

На правах рукописи

Нунупаров Армен Мартынович

**Проблемы механики и управления движением мобильных
капсульных роботов и роботов с термомеханическими
актюаторами**

Специальность 01.02.01 —
«Теоретическая механика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

Научный руководитель: д.ф.-м.н., член-корр. РАН
Болотник Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Баландин Дмитрий Владимирович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского, Институт информационных
технологий, математики и механики, заведующий
кафедрой дифференциальных уравнений,
математического и численного анализа

Брискин Евгений Самуилович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Волгоградский государственный технический уни-
верситет, заведующий кафедрой теоретической
механики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования «Мос-
ковский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Защита состоится 6 февраля 2020 г. в 15 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.240.01 при ИПМех РАН по адресу: 119526 г. Москва, пр-т Вернад-
ского, д. 101, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН
<http://www.ipmnet.ru/diss/diss>.

Автореферат разослан " __ " _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.240.01,
к.ф.-м.н.

Е.Я. Сысоева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Диссертация посвящена проблемам механики и управления движением, которые порождены разработкой и эксплуатацией некоторых новых типов локомоционных роботов.

Роботизированные устройства представляют собой сложные механические системы, при эксплуатации которых могут возникать различные динамические явления, в частности, явление резонанса. В основе исследования таких систем лежат методы теоретической механики. Одной из разновидностей роботизированных устройств являются локомоционные роботы, которые находят многочисленные приложения. Локомоционные роботы используются для автоматизации производства, доставки грузов и людей, мониторинга местности, медицины, для работы в агрессивных средах, освоения космоса. Совершенствование существующих типов локомоционных роботов и разработка новых конструкций – актуальная научно-техническая проблема. Как правило, в предлагаемых решениях локомоционных систем используются конструктивно сложные движители, содержащие большое количество составных элементов. В настоящее время наблюдается тенденция к минитюаризации технического оборудования, и робототехника не является исключением. В диссертации изучаются два принципа перемещения механических систем, которые обладают хорошим потенциалом к минитюаризации. В основе первого принципа лежит управление движением робота за счет перемещений внутренних масс, в другом используется биморфная структура системы, движение которой организуется через управляемую деформацию актюаторов, основанную на термомеханическом эффекте.

Под капсульным роботом понимается механическая система, перемещающаяся в сопротивляющихся средах без внешних движителей (ног, колес, гусениц, плавников, гребных винтов) за счет движения внутренних тел при наличии силового взаимодействия корпуса робота с внешней средой. В настоящей работе рассмотрен капсульный робот с упругим элементом. Корпус и внутреннее тело такого робота соединены пружиной, поэтому в системе появляется колебательное звено (корпус–пружина–внутреннее тело), которое характеризуется собственной частотой, и, следовательно, можно ожидать резонансных явлений, если сила возбуждения, действующая между корпусом и внутренним телом, изменяется периодически. Эти явления следует учитывать при формировании режима управления. Рассматривается простая модель, которая может перемещаться по прямой линии на шероховатой горизонтальной плоскости и включает в себя одно внутреннее тело, соединенное с корпусом пружиной с линейной характеристикой. Предполагается, что управляющая сила периодически изменяется в кусочно-постоянном широтно-импульсном режиме. Такой выбор обоснован относительной простотой данной модели для выявления и анализа резонансных особенностей в поведении робота. Следует отметить, что широтно-импульсный режим управления широко распространен в механических и электромеханических системах, использующихся в технике.

Активные исследования подвижных микроструктур, базирующихся на термомеханическом эффекте, ведутся с конца 80-х годов прошлого столетия. Первые образцы биморфных структур были получены в начале 20 века. За это время разработано большое количество различных по функциональности и принципу действия конструкций, демонстрирующих эффективность их применения в современной микроробототехнике. Кремниевополиимидные термомеханические актуаторы обладают высокой устойчивостью к внешним негативно воздействующим факторам космического пространства, что позволяет их использовать в устройствах космического назначения. Помимо этого, устройства, основанные на термомеханическом эффекте, характеризуются высокой функциональной эффективностью и простотой технологической реализации. Практическая космонавтика испытывает потребность в мобильных микророботах небольшого размера, способных произвести автоматическую инспекцию узких и длинных каналов на космических аппаратах, которые трудно обследовать с помощью ручных щупов. В рамках проекта РНФ №14-19-00949, одним из исполнителей которого был автор, предложено использовать термомеханические кремниевополиимидные актуаторы в качестве исполнительных элементов микроробототехнических систем космического назначения, а именно, в качестве ног шагающего микроробота для перемещения по внутренней или внешней поверхности орбитального космического аппарата. При выполнении проекта выявлена необходимость в адекватной и по возможности простой математической модели разрабатываемого термомеханического актуатора.

Целью данной работы является изучение динамики и принципов управления движением новых типов локомоторных систем, а именно, капсульного робота с упругим элементом, связывающим корпус и внутреннее тело, и шагающего миниатюрного робота с термомеханическими кремниевополиимидными актуаторами. Капсульные роботы имеют перспективу использования в качестве транспортных механизмов для перемещения в стесненных пространственных условиях, например, в узких трубах для производства инспекционных работ. Исследования, связанные с шагающим роботом на основе термомеханических актуаторов, возникли при выполнении поискового проекта по созданию миниатюрных мобильных роботов, обслуживающих орбитальные космические аппараты. Термомеханические актуаторы имеют ряд преимуществ перед другими типами исполнительных механизмов, одно из которых – возможность сочетания двигателя и движителя в одном устройстве, что важно для миниатюризации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать и исследовать теоретико-механическую модель капсульного робота с возвратной пружиной. Изучить влияние параметров управления на динамику робота. Изучить возможности оптимизации конструкции капсульного робота.

2. Провести экспериментальное исследование прототипа капсульного робота. Найти подтверждение или опровержение выводов о динамическом поведении робота, сделанных на основе математического моделирования.
3. Построить математическую модель кремниевополиимидного термомеханического актюатора, пригодную для моделирования его функционирования в составе шагающего космического микроробота. Сопоставить экспериментальную и математическую модели актюатора.

Научная новизна:

1. Механические системы типа капсульного робота с возвратной пружиной изучались ранее. Однако в случае кусочно-постоянного возбуждающего сигнала резонансный характер смены знака средней скорости механической системы, а также изменение знака средней скорости вследствие вариации коэффициента заполнения управляющего сигнала установлены впервые.
2. Предложен и обоснован способ управления капсульным роботом, основанный на изменении коэффициента заполнения управляющего сигнала при фиксированном оптимальном значении периода. Такой способ управления обеспечивает реализацию максимального диапазона скоростей движения робота.
3. Устройство биморфного термомеханического актюатора представляет собой сложную термомеханическую систему с распределенными параметрами. Впервые строится упрощенная математическая модель такой системы в виде шарнирного многосвязника, один конец которого закреплен на горизонтальной направляющей, а на свободный конец действует сосредоточенная сила. В такой модели сложная структура биморфного соединения моделируется упругими элементами шарниров.

Практическая значимость. Предложенные в рамках диссертационной работы методы и результаты могут быть использованы при исследовании и обосновании возможности управления движением капсульных локомоционных систем и робототехнических систем с термомеханическими актюаторами. Капсульные роботы могут найти применение в технике, прежде всего, для транспортировки миниатюрного оборудования в условиях стесненного пространства (в узких трубах, щелях и т.п.). Мобильные роботы с термомеханическими актюаторами представляются перспективными для использования в космонавтике. Для проектирования и эксплуатации этих типов роботов, необходимо знать их свойства, как динамических систем и принципиальные возможности управления. Эти знания были получены или существенно дополнены в диссертации.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели используются методы теоретической механики, математического и натурального моделирования. Компьютерные модели реализованы в среде MATLAB и программах, разработанных автором на языке python с использованием библиотек

для научных исследований (numpy, scipy, matplotlib). Для идентификации параметров математических моделей по результатам экспериментов используются алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что изменяя коэффициент заполнения периодического широтно-импульсного управляющего сигнала можно управлять величиной и направлением средней скорости движения капсульного робота с возвратной пружиной вдоль прямой на плоскости с сухим трением.
2. Обнаружен резонансный характер смены знака средней скорости капсульного робота при монотонном изменении периода возбуждающего сигнала.
3. Разработана и верифицирована новая математическая модель для кремниво-полиимидного термомеханического актюатора.
4. Предложена и обоснована методика оценки упругих свойств термомеханического актюатора по серии экспериментов.

Достоверность обусловлена соответствием математических моделей роботов их конструкциям и условиям эксплуатации, строгим использованием математических методов при теоретическом анализе этих моделей в сочетании с компьютерным моделированием, адекватной постановкой экспериментов, корректной обработкой и интерпретацией экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в работе, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XIII Международная конференция "Устойчивость и колебания нелинейных систем управления" (Конференция Пятницкого), 1–3 июня 2016 г., Москва, Россия.
2. CLAWAR 2017. The 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines, 11–13 сентября 2017 г., Порту, Португалия.
3. 60-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 20–26 ноября 2017 г., Москва–Долгопрудный–Жуковский, Россия.
4. MATHMOD 2018. 9th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, 21–23 февраля 2018 г., Вена, Австрия.
5. ROMANSY 2018. 22nd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, 25–28 июня 2018 г., Ренн, Франция.
6. Международная научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем – 2018», 9–11 октября 2018 г., Волгоград, Россия.
7. 61-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 19–25 ноября 2018 г., Москва–Долгопрудный–Жуковский, Россия.
8. NODYCON 2019. The First International Nonlinear Dynamics Conference, 17–20 февраля 2019 г., Рим, Италия.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в статьях [1–9], список статей приведен в конце автореферата; 5 статей [1; 2;

7—9] напечатаны в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в Web of Science, Scopus, в том числе статья [9] опубликована в международном журнале, входящем в первый квартиль по базе данных Web of Science.

Личный вклад автора. В работах [1; 2] автором предложена и разработана математическая модель капсульного робота с возвратной пружиной, проведено компьютерное моделирование динамики системы при кусочно-постоянном законе управления и получены зависимости установившейся средней скорости капсульного робота от параметров управления. Высказана гипотеза о связи значений средних скоростей при замене коэффициента заполнения управляющего сигнала с τ на $1 - \tau$, которая была математически доказана совместно с В.Г. Чашухиным и Н.Н. Болотником. Исследованы возможности оптимизации конструкции робота. Постановка задачи принадлежит Н.Н. Болотнику. Анализ и интерпретация результатов проводилась тремя авторами статьи совместно.

В работах [5—7; 9] автором проведен эксперимент по исследованию движения капсульного робота с возвратной пружиной. На основе статистической обработки данных измерений подтверждена предсказанная аналитически зависимости средней скорости робота от коэффициента заполнения управляющего сигнала. Экспериментальная установка собрана вместе с Ф. Беккером. Разработка и корректировка методики и состава измерений, а также анализ результатов проводились совместно с Н.Н. Болотником, Ф. Беккером, И.М. Зейдисом и К. Циммерманом.

В работах [3; 4; 8] автору принадлежит математическая модель термомеханического актюатора в виде шарнирного многозвенника. Им выполнены идентификация параметров модели и ее верификация на основе на основе эксперимента по статическому нагружению актюатора. Идея моделирования актюатора шарнирным многозвенником принадлежит Н.Н. Болотнику и В.Г. Чашухину. Эксперимент проведен Д.В. Козловым, А.А. Жуковым и И.П. Смирновым.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём работы составляет 81 страницу, включая 33 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 84 наименования.

Содержание работы

Во **введении** формулируется цель диссертационной работы, обосновываются актуальность и научная ценность проводимых исследований, описываются методы исследований и формулируются результаты, выносимые на защиту. Приводится краткое содержание диссертации по главам.

В **первой главе** дается обзор современного состояния исследований по механике капсульных роботов, анализируются соответствующие публикации российских и зарубежных авторов, определяется предмет исследований диссертации в данном направлении. В этой главе рассматривается капсульный

робот, который состоит из жесткого корпуса, имеющего форму цилиндра или параллелепипеда, и электромагнитного (соленоидного) привода, расположенного внутри. Привод состоит из электрической катушки (соленоида), жестко скрепленной с корпусом, и сердечника, который изготовлен из ферромагнитного материала и может перемещаться внутри соленоида вдоль оси последнего. Сердечник связан с корпусом пружиной, ось которой ориентирована вдоль оси соленоида. Ось соленоида параллельна оси корпуса. Корпус взаимодействует с внешней сопротивляющейся средой, в которой движется робот. Робот приводится в движение посредством силы, которая действует на сердечник при подаче электрического напряжения на соленоид. Привод устроен так, что эта сила направлена в одну сторону, стремясь втянуть сердечник в катушку. Возврат сердечника в исходное положение осуществляется за счет пружины. Схематическое изображение описанной системы дано на рис. 1. В качестве управления выбрана сила, приложенная соленоидом к сердечнику. Исследуются движения робота вдоль горизонтальной прямой, параллельной оси его корпуса.

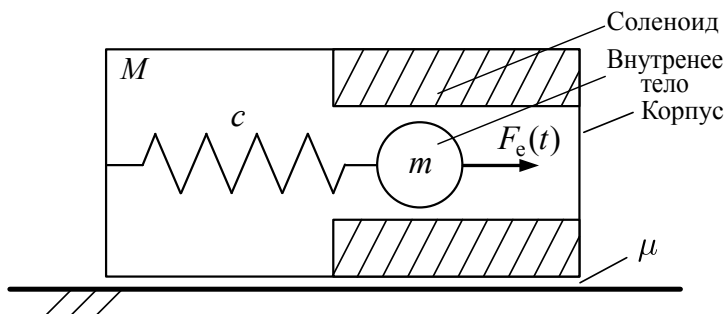


Рис. 1 — Модель капсульного робота.

Введены обозначения: M – масса корпуса вместе с катушкой соленоида, m – масса сердечника, F_e – сила, с которой соленоид действует на сердечник, F_{fr} – сила сопротивления среды движению корпуса, c – коэффициент жесткости пружины, x – координата, определяющая положение центра масс корпуса относительно неподвижной (инерциальной) системы отсчета, ξ – координата, определяющая положение центра масс сердечника относительно корпуса. Координата ξ выбирается так, что при $\xi = 0$ пружина недеформирована. Отметим, что сила F_e – внутренняя по отношению к системе корпус–соленоид–сердечник, а сила F_{fr} – внешняя. Предполагается, что сила сопротивления среды движению корпуса F_{fr} выражается законом сухого трения Кулона.

Уравнения движения рассматриваемой системы представляются в виде

$$(M + m)\ddot{X} = F_{fr} \left(\dot{X} - \frac{m}{M + m} \dot{\xi} \right),$$

$$\frac{Mm}{M + m} \ddot{\xi} + c\xi = F_e - \frac{m}{M + m} F_{fr} \left(\dot{X} - \frac{m}{M + m} \dot{\xi} \right),$$

8

где $X = x + \frac{m}{M+m} \xi$ – координата центра масс системы.

Сила F_e , генерируемая приводом, моделируются периодической кусочно-постоянной функцией

$$F_e = \begin{cases} F_0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} < \tau, \\ 0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} \geq \tau, \end{cases} \quad (2)$$

где T – период; F_0 – положительная постоянная размерности силы; τ – положительная безразмерная постоянная, которая принадлежит интервалу $(0, 1)$ и обозначает долю периода, на которой управляющая сила не равна нулю; фигурные скобки обозначают дробную часть заключенного в них выражения. Режим возбуждения вида (2) в физике и электронике носит название широтно-импульсного режима, при этом параметр τ называется коэффициентом заполнения широтно-импульсного сигнала, а величина $1/\tau$ – его скважностью.

Вводятся безразмерные переменные

$$\begin{aligned} X' &= \frac{X}{L}, & \xi' &= \frac{\xi}{L}, & L &= \frac{F_0}{c}, & t' &= \omega t, & F'_e &= \frac{F_e}{cL}, \\ F'_{fr} \left(\frac{dX'}{dt'} - m_2 \frac{d\xi'}{dt'} \right) &= \frac{1}{cL} F_{fr} \left(\omega L \left(\frac{dX'}{dt'} - m_2 \frac{d\xi'}{dt'} \right) \right), & & & & & & & & (3) \\ \omega &= \sqrt{\frac{c(M+m)}{Mm}}, & m_1 &= \frac{M}{M+m}, & m_2 &= \frac{m}{M+m}, & & & & \end{aligned}$$

В безразмерных переменных уравнения (1) представляются следующим образом (штрихи опущены, точка обозначает производную по безразмерному времени):

$$\begin{aligned} \ddot{X} &= m_1 m_2 F_{fr} \left(\dot{X} - m_2 \dot{\xi} \right), \\ \ddot{\xi} + \xi &= F_e - m_2 F_{fr} \left(\dot{X} - m_2 \dot{\xi} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Основной эксплуатационной характеристикой робота является его средняя скорость V в установившемся режиме движения, когда сердечник периодически колеблется относительно корпуса, а корпус движется относительно плоскости с периодически изменяющейся скоростью. Исследуется зависимость величины V от параметров T и τ .

Средняя скорость стационарного движения определялась на основе компьютерного моделирования движения робота, которое состояло в численном интегрировании уравнений (4). Интегрирование проводилось при нулевых начальных условиях $X(0) = 0$, $\dot{X}(0) = 0$, $\xi(0) = 0$, $\dot{\xi}(0) = 0$ до момента времени t_* , в который с заданной точностью выполняются равенства $\dot{X}(t_*) = \dot{X}(t_* - T)$, $\xi(t_*) = \xi(t_* - T)$, $\dot{\xi}(t_*) = \dot{\xi}(t_* - T)$. Выполнение данных равенств означает выход системы на стационарный режим движения. После этого средняя скорость

V рассчитывалась по формуле $V = [X(t_*) - X(t_* - T)]/T$. Моделирование показало, что выход на стационарный режим происходит при всех значениях параметров возбуждения, если коэффициент трения μ между корпусом робота и поверхностью, по которой он движется, отличен от нуля.

Моделирование проводилось при следующих значениях неварьируемых параметров робота:

$$M = 0.0213 \text{ кг}, \quad m = 0.0231 \text{ кг}, \quad c = 360 \text{ Нм}^{-1},$$

$$F_0 = 0.8 \text{ Н}, \quad F_{fr}^s = 0.7 \text{ Н}, \quad \omega = \sqrt{\frac{c(M+m)}{Mm}} = 180.2 \text{ с}^{-1}, \quad (5)$$

где F_{fr}^s – величина силы трения скольжения.

Безразмерные параметры m_1, m_2 и $\varepsilon = \frac{F_{fr}^s}{F_0}$ для рассматриваемой модели имеют следующие значения:

$$m_1 = 0.480, \quad m_2 = 0.520, \quad \varepsilon = 0.88. \quad (6)$$

В результате моделирования получены рис. 2 и рис. 3, демонстрирующие существенную зависимость средней скорости робота от параметров T и τ .

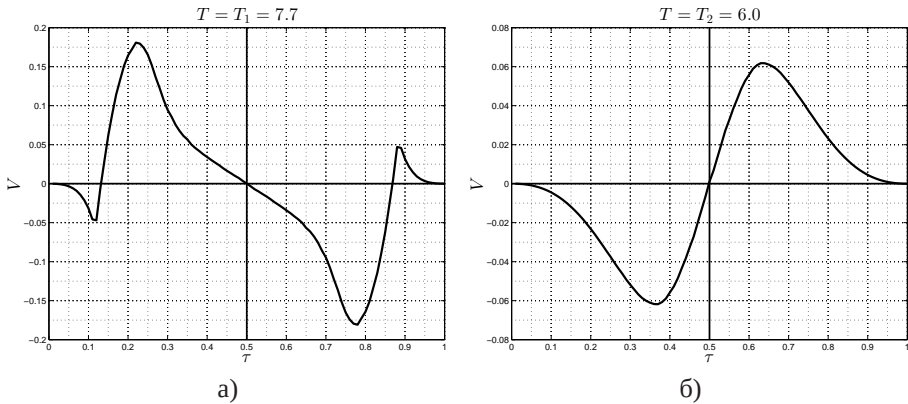


Рис. 2 — Зависимость средней скорости робота от параметра τ при постоянном периоде T

Изменение коэффициента заполнения при постоянном периоде (рис. 2) приводит к изменению величины и направления скорости движения робота, причем при $\tau = 0$, $\tau = 0.5$, $\tau = 1$ средняя скорость робота равна нулю, а при коэффициентах заполнения, равных τ и $1 - \tau$, робот движется с одной и той же средней скоростью, но в противоположных направлениях. Последнее свойство сформулировано и доказано для всех систем, заданных уравнениями (4) и (2), если $F_{fr}(z)$ является нечетной функцией переменной $z = \dot{X} - m\dot{\xi}/(M+m)$, в виде утверждения

Утверждение. Средние скорости $V^{[\tau]}$ и $V^{[1-\tau]}$ связаны соотношением

$$V^{[\tau]} = -V^{[1-\tau]}. \quad (7)$$

Следствие. При $\tau = 1/2$ средняя скорость стационарного движения системы равна нулю: $V^{[1/2]} = 0$.

Рисунок 3 демонстрирует, что монотонное изменение периода T при постоянном коэффициенте заполнения τ влечет непрерывное изменение средней скорости робота в установившемся движении, причем при некоторых критических значениях периода скорость меняет знак. Изменение знака скорости связано с резонансными явлениями в колебательном звене системы.

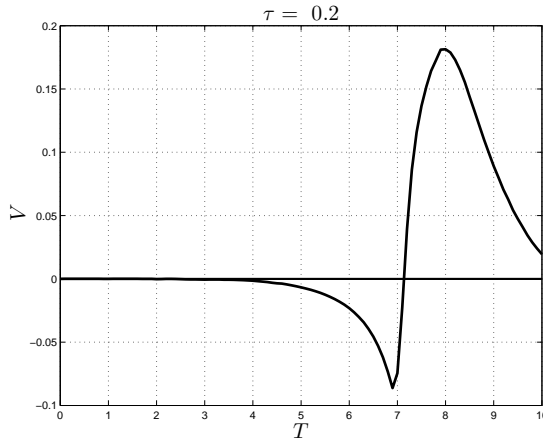


Рис. 3 — Зависимость средней скорости робота от периода T при постоянном параметре τ .

Важной характеристикой капсульного робота представляется максимальная V_{max} и минимальная V_{min} скорости, с которыми может двигаться робот при соответствующем выборе параметров возбуждения. Вычисления для робота с параметрами (5) в безразмерных единицах дают

$$\begin{aligned} V_{max} &= 0.1868, & T_{max} &= 7.95, & \tau_{max} &= 0.215, \\ V_{min} &= -0.1868, & T_{min} &= 7.95, & \tau_{min} &= 0.785. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь T_{max} , τ_{max} , T_{min} , τ_{min} — значения параметров, при которых достигаются экстремальные значения средней скорости движения робота в стационарном режиме.

В исходных размерных единицах равенства (8) представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} V_{max} &= 0.0748 \frac{\text{М}}{\text{с}}, & T_{max} &= 0.0441 \text{ с}, & \tau_{max} &= 0.215, \\ V_{min} &= -0.0748 \frac{\text{М}}{\text{с}}, & T_{min} &= 0.0441 \text{ с}, & \tau_{min} &= 0.785. \end{aligned} \quad (9)$$

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о целесообразности управления капсульным роботом путем изменения параметра τ при фиксированном $T = T_{max} = T_{min}$. Варьирование параметра τ в пределах от τ_{min} до τ_{max} позволит реализовать любую скорость в диапазоне возможных скоростей от V_{min} до V_{max} .

Кроме средней скорости, интерес представляет также характер движения корпуса и сердечника капсульного робота в стационарном режиме. Особенно интересно движение корпуса, в частности, есть ли интервалы времени, в течение которых корпус движется “назад” (в направлении, противоположном средней скорости). Отметим, что корпус не может все время двигаться в одном направлении с ненулевой скоростью, так как в этом случае сила сухого трения, приложенная к корпусу, была бы постоянной, отличной от нуля, и, следовательно, скорость центра масс системы была бы линейной функцией времени. Это противоречит T -периодичности изменения скорости центра масс в стационарном режиме, вытекающей из T -периодичности изменения относительной координаты сердечника $\xi(t)$ и абсолютной скорости $v(t)$ корпуса. В частности, исследование демонстрирует, что корпус робота может иметь или не иметь интервалы движения в направлении, противоположном средней скорости, а при наличии интервалов движения в обоих направлениях иметь или не иметь интервалы, в течение которых корпус покоится относительно среды.

Также в главе исследуется влияние полной массы робота, отношения массы корпуса к полной массе робота и величины возбуждающей силы F_0 на величину максимально возможной средней скорости капсульного робота. Исследование показывает, что для увеличения максимальной средней скорости робота следует увеличивать силу взаимодействия внутреннего тела и корпуса, величина максимальной средней скорости робота также существенно зависит от полной массы робота и отношения массы корпуса к полной массе системы.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию прототипа капсульного робота, модель которого представлена в первой главе. В экспериментах изучается влияние параметров возбуждающего сигнала на среднюю скорость установившегося движения. Основными элементами экспериментальной системы являются капсульный робот, рельсовая направляющая и программируемый источник питания. Источник питания способен генерировать напряжение с дискретным профилем; шаг дискретизации 1мс. На рис. 4 представлен прототип капсульного робота, размещенный на рельсовой направляющей. Конструкция робота содержит платформу (основание) на котором размещены соленоид, сердечник и пружина. Корпусу робота в математической

модели отвечает платформа с жестко закрепленным на ней соленоидом в физическом прототипе, а роль внутреннего тела играет сердечник. Габаритные размеры робота: длина 228мм, ширина 30мм, высота 50мм. Другие параметры системы приведены в таблице 1. На рельсовой направляющей, корпусе и сердечнике размещены контрастные маркеры, которые используются для расчета траекторий внутреннего тела и корпуса из видеоданных.

Таблица 1 — Параметры экспериментальной системы

Название параметра	Обозначение и величина
Масса корпуса	$M = 0.193$ кг
Масса внутреннего тела	$m = 0.074$ кг
Жесткость пружины	$c = 256.23$ Нм ⁻¹
Максимальное значение силы F_e	$F_0 = 1.25$ Н
Коэффициент сухого трения	$\mu = 0.29$

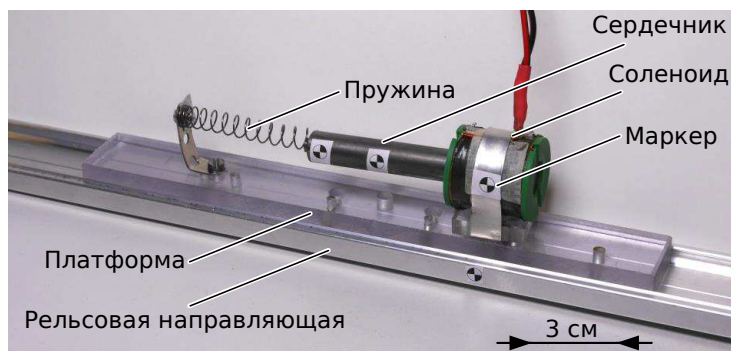


Рис. 4 — Прототип капсульного робота

Управление движением такого робота обеспечивается с помощью подачи периодического кусочно-постоянного напряжения U_e на соленоид с программируемого источника питания:

$$U_e = \begin{cases} U_0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} < \tau, \\ 0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} \geq \tau, \end{cases} \quad (10)$$

где T – период; U_0 – положительная постоянная размерности напряжения; τ – положительная безразмерная постоянная, которая принадлежит интервалу $(0, 1)$ и обозначает долю периода, на которой управляющее напряжение не равно нулю; фигурные скобки обозначают дробную часть заключенного в них выражения.

Изменение величины напряжения приводит к изменению величины силы F_e , действующей на внутреннее тело.

Анализ экспериментов и его результаты представлены в безразмерных переменных, которые использовались в предыдущей главе. Вместо V , t и T , используются переменные $V_c/(F_0\omega)$, ωt и ωT , но сохраняются первоначальные обозначения для безразмерных переменных. Временной параметр ω определяется выражением (5), что соответствует собственной частоте колебательной системы, образованной корпусом и внутренним телом, соединенными пружиной.

Для модельных данных свойство $V^{[\tau]} = -V^{[1-\tau]}$ выполняется для всех механических систем с уравнениями (1) с широтно-импульсным режимом возбуждения (2), если функция $F_{fr}(z)$ является нечетной функцией переменной $z = \dot{X} - m\dot{\xi}/(M + m)$.

В экспериментальной системе это свойство тестируется через приближение значений экспериментальных данных функцией, содержащей требуемое свойство. В диссертационном исследовании используется функция

$$V = f(\tau) = A \sin\left(\frac{\pi(\tau - \tau_c)}{\omega_s}\right), \quad (11)$$

где A , τ_c и ω_s – параметры, которые необходимо идентифицировать. Предложенная функция обладает свойством центральной симметрии относительно точки $(\tau_c, 0)$ на интервале от $[0, 1]$. Для процесса измерения принята следующая модель:

$$V(\tau) = f(\tau) + \xi, \quad (12)$$

где $V(\tau)$ – результат измерения средней скорости робота при коэффициенте заполнения возбуждающего сигнала τ , $f(\tau)$ – истинное значение средней скорости робота при коэффициенте заполнения τ , ξ – случайная ошибка измерений. Предполагается, что случайная величина ξ распределена по закону Гаусса с нулевым математическим ожиданием.

Параметры A , τ_c и ω_s функции $f(\tau)$ определяются в результате минимизации суммы квадратов ошибок измерений, полученных в процессе последовательных серий экспериментов:

$$\sum_{i=1}^n \xi_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(V_i - f(\tau_i)\right)^2 \rightarrow \min_{A, \tau_c, \omega_s}, \quad (13)$$

где τ_i – значения τ в эксперименте с номером i , V_i – средняя скорость, измеренная в этом эксперименте.

Минимизация производилась с помощью алгоритма Левенберга—Марквардта. В вычислениях использовался 95% доверительный интервал. Результаты приближения кривой (11) отображены на рис. 5. Оцененное значение параметра τ_c близко к значению 0.5, что позволяет говорить, что свойство

центральной симметрии относительно точки $(0.5, 0)$ наблюдается в экспериментальных данных, как и в модельных данных.

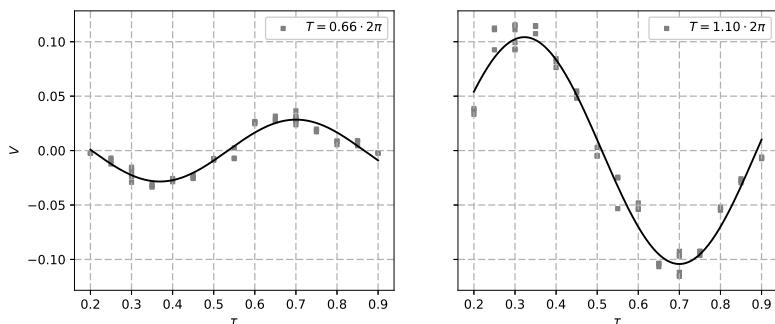


Рис. 5 — Приближение с помощью кривых

Сравнение модельных и экспериментальных данных представлено на рис. 6. На этом рисунке кривая с модельными данными для параметра $T = 0.66 \cdot 2\pi$ удовлетворительно описывает данные, полученные из эксперимента, тогда как разница между модельными и экспериментальными данными для $T = 1.10 \cdot 2\pi$ значительна. Это рассогласование данных может быть объяснено тем, что в математической модели не учитывается динамика электрической цепи с соленоидом. Однако наблюдается хорошее качественное совпадение: нули соответствующих кривых лежат близко, а знаки полученных значений одинаковы для большинства значений τ , использованных в экспериментах. В моделировании наблюдается существенное качественное различие между кривыми для $T = 0.66 \cdot 2\pi$ и $T = 1.10 \cdot 2\pi$. Аналогичное качественное различие наблюдается и у экспериментальных данных. Например, средняя скорость на интервале $0 \leq \tau \leq 0.5$ неотрицательна для $T = 1.10 \cdot 2\pi > 2\pi$ и неположительна для $T = 0.66 \cdot 2\pi < 2\pi$. Это различие в знаке может быть объяснено явлением резонанса.

На рис. 7 представлено сравнение модельных и экспериментальных данных при варьировании параметра возбуждения T для фиксированного параметра $\tau = 0.3$. Обе кривые выражают существенную зависимость средней скорости робота от параметра T и демонстрируют резонансный характер смены знака средней скорости робота при монотонном изменении параметра T . На интервале $0 \leq T \leq 0.66 \cdot 2\pi$ наблюдается количественное совпадение в пределах 95% доверительного интервала, при дальнейшем увеличении периода T разница между значениями модельных и экспериментальных данных существенно выходит за границы этого интервала. При переходе через $T = 1.14 \cdot \pi$ модельные данные демонстрируют смену знака средней скорости робота, тогда как экспериментальные данные смены знака не выявляют. Объяснить такие существенные различия между экспериментальными и модельными данными при увеличении

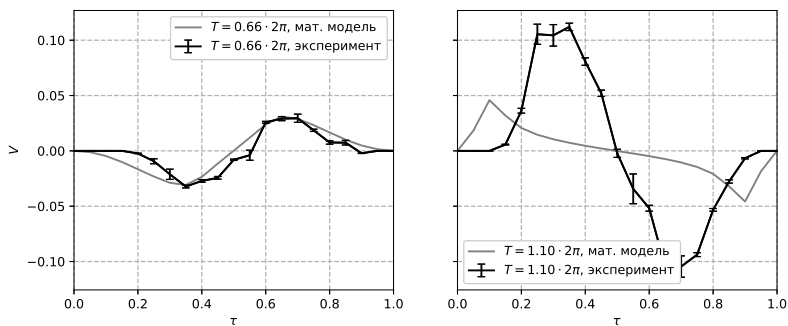


Рис. 6 — Зависимости средних скоростей робота от параметра τ

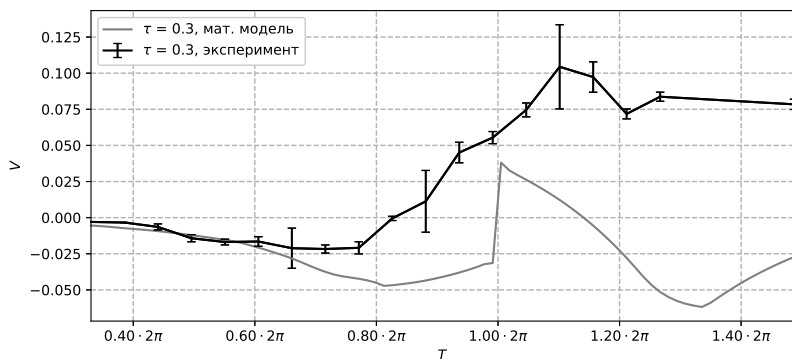


Рис. 7 — Зависимости средних скоростей от параметра T

параметра T можно через несоответствие профилей возбуждающей силы в математической модели и экспериментальной системе.

В **третьей главе** описываются основные виды термомеханических актюаторов и дается обзор их теоретико-механических моделей. В главе рассматривается термомеханический биморфный актюатор, который состоит из кремниевой балки с V-образными выемками, заполненными полиимидом. Общий вид актюатора и его конструкция приведены на рис. 8. Температурный коэффициент линейного расширения полиимида примерно на порядок превышает значение соответствующего коэффициента кремния. При подаче тепла актюатор разгибается благодаря V-образной форме полиимидных вставок (абсолютное удлинение верхней, более широкой, части вставки вследствие теплового расширения превосходит абсолютное удлинение нижней части), при охлаждении полиимид сокращается в размерах, что приводит к сгибанию актюатора. Таким образом, управляя температурой, можно изменять угол между основанием и хвостовиком актюатора. Величину максимального угла отклонения актюатора можно

регулировать изменяя количество V-образных вставок, заполненных полиимидом. При эксплуатации актюатора предполагается управление его деформацией с помощью электрического тока. На обратной стороне актюатора проложены алюминиевые шины. В местах выемок с полиимидом помещены резистивные нагреватели, с помощью которых осуществляется нагрев полиимида. В главе также рассматривается концепция шагающего робота с использованием таких актюаторов для перемещения по внутренней или внешней поверхности орбитального космического аппарата, разработанная в рамках проекта РНФ №14-19-00949.

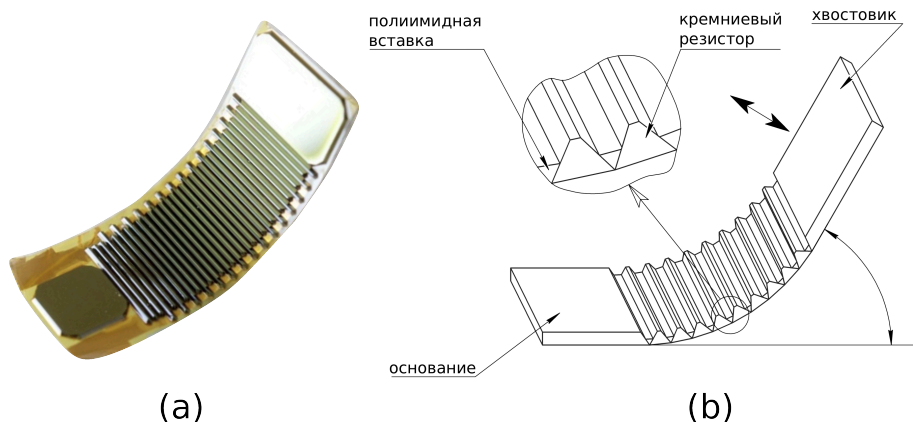


Рис. 8 — Общий вид актюатора и его конструкция

Аналитически оценена зависимость изменения угла раскрытия φ_0 одного V-образного элемента как результат изменения температуры полиимида:

$$\varphi_0(T_2) = 2\arcsin \left[\sin \frac{\varphi_0(T_1)}{2} (1 + \varepsilon_T(T_2 - T_1)) \right], \quad (14)$$

где ε_T – температурный коэффициент линейного расширения, который считается постоянным; T_1 и T_2 это две произвольные величины температуры пластины.

Актюатор моделируется плоским шарнирным многозвенником. Все звенья имеют одинаковые геометрические и инерционные параметры. Первое звено актюатора прикреплено к плоской неподвижной поверхности с помощью шарнира, эту поверхность назовем основанием актюатора. К последнему звену актюатора присоединен хвостовик. Во всех шарнирах расположены упругие элементы, создающие моменты сил, пропорциональные изменению углов между звеньями по отношению к значениям этих углов в недеформированной конфигурации. В недеформированной конфигурации многозвенник имеет форму правильной ломаной. Абсолютно твердые компоненты многозвенника соответствуют частям актюатора, состоящим из кремния. Шарниры соответствуют сгибающимся частям актюатора, содержащим полиимид. Исследуется статическая деформация

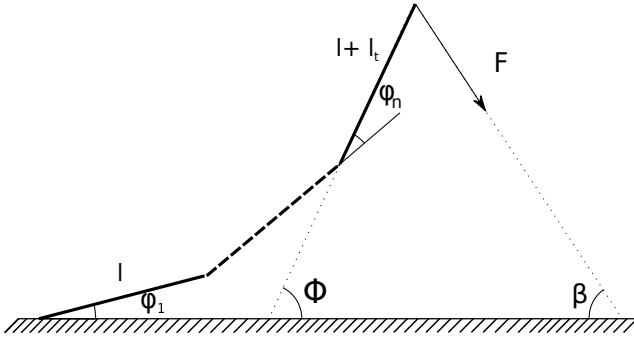


Рис. 9 — Модель актюатора в виде шарнирного многосвязника актюатора под действием сосредоточенной силы, приложенной к концу хвостовика актюатора.

Введены следующие обозначения: n – количество звеньев актюатора, l – длина звена актюатора, l_t – длина хвостовика, $L = nl + l_t$ – длина всего актюатора (все звенья имеют одинаковую длину), φ_i – угол между звеньями $i - 1$ и i , φ_1 – угол между первым звеном и основанием, φ_0 – угол между соседними звеньями при ненагруженном актюаторе (при ненагруженном актюаторе все углы считаются одинаковыми), Φ – угол между хвостовиком актюатора и основанием актюатора (сумма $\sum_{i=1}^n \varphi_i$), F – величина сосредоточенной силы, приложенной к хвостовику актюатора, β – угол между горизонтальной плоскостью и направлением силы, приложенной к хвостовику актюатора, C – коэффициент крутильной жесткости упругих элементов в шарнирах. Модель схематично изображена на рис. 9.

Уравнения равновесия такой системы имеют

$$\begin{aligned}
 & F \cos \beta \left[l \sum_{j=i}^n \sin \left(\sum_{k=1}^j \varphi_k \right) + l_t \sin \sum_{k=1}^n \varphi_k n \right] + \\
 & F \sin \beta \left[l \sum_{j=i}^n \cos \left(\sum_{k=1}^j \varphi_k \right) + l_t \cos \sum_{k=1}^n \varphi_k \right] + \\
 & C(\varphi_i - \varphi_0) = 0, \quad i = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{15}$$

и выражают тот факт, что момент силы, приложенной к хвостовику, компенсируется упругими моментами в шарнирах актюатора. Полученная система уравнений (15) позволяет определять конфигурацию актюатора при заданных параметрах F , l , l_t , n , β , C и φ_0 .

Для определения неизвестного параметра C и верификации модели проведен эксперимент. При проведении эксперимента оцениваемыми характеристиками являлись: угол приложения нагрузки β , величина силы F , возникающей на хвостовике актюатора и угол деформации актюатора Φ при различных внешних воздействиях. Результаты эксперимента отображены на рисунке 10.

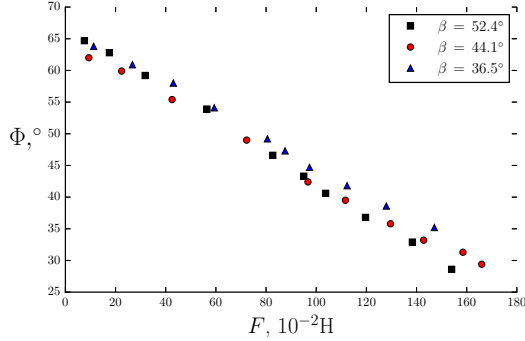


Рис. 10 — Экспериментальные данные

Перед верификацией математической модели необходимо идентифицировать параметр крутильной жесткости C . Этот параметр определен на наборах данных с $\beta = 52.4^\circ$ и $\beta = 44.1^\circ$, а наборы данных с $\beta = 36.5^\circ$ использованы для верификации математической модели.

Пусть $\Phi^{C,k}$ — значения величины Φ , рассчитанные на основе решения уравнений (15) для параметров C , $F = F_k$, $\beta = \beta_k$, l , ϕ_0 и n , индекс k соответствует номеру набора экспериментальных данных. Под k -ым набором данных подразумевается совокупность величин (F_k, β_k, Φ_k) . Значение параметра C определяется как число минимизирующее следующую сумму квадратов:

$$\Psi = \sum_k (\Phi_k - \Phi^{C,k})^2 \rightarrow \min_C, \quad (16)$$

где Φ_k соответствует углу Φ из k -ого набора экспериментальных данных; $\Phi^{C,k}$ обозначает $\sum_i^n \varphi_i^{C,k}$.

Решение системы уравнений (15) найдено с помощью функции *fsolve* из библиотеки *scipy.optimize* языка программирования *python*. Сумма квадратов (16) минимизирована с помощью функции *brent* той же библиотеки. В результате найдено значение $C = 0.57 \text{ Нм/рад}$.

Верификация модели проведена на наборах экспериментальных данных с $\beta = 36.5^\circ$. Для этого найдены значения углов $\Phi^{C,k}$ из системы уравнений (15), а затем полученные решения сравнены с данными из эксперимента. Решения найдены с учетом ранее идентифицированного параметра $C = 0.57 \text{ Нм/рад}$. Результаты представлены на рис. 11.

Для оценки качества модели вычислены среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от данных моделирования и относительные отклонения этих данных в каждом эксперименте. Среднеквадратичное отклонение определяется по формуле

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_k (\Phi_k - \Phi^{C,k})^2} = 1.22^\circ. \quad (17)$$

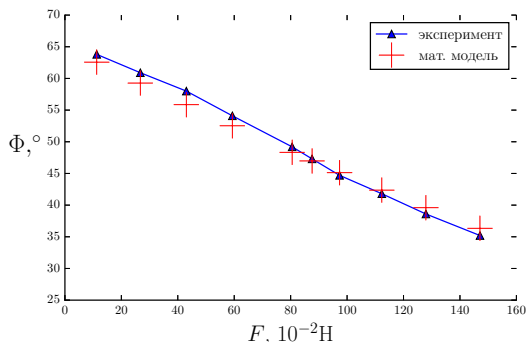


Рис. 11 — Верификация модели

Относительное отклонение для k -ого набора данных определялось

$$RE_k = \frac{|\Phi_k - \Phi^{C,k}|}{\Phi_k}. \quad (18)$$

Значения RE_k не превысили 3.7% для всех k .

В **заключении** приведены основные результаты работы. В рамках диссертационной работы рассмотрена и изучена теоретико-механическая модель мобильного робота без внешних движителей. Механическая система состоит из корпуса робота и внутреннего тела, которое может перемещаться относительно корпуса вдоль прямолинейной направляющей. Внутреннее тело соединено с корпусом пружиной. Движение системы возбуждается силой, действующей между корпусом и внутренним телом и изменяющейся в широтно-импульсном периодическом режиме. Исследовалось движение робота вдоль шероховатой горизонтальной плоскости.

Получена система уравнений движения капсульного робота с возвратной пружиной. В результате компьютерного моделирования динамики системы при различных возбуждающих параметрах обнаружена существенная зависимость средней скорости робота от периода T и коэффициента заполнения τ возбуждающей силы. При анализе стационарного движения системы установлено, что изменение коэффициента заполнения при постоянном периоде приводит к изменению величины и направления скорости движения робота, причем при коэффициентах заполнения равных τ и $1 - \tau$, робот движется с одной и той же скоростью, но в разных направлениях. Это свойство доказано аналитически. Установлено, что монотонное изменение периода при постоянном τ также влечет непрерывное изменение средней скорости робота в установившемся движении, причем при некоторых критических значениях периода скорость меняет знак. Изменение знака скорости связано с резонансными явлениями.

Проведен анализ возможностей оптимизации конструкции робота для увеличения диапазона возможных скоростей капсульного робота. Обнаружено, что

максимальная средняя скорость установившегося движения существенно зависит от величины возбуждающей силы F_0 , полной массы робота и отношения массы корпуса к общей массе робота. Увеличение F_0 приводит к увеличению максимально возможной средней скорости робота. Обнаружено, что для заданных коэффициентов трения μ и силы F_0 существует оптимальная масса робота, максимизирующая диапазон возможных средних скоростей робота. В частности, показано, что при фиксированных значениях параметров c , F_0 , $F_{f\tau}^s$, $M + m$, приведенных в (5), для увеличения максимизации диапазона возможных скоростей робота масса корпуса робота должна составлять около 20% от полной массы робота.

Построен прототип капсульного робота, представленного в первой главе и проведены натурные исследования. В натуральных исследованиях управление движением осуществлялось через изменение напряжения, подаваемого на соленоид. Управляющий сигнал имеет широтно-импульсный периодический профиль, который характеризуется коэффициентом заполнения управляющего сигнала τ и периодом T . На прототипе робота установлены контрастные маркеры, позволяющие получить зависимости перемещения корпуса и внутреннего тела от времени. Полученные зависимости позволяют утверждать об установлении стационарного режима движения робота. Подтверждено существенное влияние параметров возбуждающего сигнала на среднюю скорость движения робота. Управляя каждым параметром по отдельности можно изменять как направление, так и величину средней скорости робота. Обнаружено свойство зависимости средней скорости V от τ : $V^{[\tau]} = -V^{[1-\tau]}$. При монотонном изменении периода управляющего сигнала установлено существенное влияние периода на среднюю скорость робота, при значении периода, близком к значению собственного периода колебаний системы корпус-пружина-внутреннее тело, обнаружено явление резонанса, проявляющееся в смене знака средней скорости робота. Представлено сравнение результатов математического и натурального моделирования. Качественный характер результатов моделирования и экспериментов совпадает. Согласование количественных результатов ухудшается с ростом периода возбуждающего сигнала. Расхождение объясняется несоответствием профилей возбуждающих сил в математической модели и экспериментах.

Рассмотрена концепция шагающего робота с кремниво-полиимидными термомеханическими актюаторами с V-образными выемками. Используемые материалы обеспечивают работоспособность робота на орбитальных космических аппаратах и открытом космосе. Предложена математическая модель кремниво-полиимидного термомеханического актюатора в виде шарнирного многозвенника. Абсолютно твердые компоненты многозвенника соответствуют частям актюатора, состоящим из кремния, а шарниры соответствуют сгибающимся частям актюатора, V-образным выемкам с полиимидом. Проведено

экспериментальное исследование актюатора, результаты которого использовались для идентификации параметра крутильной жесткости и верификации предложенной модели.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Болотник Н.Н., Нунупаров А.М., Чащухин В.Г.* Капсульный вибрационный робот с электромагнитным приводом и возвратной пружиной: динамика и управление движением // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2016. № 6. С. 146–160.
2. *Bolotnik N., Nunuparov A., Chashchukhin V.* Dynamics and Control of Motion of a Capsule Robot with an Opposing Spring // 2016 International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference). 2016. P. 1–4.
3. *Bogoslavsky I.V., Bolotnik N.N., Chashchukhin V.G., Gradetsky V.G., Nunuparov A.M., Kozlov D.V., Smirnov I.P., Zhukov A.A.* Static modelling of a thermomechanical actuator for a walking microrobot // Proc. of the 20th Int. Conf. of Climbing and Walking Robots (CLAWAR). 2017. P. 449–456.
4. *Нунупаров А.М.* Построение модели термомеханического актюатора для шагающего робота // Труды 60-й Всероссийской конференции МФТИ. Физтех - школа Аэрокосмических технологий. 2017. С. 49–50.
5. *Нунупаров А.М.* Динамика и управление движением капсульного робота с возвратной пружиной // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ, Физтех-школа аэрокосмических технологий. 2018. С. 174–175.
6. *Nunuparov A., Becker F., Bolotnik N., Zeidis I., Zimmermann K.* Capsobot with an Opposing Spring: Simulation and Experiments // MATHMOD 2018 Extended Abstract Volume. 2018. P. 71–72.
7. *Nunuparov A., Becker F., Bolotnik N., Zeidis I., Zimmermann K.* Vibration-Driven Capsobot with an Opposing Spring: An Experimental Study // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. 2019. P. 126–133.
8. *Bolotnik N., Chashchukhin V., Gradetsky V., Kozlov D., Nunuparov A., Smirnov I., Zhukov A.* Thermomechanical Actuator for Micro-robotic Systems: A Model and Parameter Estimation // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. 2019. P. 340–346.
9. *Nunuparov A., Becker F., Bolotnik N., Zeidis I., Zimmermann K.* Dynamics and motion control of a capsule robot with an opposing spring // Archive of Applied Mechanics. 2019. Vol. 89. No 10. P. 2193–2208.