверка переносного поступательного движения упругого объекта выполнена М.М. Майстришиным с использованием оборудования учебного центра «СевНТУ-FESTO», СевГУ. Для практики необходима новая экспериментальная проверка применения известных и конструируемых угловых ускорений переносным вращательным движением объектов с элементами конечной жесткости.

На основании аналитического обзора известных исследований сформулированы новые задачи моделирования кососимметричных переносных ускорений с приложением к манипуляторам с упругими звеньями, реализующими аддитивные технологические процессы. Исследование таких технических процессов отражено в работах Гусева Д.В., Довбыш В.М., Зайцева А.М., Зеленко М.А., Нагайцева М.В.

Цель исследований – моделирование переносного поступательного или вращательного движений объектов с упругими элементами с использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления (от функции перемещения – через уравнение Эйлера – к восстанавливаемому функционалу-критерию) при конструировании переносных ускорений, обеспечивающих достижение абсолютного либо относительного покоя объекта в конечном состоянии.

Задачи исследования:

1. Аналитический обзор методов моделирования динамики быстрых движений объектов как абсолютно твердых тел и деформируемых систем.
2. Создание моделей целенаправленных поступательных и вращательных переносных движений объектов с элементами конечной жесткости и оценкой энергоемкости движений и приложением к исполнительным органам манипуляторов.
3. Экспериментальное исследование быстрого вращения консоли конечной жесткости (руки манипулятора) вокруг неподвижной оси при заданных угле и приемлемом времени для достижения абсолютного покоя в конечном состоянии.
4. Приложение к аддитивным технологиям результатов моделирования динамики элементов 3D-принтеров с послойным наплавлением при изготовлении экранирующих электромагнитное излучение вентиляционных панелей электронных аппаратов.

Научная новизна:

1. Предложен новый метод компьютерного моделирования целенаправленных переносных поступательных и вращательных ускорений упругих объектов и систем при перемещении на заданное расстояние или угол за время, определяемое из моментных соотношений в относительном движении (**п. 1**).
2. С использованием пакетов прикладных программ разработаны и исследованы методы реверсионного конструирования и оценки энергоемкости целенаправленных переносных ускорений типа «разгон – торможение» (**п. 3**).
3. Впервые выполнены аналитические и численные эксперименты для обоснования кососимметричных ускорений, обеспечивающих достижение цели движения. Обобщение результатов комплексных исследований привело к универсальным аналитическим зависимостям, описывающих динамику целенаправленного движения (**п. 5**).
4. Впервые с целью проверки адекватности математической модели выполнено экспериментальное исследование оптимального быстрого вращения консольного элемента конечной жесткости (руки манипулятора) для достижения абсолютного покоя в конечном состоянии (**п. 6**).

Теоретическая и практическая значимость работы. С использованием алгоритма решения полных обратных задач вариационного исчисления найдены новые типы ускорений (управлений) переносного поступательного и вращательного целенаправленного движения объектов с элементами конечной жесткости.

С учетом цели движения и свойств кривой симметрии ускорений, описываемых аналитическими функциями, восстанавливались уравнения Эйлера (как первых вариаций функционалов) и соответствующие им функционалы-критерии. Достаточность экстремума (минимума) функционалов подтверждалось построением графических образов, зависящих от параметра варьирования подходящих функций, близких к «скелетной кривой», являющейся решением уравнения Эйлера.

Впервые на основании разработанной математической модели выполнена экспериментальная проверка вращения упругого объекта с использованием

кососимметричной функции углового ускорения типа «разгон-торможение» с целью устранения колебаний в конечном положении.

Исследованы относительные колебания упругих объектов при целенаправленном переносном движении. Для реализации движения находилось приемлемое минимально возможное время (среди общих корней моментных соотношений – системы трансцендентных уравнений), обеспечивающее необходимый абсолютный либо относительный покой к концу движения.

Рассмотрены FDM 3D-принтеры как системы, реализующие преобразования потоков материалов, энергии и информации при изготовлении деталей; предложен подход к их классификации с учетом вариантов целенаправленных движений, принятых к внедрению в производственный процесс ООО «Группа компаний «ЗАИН», г. Москва (патент РФ RU №2655118 от 06.06.2017).

Результаты экспериментов отражены в учебном пособии «Программное управление оборудованием» (Севастополь, 2020), рекомендованном Ученым советом Политехнического института СевГУ для студентов очной формы обучения специальностей 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Объект исследования. Моделирование управляемых движений упругих объектов техники с применением комплекса программ, реализующих аналитические и численные методы.

Предмет исследования. Модели динамики целенаправленных переносных поступательных и вращательных движений объектов с элементами конечной жесткости с ускорениями, найденными в результате решения полных обратных задач вариационного исчисления с привлечением аналитических и численных методов.

Методология и методы исследования. При моделировании переносного ускорения объектов (в виде полиномов) применен алгоритм, включающий этапы: формулирование цели движения и ограничений; определение констант полиномов с учетом краевых условий и свойств косо́й симметрии ускорений, факторизация полиномов; восстановление уравнения Эйлера как необходимого условия экстремума соответствующего функционала-критерия с последующей проверкой достаточных условий (Якоби, Вейерштрасса и Лежандра), подтверждающих существование экстремума (минимума).

С использованием близких к «скелетной кривой» подходящих функций, удовлетворяющих краевым условиям, получен математический образ функционала, зависящего от параметров варьируемой функции и подтверждающего существование экстремума.

Для анализа динамики элементов манипуляторов разработаны специальные алгоритмы, использующие аналитические и численные методы вычислительной математики, методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений (Maple, MATLAB, MathCAD).

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, обосновано применение специальных кососимметричных ускорений, обеспечивающих перемещение за приемлемое минимально возможное время на заданное расстояние упругих объектов в состояние абсолютного либо относительного покоя (без дополнительных средств подавления колебаний). Необходимое время движения находилось графически как один из общих корней системы трансцендентных уравнений (моментных соотношений). Соискатель непосредственно участвовал в решении задач по теме диссертации, подготовке статей и докладов на научных конференциях.

Впервые самостоятельно выполнена экспериментальная проверка вращения упругого объекта из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Оценены энергозатраты для изготовления деталей аддитивными технологиями при обеспечении требуемой точности и производительности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод моделирования целенаправленных движений систем с элементами конечной жесткости и оценкой энергетических затрат.
2. Программы, отражающие аналитические и численные эксперименты при конструировании и исследовании динамики целенаправленных движений упругих объектов с достижением в конечном состоянии абсолютного либо относительного покоя.
3. Экспериментальное подтверждение корректности разработанного нового метода математического моделирования при быстром вращении упругого консольного объекта (руки манипулятора) с проверкой адекватности модели.
4. Модели целенаправленных поступательных и вращательных движений исполнительных органов при заданных траекториях в декартовой, полярной и сферической системах координат.

Степень достоверности и апробация результатов обоснована корректностью постановки задач с последующим математическим моделированием с 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.

Разделы диссертационной работы докладывались на: Всероссийской научно-технической молодежной конференции «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника» (Севастополь, 2016г.); международной научно-технической конференции «Автоматизация и приборостроение: проблемы и решения» (Севастополь, 2016г., 2020г. и 2021г.); международной научно-практической конференции «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы» (Москва, 2016 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки XXI века» (Москва, 2016 г.); научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника» (Новокузнецк, 2017г.); «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (г. Севастополь, 2017-2019 гг.), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития и эксплуатации ракетно-артиллерийского, специального вооружения и морской техники» (Севастополь, 2019-2021гг.); Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2020г.); международной конференции «International Conference on Artificial Intelligence & Information Systems 2021» (Китай, г. Чунцин, 2021 г.).

В полном объеме работа докладывалась на объединенных научных семинарах кафедр «Цифровое проектирование», «Технология машиностроения», «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» (СевГУ, 2019-2022 гг.).

Реализован технологический процесс изготовления вентиляционных панелей путём FDM 3D-печати токопроводящим пластиковым филаментом в ООО «Группа Компаний «ЗАИН»; при сохранении качества детали затраты времени снизились с 12 ч до 7,5 ч.

Методология проведенного эксперимента и его 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.

Публикации. Опубликовано 26 научных статей, из них 8 – в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 3 – в иностранном журнале (входит в Scopus/Web of Science), 15 – в сборниках РИНЦ и материалах конференций; получен 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство на государственную регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных литературных источников, содержащего 126 наименований, и

приложения, включающего: пример использования послойного синтеза изделия; акт внедрения результатов работы, акт о результатах экспериментальных исследований, комплекс программ расчета систем с элементами конечной жесткости. Диссертация содержит 89 рисунков и 10 таблиц. Общий объем работы – 172 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность исследования динамического поведения объектов с элементами конечной жесткости в различных областях техники, в том числе – в аддитивных технологиях с FDM 3D-принтерами, 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.

Первая глава посвящена анализу областей использования в современной технике объектов конечной жесткости. Требование повышения производительности оборудования предполагает быстрое перемещение нежестких объектов, которое сопровождается ростом амплитуд колебаний. Дан краткий анализ причин возникновения колебаний (преимущественно в абсолютном движении), их пассивного и активного (управляемого) гашения. В алгоритме 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.

Для исследования колебательных процессов в манипуляторах с упругими звеньями проанализированы структуры FDM 3D-принтеров, изучены целенаправленные движения исполнительных органов при формообразовании деталей (Рис. 1). Патентный анализ свидетельствует о стремительном развитии аддитивных технологий. Необходимо совершенствование целенаправленных движений элементов манипулятора с устранением колебаний и экономией энергии.

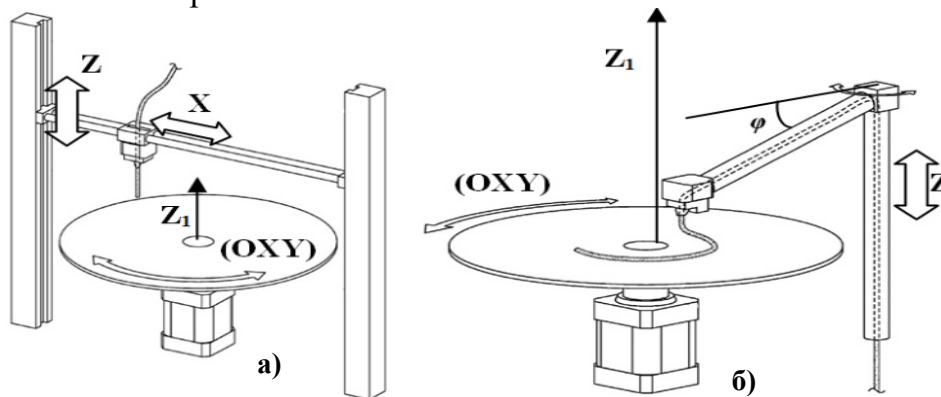


Рис.1 – Модули: а) линейное перемещение печатающей головки и вращение стола; б) вращение печатающей головки и стола

Рассмотрены методы синтеза целенаправленных движений исполнительных органов с элементами конечной жесткости, сформулированы новые задачи исследования.

Во второй главе решены задачи моделирования объектов с упругими элементами, используемых, например, манипуляторами в современном производстве. При быстрых перемещениях возникают колебания исполнительных органов, влияющие на качество создаваемого изделия. Необходимы такие движения, которые прежде всего устраняют колебания исполнительных органов в конечном положении. В работах А.И. Бохонского рассматривались примеры управляемого переносного движения упругих объектов.

Алгоритм конструирования управляемого движения (типа разгон-торможение) упругого объекта иллюстрируется на примере упругой системы с одной степенью свободы.

В абсолютном движении (в неподвижной системе $хоу$) уравнение движения

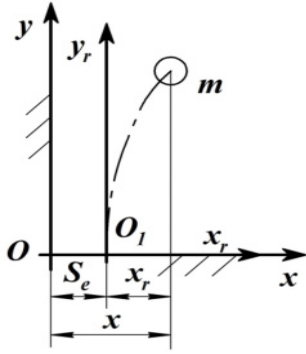


Рис. 2 – Переносное, относительное и абсолютное движения

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -c(x - S_e), \quad (1)$$

где m – сосредоточенная масса; $x = (x_r + S_e)$ – координата в абсолютном движении; x_r – перемещение сосредоточенной массы m в относительном движении (упругие колебания); S_e – координата переносного движения; c – коэффициент жесткости упругого элемента.

В относительном движении (в системе x_r, O_1, y_r):

$$\ddot{x}_r + k^2 x_r = -U_e, \quad (2)$$

где $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – частота собственных колебаний. В переносном движении $\ddot{S}_e = U_e(t)$, где $U_e(t)$ – конструируемое ускорение в виде полинома.

Для $S_e = \sum_{i=1}^6 C_i t^{i+1}$, с учетом цели движения из состояния покоя в конечное состояние покоя и косо́й симметрии переносного ускорения (управления) следуют условия:

$$S_e(0) = 0, \quad S_e(T) = L, \quad \dot{S}_e(0) = 0, \quad \dot{S}_e(T) = 0, \quad U_e(0) + U_e(T) = 0, \quad \dot{U}_e(T/2) = 0, \quad (3)$$

из которых найдены константы $C_1 - C_4$. После факторизации полиномов получено:

$$S_e = \frac{L \cdot t^2}{T^5} (5T^3 - 10t \cdot T^2 + 10t^2 \cdot T - 4t^3), \quad V_e = \dot{S}_e = \frac{dS_e}{dt}, \quad U_e = \frac{10L}{T^2} \left(\frac{T-2t}{T} \right)^3. \quad (4)$$

Функция U_e является решением уравнения Эйлера $\frac{d^4 U_e(t)}{dt^4} = 0$ восстановленного нового функционала-критерия $J_* = \int_0^T [\dot{U}_e(t)]^2 dt$, принимающего минимальное значение.

Время движения T при перемещении упругого объекта из исходного ($S_e(0) = 0, \dot{S}_e(0) = 0, x_r(0) = 0, \dot{x}_r(0) = 0$) в конечное состояние абсолютного покоя ($S_e(T) = L, \dot{S}_e(T) = 0, x_r(T) = 0, \dot{x}_r(T) = 0$) находится как один из общих корней системы трансцендентных уравнений, в которые превращаются моментные соотношения ($x_r(T) = 0, \dot{x}_r(T) = 0$).

На Рис.3 изображены графики переносного движения (для двух функционалов). Моментные соотношения в случае известного критерия ($J = \int U_e^2 dt$, ускорение $U_e^* = \frac{6 \cdot L}{T^3} (T - 2t)$) образуют наиболее простую систему (5) трансцендентных уравнений вида:

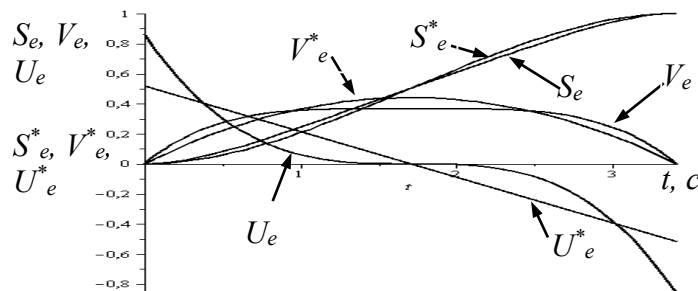


Рис. 3 – Графики переносного движения

$$\begin{aligned} \sin(2\pi n) - \cos(2\pi n)\pi n - \pi n &= 0, \\ \cos(2\pi n) + \sin(2\pi n)\pi n - 1 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Общее время движения $T = \frac{2\pi n}{k}$, где $n = \text{const.}$

Кососимметричные ускорения обеспечивают перемещение упругих объектов за приемлемое минимально возможное время в состояние абсолютного покоя без дополнительных средств подавления коле-

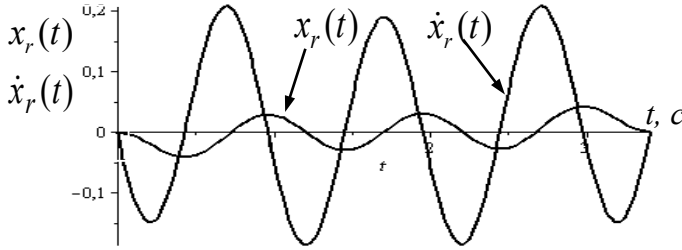


Рис. 4 – Графики относительного движения $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$

баний, т.е. достигается цель движения – выполняются моментные соотношения в относительном движении. Для восстановленного функционала-критерия

$$J = \int_0^T \dot{U}_e^2 dt \quad \text{для } t = T, \quad k = 2\pi/T_1, \quad T_1 = T/n,$$

где T_1 – период колебаний упругого объекта, моментные соотношения представляют собой следующую систему трансцендентных уравнений (6), общие корни которой найдены графически:

$$\begin{aligned} x_r(n) &= 3\sin(2\pi n)\pi^2 n^2 - 6\sin(2\pi n) - \cos(2\pi n)\pi^3 n^3 + 6\cos(2\pi n)\pi n - \pi^3 n^3 + 6\pi n, \\ \dot{x}_r(n) &= 3\cos(2\pi n)\pi^2 n^2 - 6\cos(2\pi n) + \sin(2\pi n)\pi^3 n^3 - 6\sin(2\pi n)\pi n - 3\pi^2 n^2 + 6. \end{aligned} \quad (6)$$

Итак, минимально возможное приемлемое время движения – один из общих корней системы трансцендентных уравнений (6) с учетом возможной реализации движения заданным типом привода. Приведенный алгоритм поиска целенаправленного ускорения переносного поступательного движения используется и в случае вращательного движения.

В системе с линейно-вязким сопротивлением, участвующей в быстром переносном движении, достижение относительного покоя в конце движения обеспечивается, например, заданием начальных условий в относительном движении. Если коэффициент линейно-вязкого сопротивления отличен от нуля, то достижение покоя за время T возможно, например, в случае задания ненулевых начальных условиях ($x_r(0) = x_{r0}$, $\dot{x}_r(0) = \dot{x}_{r0}$), которые при известном времени движения находятся из моментных соотношений, зависящих от начальных условий $x_r(x_{r0}, \dot{x}_{r0}) = 0$, $\dot{x}_r(x_{r0}, \dot{x}_{r0}) = 0$. Показано, что релейное управление (ускорение), найденное с использованием принципа максимума Понтрягина, можно заменить эквивалентным сухим трением. Поведение системы с сухим трением (при его использовании для подавления колебаний) может быть тождественно поведению с релейным управлением.

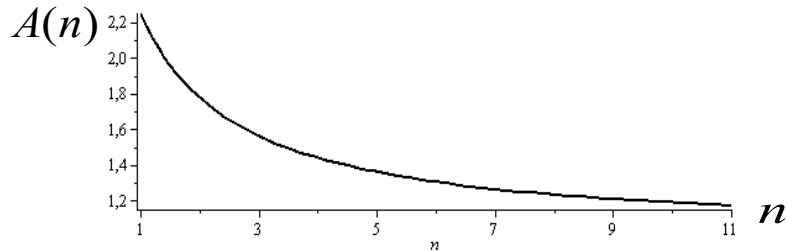
Обобщение результатов исследований позволило для ускорения (управления) переносного движения записать формулу $U_e(t) = \frac{L}{T^2}(2n+4)\left(\frac{T-2t}{T}\right)^n$, из которой следуют известные частные случаи; n – целое нечетное число (1,3,5,7, ...). Скорость и перемещение: $V_e = \int U_e dt + C_1$, $S_e = \int V_e dt + C_2$. Для $t = 0$, с учётом $V_e(0) = 0$ и $S_e(0) = 0$ получено:

$$V_e = \frac{L}{T(n+1)}\left(1 - (T-2t)^{n+1} \cdot T^{-n-1}\right), \quad S_e = \frac{L}{2T(n+1)}\left(T^{-n-1}(T-2t)^{n+2} + 2tn + 4t - T\right).$$

Для примера ($m=1$ кг, $L=1$ м, $T=1$ с) предельно возможная энергия вычисляется как предел интеграла:

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} 2 \cdot \int_0^{T/2} U_e(t) \cdot V_e(t) dt = \text{evalf}\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+2)^2}{(n+1)^2}, n = \text{infinity}\right) = 1. \quad (7)$$

Неопределенность типа $\frac{\infty}{\infty}$ раскрыта с использованием правила Лопиталья. Если, например, при $n=7$ (масса $m=1$ кг) энергия $A=1,2656$ Дж, то при $n=1121$ энергия $A=1,0017$ Дж. Зависимость энергии от степени полинома $A(n)$ изображена на Рис. 5.

Рис. 5 – График $A(n)$

Для заданного расстояния и времени движения объекта из исходного в конечный покой (разгон с торможением) цель движения достижима со снижением энергозатрат. При $n=1$ для критерия $\left(\int_0^T U^2 dt\right)$ с управлением $U = 6L(T-2t)/T^3$ энергия управления

($m = 1 \text{ кг}$) $A = \frac{2.25L^2}{T^2}$ Дж; при $n=3$ и ускорении $U_3 = \frac{10L}{T^5}(T-2t)^3$ энергия уменьшается до

$$A_3 = 1,5625 \frac{L^2}{T^2} \text{ Дж.}$$

В третьей главе общая задача моделирования динамики FDM 3D-принтера разбита на отдельные модели с исполнительными элементами конечной жесткости. Динамика привода (Рис. 6) описывается системой уравнений:

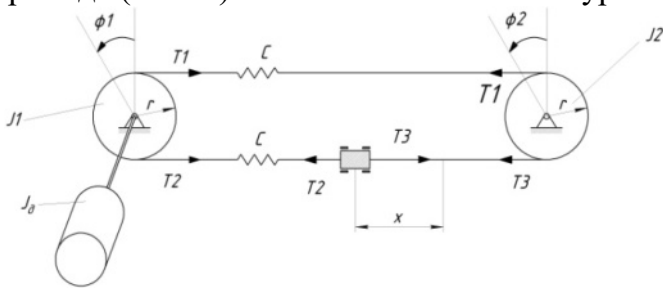
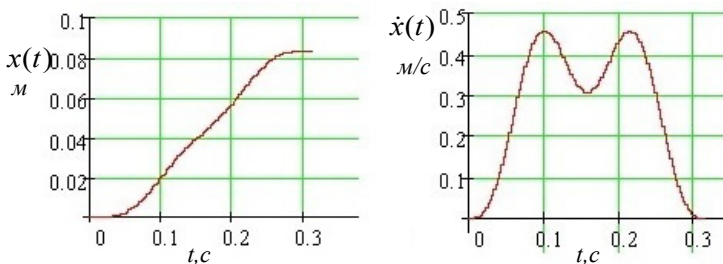


Рис. 6 – Схема привода мехатронного модуля

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} &= -r(T_1 - T_2) - b_1 \dot{\varphi}_1 - rT_0 + M(t) + F_1(t), \\ J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} &= r(T_1 - T_3) - b_2 \dot{\varphi}_2 + rT_0, \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} &= T_3 - T_2 + T_0, \end{aligned} \quad (8)$$

Рис.7 – Результаты моделирования скорости $\dot{x}(t)$ и перемещения $x(t)$ каретки

где J_1, J_2 – физические моменты инерции шкивов; r – радиусы шкивов; φ_1, φ_2 – углы поворотов шкивов; x – перемещение каретки; T_1, T_2, T_3 – натяжение ремня на соответствующих участках ($T_1 = c(r\varphi_1 - r\varphi_2), T_2 = c(x - r\varphi_1), T_3 = c(r\varphi_2 - x)$); c – коэффициент жесткости ремня, Н/м; b_1, b_2 – коэффициенты линейно-вязкого сопротивления; T_0 – начальное натяжение ремня; $M(t)$ – движущий

момент на ведущем валу; $F_1(t)$ – случайная функция. После замены переменных и преобразований без учета J_2 ($J_1 \gg J_2$) система (8) заменена системой с двумя степенями свободы.

Численный пример: $T = 0,315 \text{ с}$; $r = 0,01 \text{ м}$; $L = 0,09 \text{ м}$; $m_1 = 0,01 \text{ кг}$; $m = 0,5 \text{ кг}$; $c = 100 \text{ Н/м}$; $J_1 = \frac{1}{2} m_1 r^2 + J_d$. При заданном ускорении каретки $U_c(t) = \frac{6L}{T^3}(T-t)$ время движения найдено из условий $\dot{\varphi}_1(T) = 0, \dot{x}(T) = 0, x(T) = L$, где L – максимальное перемещение каретки за время движения T . Ускорение шкива равно: $\varepsilon_c(t) = U_e(t) / r$. При $F_1(t) = 0$ графики $x(t)$ и $\dot{x}(t)$ численного интегрирования системы уравнений изображены на Рис.7

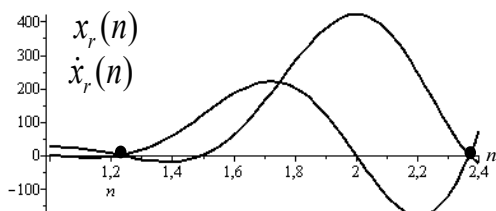


Рис. 9 – Графики $x_r(n)$, $\dot{x}_r(n)$
(указаны два общих корня)

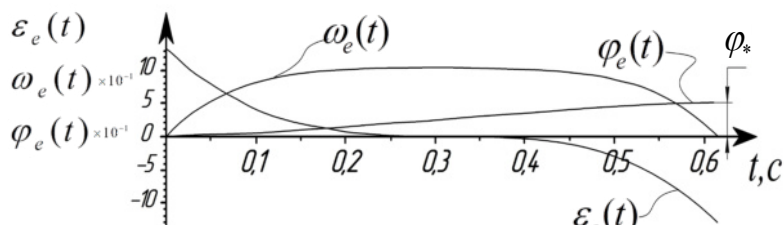


Рис. 10 – Графики $\varphi_e(t)$, $\omega_e(t)$, $\varepsilon_e(t)$

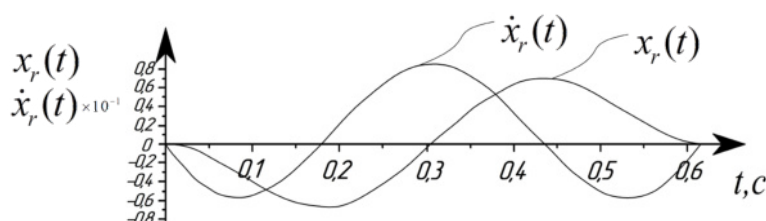


Рис.11 – Графики относительного движения $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$.

колебаний. Принято $T = \frac{2\pi n_*}{k}$, n_* – константа, определяемая из моментных соотношений (6).

При графическом решении системы трансцендентных уравнений (6) (Рис. 9) наименьший общий корень $n_* = 1,23193$. Для $k=4\pi$ c^{-1} время движения $T=0,616$ с. Графики переносного движения $\varepsilon_e(t)$, $\omega_e(t)$, $\varphi_e(t)$ изображены на Рис.10, а относительного $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$ – на Рис.11; достигается абсолютный покой как сумма переносного и относительного.

Ускорения сравнивались (для $m=1$ кг) по критериям: норма мощности, энергия, затраченная на управление, действие по Лагранжу. Ускорение, полученное в результате конструирования, приводит к снижению энергии на реализацию движения.

В четвертой главе переносное угловое ускорение (управление) за приемлемое время T обеспечивает поворот на угол φ_* упругого стержня из исходного в конечное состояние абсолютного покоя; использованы краевые условия: $\varphi_e(0) = 0$, $\dot{\varphi}_e(0) = 0$, $\varphi_e(T) = \varphi_*$, $\dot{\varphi}_e(T) = 0$. Выражения для ускорения, угловой скорости и угла поворота принимают вид:

$$\varepsilon_e(t) = a \cdot \sin(pt), \quad \omega_e(t) = \frac{a}{p} \cdot (1 - \cos pt), \quad \varphi_e(t) = \frac{a}{p} \cdot \left(t - \frac{1}{p} \sin pt\right), \quad (10)$$

где $p = const$, $a = \frac{\phi_* p^2}{2\pi}$; $p = \frac{2\pi}{T}$.

В относительном движении изгибные колебания упругого стержня описываются уравнением

$$EJ \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} = -f(x,t), \quad (11)$$

где EJ – изгибная жёсткость стержня (E – модуль упругости первого рода; J – осевой момент инерции поперечного сечения); m – распределённая масса (кг/м); $f(x,t) = \varepsilon_e(t) \cdot x \cdot m$, где угловое ускорение $\varepsilon_e(t)$ принято согласно (10). Для учитываемой первой моды колебаний решение уравнения (11) по методу Фурье: $W_1(x,t) = W_1(x) \cdot \sin(pt)$.

Из (11) следует уравнение для моды колебаний:

$$\frac{d^4 W_1(x)}{dx^4} - k^4 W_1(x) = -\frac{\phi_* p^2 m \cdot x}{2\pi \cdot EJ}, \quad (12)$$

где $k_1^4 = \frac{mp^2}{EJ}$. Решение неоднородного уравнения (12) найдено с использованием функций А.Н. Крылова:

$$W_1(x) = A \cdot S(x) + B \cdot T(x) + C \cdot U(x) + D \cdot V(x) + \frac{\phi_* p^2 m \cdot x}{2\pi \cdot k_1^4 EJ}. \quad (13)$$

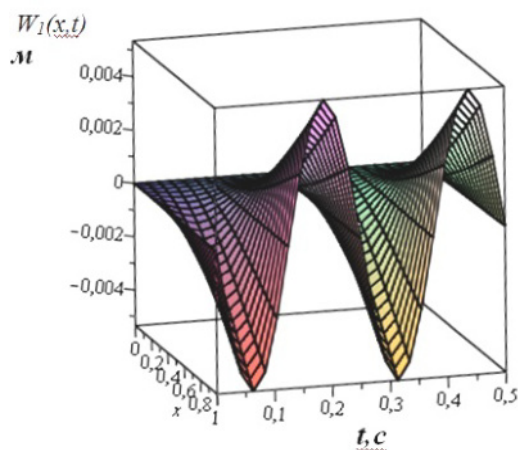


Рис. 12 – Колебания стержня (относительное движение)

График функции $W_1(x,t) = W_1(x) \cdot \sin(pt)$ изображен на Рис.12. При $t = T$ достигается абсолютный покой.

Для уточнения частоты собственных колебаний ω_1 разработана установка (Рис.13) в лаборатории СевГУ (г. Севастополь). Использовано оборудование: 1 – серводвигатель, 2 – сервоконтроллер, 3 – муфта, 4 – консольный стержень (диаметр $d_{cm} = 5,5$ мм, длина $l_{cm} = 100$ см), 5 – акселерометр MPU-6050, 6 – Arduino MEGA 2560. На свободном конце стержня закреплялся акселерометр MPU-6050, выходы которого соединены с Arduino MEGA 2560, передающего данные об ускорении на компьютер со средой Arduino Genuino 1.6.9 для загрузки программы в Arduino MEGA 2560 и передачи сигнала от датчика на ПК.

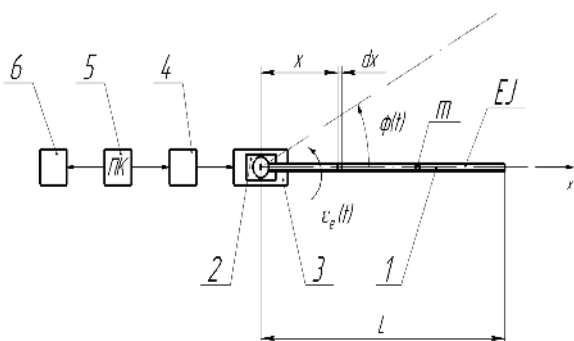


Рис. 13 – Схема установки

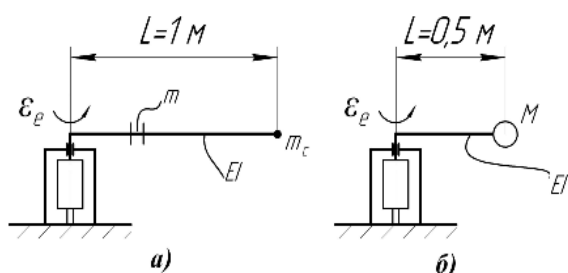


Рис. 14 – Схемы с релейным угловым ускорением стержня

Приняты краевые условия: $W_1(0) = 0$, $W_1'(0) = 0$, $W_1''(L) = 0$, $W_1'''(L) = 0$. Исходные данные: удельный вес материала $\gamma = 7800$ кг/м³; модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; диаметр стержня $d = 0,55 \cdot 10^{-2}$ м; длина $L = 1$ м, $k_1 = \frac{\pi}{L}$;

$$m = \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 0,1853 \text{ кг/м}; \quad J = \frac{\pi d^4}{64} = 0,1853 \text{ м}^4.$$

Частота первого тона: $\omega_1 = \frac{\lambda_1^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} = 25,08 \text{ с}^{-1}$, где

$$\lambda_1 = 1,875; \quad \text{период } T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} \approx 0,25 \text{ с}.$$

Экспериментальное значение периода собственных колебаний $T_1 = 0,29881$ с и частоты

$$\omega = \frac{2\pi}{T_1} = 21,03 \text{ с}^{-1}, \quad p = \frac{\omega}{2} = 10,514 \text{ с}^{-1}; \quad \text{общее}$$

время движения $T = \frac{2\pi}{p} = 0,59762$ с. Угловое уско-

рение задается как $\varepsilon_e(t) = 13,817 \cdot \sin(10,514 \cdot t)$.

На Рис. 14 представлены схемы вращательного движения объекта в виде консольного упругого стержня с сосредоточенной массой. Угловое ускорение:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{d^2 \varphi_e}{dt^2} = \varepsilon_1 \left(H(t) - 2H\left(t - \frac{T}{2}\right) + H(t - T) \right), \quad (14)$$

где $\varepsilon_1 = \text{const}$; T – общее время вращения; где $H = \text{Heviside}$. Угловая скорость и ускорение:

$$\frac{d\varphi_e(t)}{dt} = \omega_e(t), \quad \frac{d\omega_e(t)}{dt} = \varepsilon_e(t).$$

Краевые условия в переносном движении из исходного покоя в конечное состояние покоя: $\varphi_e(0) = 0$; $\omega_e(0) = 0$; $\varphi_e(T) = \varphi_1$; $\omega_e(T) = 0$.

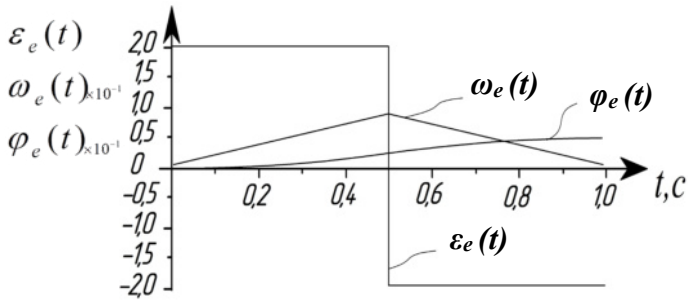


Рис. 15 – Графики переносного движения:
 $\varepsilon_e(t)$, $\omega_e(t)$, $\varphi_e(t)$.

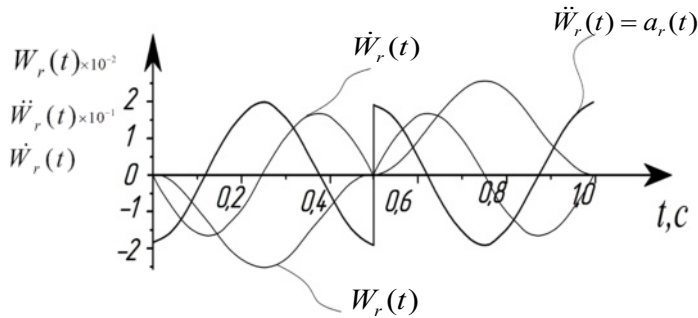


Рис. 16 – Графики относительного движения

За время T осуществляется поворот объекта на угол φ_1 в новое состояние покоя. Вынужденные колебания сосредоточенной массы в относительном движении описываются уравнением:

$$\frac{d^2W}{dt^2} + k^2W = -L \cdot \varepsilon_e(t), \quad (15)$$

где k^2 – квадрат частоты собственных колебаний; L – длина консоли.

Вариант а): $L=1$ м; $k=4\pi$ с⁻¹. Период собственных колебаний $T_1=2\pi/k=0,5$ с. Время движения $T=2T_1=1$ с. Графики относительного движения изображены на Рис. 16. Перемещение в относительном движении:

$$W(t) = \frac{(\cos(kt) - 1)}{8\pi^2} \cdot \left(H(t) - 2H\left(t - \frac{T}{2}\right) + H(t - T) \right). \quad (16)$$

При $t=T$ наступает относительный покой ($W(T)=0$, $\dot{W}(T)=0$).

Для графиков (Рис. 15) $\varphi_e(t)$, $\omega_e(t)$ и $\varepsilon_e(t)$ принято $T=1$ с; $E_I=2$ с⁻²; упругий стержень поворачивается за время $T=1$ с на $0,5$ рад. Исходные данные (схема, Рис. 14а):

$L=1,0$ м; диаметр стержня $d=0,005$ м; момент инерции $I = \frac{\pi d^4}{64}$ м⁴; $\alpha = \sqrt[4]{\frac{mk^2}{EI}}$; $\lambda = \alpha \cdot L$.

Сосредоточенная масса M найдена из трансцендентного уравнения (17):

$$\frac{M}{mL} \cdot \lambda (\tan(\lambda) - \tanh(\lambda)) - \left(1 + \frac{1}{\cosh(\lambda) \cdot \cos(\lambda)} \right) = 0. \quad (17)$$

$M=0,086$ кг, $m_c = m \cdot L = 0,153$ кг.

Вариант б): При прежних исходных данных для схемы (Рис. 14б) и сосредоточенной массы $M=1$ кг найден вылет консоли L . Из трансцендентного уравнения (14) получен корень $L = 0,494 \approx 0,5$ м. Теперь ($L = 0,5$ м, $M \approx 1$ кг) частота $k = 4\pi$ с⁻¹, период

$T_1 = \frac{2\pi}{k} = 0,5$ с. Общее время движения $T = 2T_1 \approx 1$ с.

Действительный движущий момент, обеспечивающий релейное угловое ускорение, найден из уравнения вращения стержня (с учетом линейно-вязкого сопротивления, физического момента инерции ротора двигателя и деталей, участвующих во вращении):

$$M_\phi(t) = I_0 \frac{d^2\varphi_e}{dt^2} + k_1 \frac{d\varphi_e}{dt} + M_T, \quad (18)$$

где $I_0 = I_c + I_d$; $I_c = ML^2 + \frac{(mL)^2}{3}$; I_d – момент инерции ротора; M_T – момент трения.

При использовании релейного углового ускорения уточнено влияние геометрических и физических параметров упругого объекта на его динамическое поведение.

В пятой главе с использованием робота (Mitsubishi Robot RV-1A) в лаборатории кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» выполнена экспериментальная проверка оптимальных вращений вокруг неподвижной оси (задан угол и время) консольного стержня конечной жесткости с распределенной массой из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Этапы исследования вращательного движения включают: формирование управлений – релейного и эквивалентного гармонического; статистическая обработка результатов измерений; сопоставление теоретических и экспериментальных кинематических параметров движения.

Для случая релейного углового ускорения принято

$$\varepsilon_e(t) = \varepsilon_0 \left(H(t) - 2H\left(t - \frac{T}{2}\right) + H(t - T) \right). \quad (19)$$

Интегрирование функции (16) приводит к выражениям для $\omega_e(t)$ и $\varphi_e(t)$. Исходные данные:

$J = \frac{\pi d^4}{64}$ – момент инерции; $d = 0,005 \text{ м}$ – диаметр стержня; $m_0 = \frac{\pi d^2}{4} L_1 \gamma$ – масса стержня;

$L_1 = 1 \text{ м}$ – длина консоли; частота $k = (1,875)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m L_1^4}} = 20,682 \text{ с}^{-1}$.

Данные об ускорении конца стержня получены с помощью Arduino Mega и присоединенного к нему модуля GY-521. Программирование осуществлялось в среде COSIROP на языке MELFA BASIC IV. К механическому интерфейсу кисти (ось J6) робота жестко прикреплен экспериментальный образец (Рис.17).



Рис.17 – Экспериментальный стенд для исследования вращения стержня

Решение, обеспечивающее удовлетворительное согласование с экспериментом, найдено при сведении исходной системы с распределенной массой к эквивалентной с сосредоточенной по условию равенства частот собственных колебаний. Перемещение конца стержня описывается уравнением

$$\frac{d^2 W_1}{dt^2} + k^2 W_1 = -L_1 \varepsilon_e(t). \quad (20)$$

Результаты измерений ускорения конца консоли представлены массивом с шагом $\Delta t = 0,055 \text{ с}$. Для аппроксимации ускорения конца консоли использована функция

$$U_e(t) = -B \sin pt - C \sin kt, \quad (21)$$

где $B, C, p, k = \text{const}$, k – частота первого тона колебаний. Дано сравнение экспериментальных результатов с эквивалентным релейному гармоническим воздействием

$\varepsilon_e^*(t) = \varepsilon_0 \sin(pt)$ при условии $\int_0^{T/2} \varepsilon_0^* \sin(pt) dt = \frac{\varepsilon_0 T}{2}$, где $T = \frac{2\pi}{p}$, $p = \frac{k}{4}$.

В переносном движении $\varphi_e(0) = 0$, $\omega_e(0) = 0$, $\varphi_e(T) - \varphi^* = 0$, где $\varphi^* = \pi/2$ – конечный угол поворота; в относительном движении конца стержня $\left(\varepsilon_0^* = \frac{\varphi^* p^2}{2\pi} \right)$, ускорение, скорость и угол поворота принимают вид:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\varphi^* p^2}{2\pi} \sin(pt); \quad \omega_e(t) = \frac{\varphi^* p}{2\pi} (1 - \cos(pt)); \quad \varphi_e(t) = \frac{\varphi^* p}{2\pi} \left(t - \frac{1}{p} \sin(pt)\right).$$

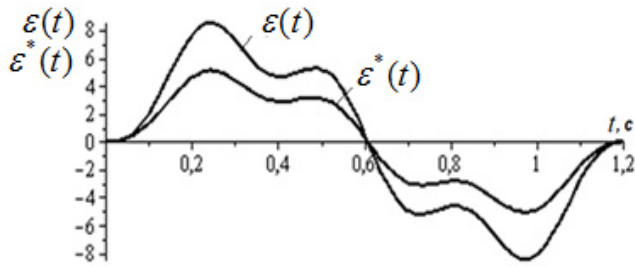


Рис. 18 – Графики экспериментального $\varepsilon_e^*(t)$ и теоретического $\varepsilon_e(t)$ ускорений конца стержня

При $t=T$ наступает относительный покой: $W_1(T) = 0$, $\dot{W}_1(T) = 0$, $\ddot{W}_1(T) = 0$. С учетом $\varphi^* = \frac{\pi}{2}$ и времени $T = 1,2$ с графики $\varepsilon_e(t)$ и $\varepsilon_e^*(t)$ изображены на Рис.18.

Рис. 19 отражает характер изменения ускорений конца стержня при: реальном движении, приближенной функции и полученной с использованием встроенной процедуры MOV.

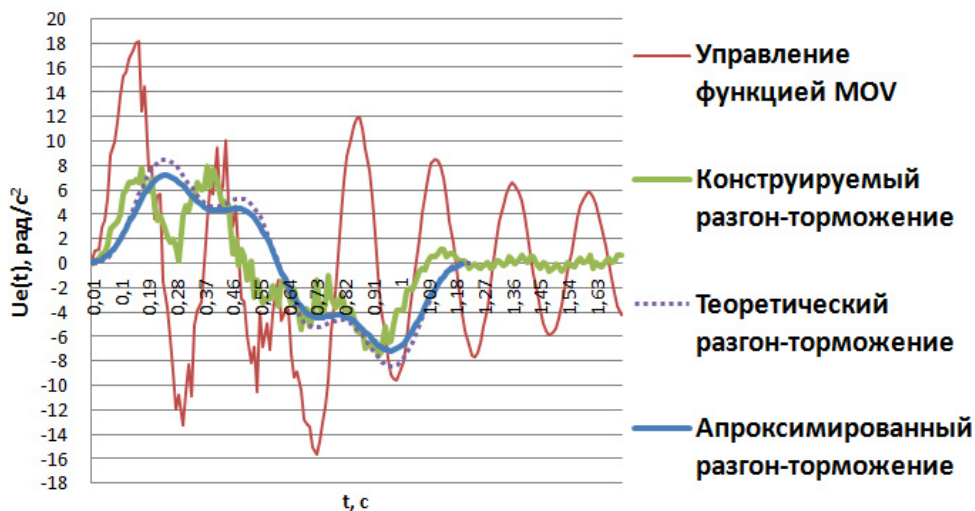


Рис. 19 – Совмещенные графики ускорения свободного конца стержня

Доказана эффективность синтезированного углового ускорения объекта для достижения состояния покоя после поворота на заданный угол.

Конструирование углового ускорения включает этапы: формулирование цели движения; задание ускорения в виде полинома, степень которого уточняется в процессе анализа цели движения с минимальной энергоемкостью; формулирование краевых условий и условий кривой симметрии ускорения; решение системы алгебраических уравнений (определение констант полинома), факторизация полинома; получение выражений для перемещения, скорости и ускорения переносного движения; восстановление уравнения Эйлера и функционала-критерия; сравнение в частном случае результата конструирования с примером известного решения, найденного классическим вариационным методом.

При конструировании целенаправленного ускорения типа разгон-торможение выявлена закономерность: с увеличением степени задаваемого полинома энергоемкость уменьшается по сравнению с известным управлением, найденным классическим вариационным методом (с использованием заранее задаваемого критерия в виде нормы мощности).

Результаты экспериментальных исследований подтвердили практическую возможность использования кососимметричных угловых ускорений упругих объектов при вращении вокруг неподвижной оси.

В Приложении приведен аналитический 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). Непосредственно результаты использованы для изготовления экранирующих электромагнитное излучение вентиляционных панелей электронных аппаратов.

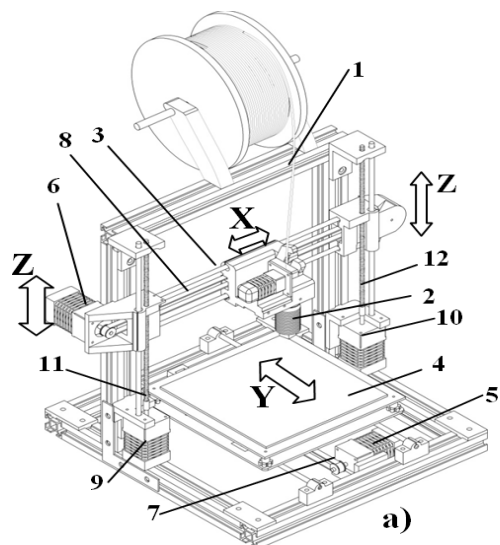


Рис. 20 – Схема 3D-принтера, печатающего панели в декартовой системе координат

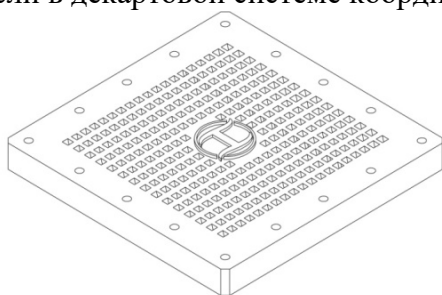


Рис. 21 – Вентиляционная панель

Для трансформирования материала 1 печатающая головка 2 с экструдером размещена на подвижной поперечине 3. Рабочая поверхность – подвижный стол 4, на котором формируются слои изделия из расплавленного материала. Вращения шаговых приводов 5, 6 посредством ременных передач 7, 8 преобразуются в линейные перемещения печатающей головки и стола по осям X и Y соответственно; вращение шаговых приводов 9, 10 – в перемещения по оси Z подвижной поперечины (передачами 11,12).

Технологический процесс послойного синтеза детали из полимерного материала осуществлялся при согласовании программных действий элементов системы. Необходимые свойства детали учитывались при выборе материала, что отражено в настройке параметров печати: скорости перемещения рабочего стола, печатающей головки, подачи материала, температуры сопла печатающей головки, рабочего стола и окружающей среды. Совокупность указанных параметров влияет на скорость формирования слоя изделия,

производительность системы и стоимость изделия. Исследовано использование технологии FDM 3D-печати для процесса изготовления панелей с отверстиями (Рис. 21).

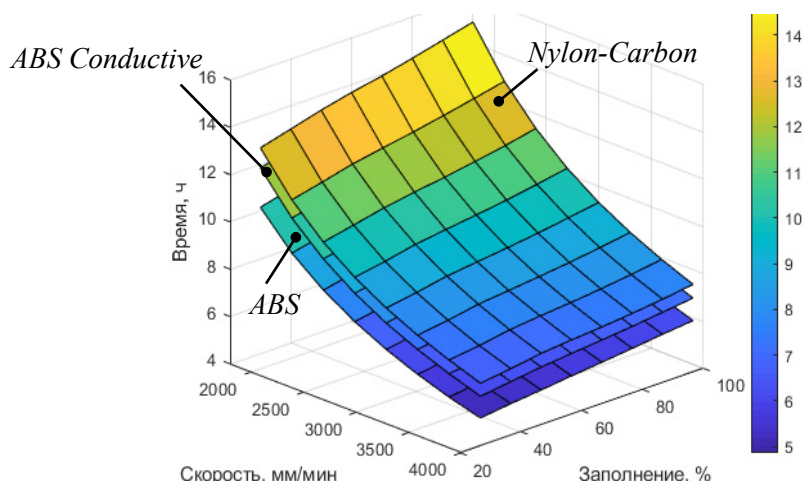


Рис. 22 – Затраты времени при печати панели из пластика ABS, ABS Conductive, Nylon Carbon 2 при вертикальном размещении

С помощью программы Prusa3D Slic3r MK2 смоделированы временные затраты при согласовании скоростей перемещения печатающей головки и стола, степени (%) внутреннего заполнения детали материалом при вертикальном расположении (Рис.22).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создан и исследован метод моделирования целенаправленных поступательных и вращательных переносных ускорений объектов с упругими элементами, исключающий необходимость использования дополнительной энергии для подавления упругих колебаний в конце движения.
2. Моделирование ускорений упругих объектов основано на использовании алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления с учетом итерационной процедуры поиска приемлемого времени движения из числа общих корней системы трансцендентных уравнений (моментных соотношений в относительном движении). При возрастании степени задаваемого полинома ускорения выявлено снижение энергоемкости движения без потери производительности и точности позиционирования. Разработаны новые математические модели исследования динамики целенаправленного движения исполнительных органов объектов современной техники с оценкой влияния элементов конечной жесткости на точность выполнения рабочих операций.
3. Исследованы динамические свойства систем с упругими элементами, сосредоточенными и распределенными массами при целенаправленных поступательных и вращательных движениях. На основе манипулятора Mitsubishi MELFA RV-1A разработан лабораторный экспериментальный стенд и создана методика для реализации и анализа переносного углового ускорения консоли конечной жесткости с распределенной массой. При быстром вращении в конце движения снижаются (практически в 5-9 раз) колебания конца консоли, что согласуется с результатами математического моделирования (Maple, MathCAD, MATLAB).
4. Теоретически доказано и экспериментально установлено, что абсолютный либо относительный покой движущегося упругого объекта достигается при использовании широкого класса кососимметричных ускорений типа «разгон-торможение». Результаты исследования целенаправленных движений объектов применены для реализации формообразующих траекторий исполнительных элементов 3D-принтеров. Изучены и систематизированы конструкции и тенденции в развитии манипуляторов с возможностью FDM 3D-печати. Полученные результаты использованы для изготовления экранирующих ЭМИ вентиляционных панелей. Повышена производительность аддитивного технологического процесса (с 12 ч до 7,5 ч) без потери качества изготавливаемых панелей.
5. В Приложении к диссертации представлены разработанные программы компьютерного моделирования динамики целенаправленных движений объектов с элементами конечной жесткости, акты внедрения, патент и свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК и приравненных к ним (п.10 Постановления Правительства РФ №723 от 30.07.2014г.):

1. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Материалы Международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем».* – Орёл: ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс». – 2016. – №3(317) – С.70-76.
2. Бохонский А.И. Оптимальность конструируемых управлений перемещением объектов / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* Орёл: ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. – 2017. – №3(323). – С.31-38.
3. Бохонский А.И. Оптимальное управление манипулятором с упругой рукой / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* Орёл: ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. – 2018. – №4-1(330). – С.73-79.
4. Бохонский А.И. Использование телескопического манипулятора для оптимального перемещения объекта по прямой в пространстве / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* Орёл: ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2018. – №3(329). – С.29-35.
5. Бохонский А.И. Проектирование упругого объекта для исследования оптимального переносного вращательного движения вокруг неподвижной оси / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* Орёл: ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2019. – № 4-2(336). – С. 101-106.
6. Бохонский А.И. Проектирование манипуляторов минимальной массы с компенсацией перемещений / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* Орёл: ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. – 2020. – №4-2(342). – С. 169-179.
7. Бохонский А.И. Принцип и теоремы реверсионного исчисления / А.И. Бохонский, Н.И.Варминская, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* Орёл: ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2021. – № 3 (347). – С. 12-20.
8. Бохонский А.И. Алгоритм конструирования оптимального движения упругого объекта / А.И. Бохонский [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* Орёл: ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. – 2021. – № 4 (348). – С. 33-38.

Патенты на изобретения и полезные модели (п.13 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842):

9. Патент 2655118 Российская федерация, МПК В29С 64/118 (2017.01), В33У 10/00 (2015.01), В29С 31/00 (2006.01). Способ изготовления вентиляционной панели, экранирующей электромагнитное излучение / Якунин В. А., Рыжков А. И. / заявитель и

патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Группа Компаний «ЗАИН» (RU) – № 2017119733, заявл. 06.06.2017. опубл. 23.05.2018 Бюл. № 15. – 12с.

10. Рыжков А.И. Моделирование динамики вращения консольного элемента конечной жесткости / А.И. Рыжков // Свидетельство на государственную регистрацию программ для ЭВМ, № 2022617104, дата регистрации 18.04.2022.

В международных изданиях, включенных в Web of Science и Scopus:

11. Bokhonsky, A. Experimental test of the optimal rotation for the finite stiffness cantilever rod / A. Bokhonsky, M. Maistrishin, A. Ryzhkov // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) MATEC Web of Conferences. – 2017. – 129, 03021. – P. 1–4.

12. Bokhonsky, A. Reducing of energy consumption for the object's motion with designed optimum control / A. Bokhonsky, N. Varminskaya, A. Ryzhkov // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science MATEC Web Conferences. – 2020. – 329, 03064. – P.1-7.

13. Bokhonsky, A. Minimum energy capacity for «acceleration-braking» control / A. Bokhonsky, N. Varminskaya, M. Maistrishin, A. Ryzhkov // 2021 International Conference on Artificial Intelligence & Information Systems. – 2021. – №3. – P.1-5.

Статьи и материалы конференций, опубликованные в других изданиях:

14. Бохонский А.И. Релейное оптимальное управление как аналог сухого трения / А.И. Бохонский, Т.В. Мозолевская, А.И. Рыжков // Международный сборник научных трудов ДонНТУ «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» Донецкий национальный технический университет. – Донецк: Изд-во ДонНТУ. – 2016. – Вып.№2(53). – С.16-22.

15. Бохонский А.И. Динамика мехатронного модуля с учетом конечной жесткости ременной передачи / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2016: Материалы Всероссийской научн.-техн. конф., Севастополь 19-21 мая 2016 г. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ». – 2016. – С. 122-126.

16. Бохонский А.И. Энергоёмкость управлений перемещением объектов / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Материалы международной научно-технической конференции Автоматизация и приборостроение: проблемы и решения: материалы междунар. науч.-техн. конф. Севастополь, 5-9 сентября 2016г. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2016. – С.18-21.

17. Бохонский А.И. Оптимальное перемещение упругого объекта с учетом линейно-вязкого сопротивления / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Сборник публикаций научного журнала «Chronos» по материалам VII международной научно-практической конференции 2 часть: «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы» г. Москва: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – Москва: Научный журнал «Chronos». – 2016. – С.81-87.

18. Бохонский А.И. Конструирование линейного объекта по заданным функциям выхода / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Сборник статей международной исследовательской организации «Cognitio» по материалам XIII международной научно-практической конференции: «Актуальные проблемы науки XXI века» 2 часть, г. Москва: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – Москва: Международная исследовательская организация «Cognitio». – 2016. – С.9-13.

19. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Мехатроника, автоматика и робототехника: материалы международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №1. – С.64-69.
20. Бохонский А.И. Оптимальное перемещение упругого объекта с учетом в относительном движении линейно-вязкого сопротивления / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Современные проблемы теории машин. – Новокузнецк: ИП Жукова Елена Валерьевна. – 2017. – №5. – С.7-9.
21. Бохонский А.И. Управление перемещением исполнительных органов манипуляторов при заданной геометрии создаваемого объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Сборник научных трудов Черноморского высшего военно-морского училища – Севастополь: ЧВВМУ имени П.С. Нахимова, – 2018. – Вып. 1(10). – С.175-180.
22. Бохонский А.И. Пример конструирования управляемого движения упругого объекта / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Вестник современных технологий. Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ». – 2019. – № 2 (14). – С. 55-58.
23. Бохонский А.И. Моделирование оптимального переносного вращательного движения упругой системы / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ». – 2019. – № 4 (8). – С. 40-48.
24. Бохонский А.И. Экспериментальная проверка оптимального вращения упругого стержня / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ». – 2020. – № 2(10). – С. 3-16.
25. Бохонский А.И. Алгоритмы реверсионного конструирования оптимальных управлений переносным движением объектов / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ». – 2020. – № 3(11). – С. 12-19.
26. Бохонский А.И. Снижение энергоемкости реверсионно конструируемого переносного ускорения объекта / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ». – 2020. – № 4(12). – С. 52-60.
27. Бохонский А.И. Управление с минимальной энергией переносным движением объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ». – 2021. – № 1(13). – С. 76-83.
28. Бохонский А.И. Минимизация энергии управления для реализации цели движения / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Фундаментальные основы механики – СПб: ИП Жукова Елена Валерьевна. – 2021. – №7. – С.13-17.

Рыжков Александр Игоревич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем» (ИПТС), Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (СевГУ)

(протокол № 22/7 от 28.06. 2022г.)

Заказ № 122 Тираж 120 экз.

Отпечатано на ризографе типографии ООО «Рибест»

Адрес: ул. Рыбаков, 7, г. Севастополь 299014

E-mail: ribest_d@mail.ru