

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

На правах рукописи

Нунупаров Армен Мартынович

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

Специальность 01.02.01 —
«Теоретическая механика»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

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

Москва — 2019

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Капсульный вибрационный робот с возвратной пружиной:	
теоретический анализ и компьютерное моделирование	11
1.1 Капсульные роботы: современное состояние проблемы	11
1.2 Механическая модель капсульного робота	17
1.3 Компьютерное моделирование динамики робота	21
1.4 Анализ стационарного движения робота	22
1.5 Оптимизация конструкции капсульного робота	30
1.6 Выводы по главе 1	32
Глава 2. Капсульный вибрационный робот с возвратной пружиной:	
экспериментальное исследование	40
2.1 Проведение эксперимента и анализ экспериментальных данных	40
2.2 Сравнение результатов моделирования и эксперимента	45
2.2.1 Компьютерное моделирование динамики робота с параметрами, соответствующими экспериментальной установке	45
2.2.2 Свойство центральной симметрии	46
2.2.3 Сравнение экспериментальных и модельных данных	48
2.3 Выводы по главе 2	50
Глава 3. Модель с сосредоточенными параметрами термомеханического актюатора для миниатюрного шагающего робота	51
3.1 Термомеханические актюаторы, их расчетные модели и применения в робототехнике	51
3.2 Конструкция шагающего робота на термомеханических актюаторах	56
3.3 Принцип действия и конструкция термомеханического биморфного актюатора на основе кремния и полиимида	58

	Стр.
3.4 Шарнирный многозвенник как расчетная модель термомеханического актюатора	61
3.5 Экспериментальное исследование	63
3.5.1 Методика измерений	63
3.5.2 Идентификация параметров расчетной модели	66
3.5.3 Верификация модели	67
3.6 Выводы по главе 3	68
Заключение	69
Список литературы	71
Список рисунков	79
Список таблиц	81

Введение

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

Роботизированные устройства представляют собой сложные механические системы, при эксплуатации которых могут возникать различные нелинейные эффекты, в частности, явление резонанса. В основе исследования таких систем лежат методы теоретической механики. Одной из разновидностей роботизированных устройств являются локомотионные роботы, которые находят многочисленные приложения. Локомотионные роботы используются для автоматизации производства, доставки грузов и людей, мониторинга местности, медицины, для работы в агрессивных средах, освоения космоса. Совершенствование существующих типов локомотионных роботов и разработка новых конструкций – актуальная научно-техническая проблема. Как правило, в предлагаемых решениях локомотионных 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 актюаторы 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 производить автоматическую инспекцию узких и длинных каналов на космических аппаратах, которые трудно обследовать с помощью ручных щупов. В рамках проекта РФФИ №14-19-00949, одним из исполнителей которого был автор, предложено использовать термомеханические кремниевополиимидные актюаторы 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 актюатора.

Целью данной работы является изучение динамики и принципов управления движением новых типов локомоционных систем, а именно, капсульного робота с упругим элементом, связывающим корпус и внутреннее тело, и шагающего миниатюрного робота с термомеханическими кремниевополиимидными

актюаторами. 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 актюаторов, возникли при выполнении поискового проекта по созданию миниатюрных мобильных роботов, обслуживающих орбитальные космические аппараты. Термомеханические актюаторы 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 выявленных в математической модели фактов.
3. Построить математическую модель кремниево-полиимидного 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 широкого класса механических систем, в частности локомотивных роботов. Капсульные роботы могут найти применение в технике, прежде всего для транспортировки инженерного 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 строятся в MATLAB и программах, разработанных автором на языке python с использованием библиотек для научных исследований (numpy, scipy, matplotlib). При оценке 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 механической системы типа капсульного робота 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 кремниево-полиимидного термомеханического актюатора.
4. Предложена и проверена 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, Москва, Россия
2. CLAWAR 2017. The 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines, 11–13 сентября 2017, Порту, Португалия
3. 60-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 20–26 ноября, 2017, Москва–Долгопрудный–Жуковский, Россия
4. MATHMOD 2018. 9th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, 21–23 февраля, Вена, Австрия
5. ROMANSY 2018. 22nd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, 25–28 июня 2018, Ренн, Франция
6. Международная научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем – 2018», 9–11 октября 2018, Волгоград, Россия
7. 61-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 19–25 ноября, 2018, Москва–Долгопрудный–Жуковский, Россия
8. NODYCON 2019. The First International Nonlinear Dynamics Conference, 17–20 февраля, 2019, Рим, Италия

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в статьях [1–9], из которых 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.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, новизна и научная значимость полученных результатов, приводится краткое содержание диссертации.

В первой главе дается краткий обзор современного состояния исследований по механике капсульных роботов, анализируются соответствующие публикации российских и зарубежных авторов и определяется предмет исследований диссертации в данном направлении. Строится математическая модель в виде дифференциальных уравнений для капсульного робота, состоящего из корпуса и внутреннего тела, связанного с корпусом пружиной. Управление роботом определяется посредством изменения силы генерируемой приводом в периодическом широтно-импульсном режиме. Робот движется прямолинейно по горизонтальной плоскости при сухом трении между корпусом и поверхностью перемещения. Полученная модель используется для компьютерного моделирования динамики системы при различных параметрах возбуждения. Результаты моделирования представлены в виде ускорений, скоростей и координат корпуса и внутреннего тела. Производится численный анализ стационарного движения системы, позволяющей выделить качественное влияние параметров управления на динамику системы. Показывается, что знак и величина средней скорости установившегося движения робота существенно зависят от периода и коэффициента заполнения управляющего сигнала. Изменение знака средней скорости при монотонном изменении периода возбуждающей силы объясняется явлением резонанса. Численно решаются задачи оптимизации средней скорости робота по параметрам возбуждения. Анализируются возможности оптимизации конструкции робота для увеличения диапазона возможных средних скоростей капсульного робота.

Во второй главе представлены натурные исследования физического прототипа капсульного робота математическая модель которого изложена в главе 1. Описывается экспериментальная установка и методика исследования. Полученные данные используются для анализа динамики установившегося движения робота при различных параметрах управляющего сигнала. Выявляется существенная зависимость знака и величины средней скорости установившегося движения от периода и коэффициента заполнения управляющего сигнала. Методами статистического анализа проверяется гипотеза о наличии свойства центральной симметрии величины средней скорости робота от коэффициента заполнения управляющего сигнала. Наблюдается резонансный эффект, проявляющийся в изменении знака средней скорости робота при изменении периода управляющего сигнала.

В третьей главе описываются основные виды термомеханических актюаторов и обзор их теоретико-механических моделей. Затем предлагается упрощенная расчетная модель термомеханического актюатора в виде шарнирного многосвязника, для определения некоторых параметров математической модели которого требуется проведение экспериментов. Описывается экспериментальная установка и методика исследования. Описывается и демонстрируется методика идентификации параметров расчетной модели по результатам экспериментов. Производится верификация полученной математической модели.

В заключении резюмируются основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

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.

Глава 1. Капсульный вибрационный робот с возвратной пружиной: теоретический анализ и компьютерное моделирование

1.1 Капсульные роботы: современное состояние проблемы

Капсульный робот имеет ряд преимуществ перед мобильными системами других типов. Он прост конструктивно, не требует сложных механизмов для передачи движения от приводов к движителям, легко поддается миниатюризации – качества которые важны для появляющихся задач мобильной робототехники в медицине и технологических системах с ограниченным пространством [10–12]. Капсульные роботы могут также использоваться для движения внутри тонких труб, например, с целью инспекции их технического состояния. Корпус капсульного робота можно сделать герметичным и гладким, не содержащим выступающих деталей. Последнее обстоятельство делает возможным использовать капсульный робот в “ранимых” средах, в частности в медицине для проведения диагностических обследований внутри тела человека или для точной доставки медикамента к пораженному участку [13; 14].

Капсульные роботы относятся к классу мобильных систем с вибрационным возбуждением [15; 16]. Они представляют собой систему твердых тел, взаимодействующих в общем случае между собой и с внешней средой и совершающих колебательные движения друг относительно друга. В случае капсульного робота только одно тело (корпус) взаимодействует со внешней средой; внутренние тела со средой не взаимодействуют.

Принцип движения капсульного робота – вибрационное перемещение. Большой вклад в развитие теории и методов анализа вибрационного перемещения внесен учеными ленинградской (санкт-петербургской) школы под руководством И.И. Блехмана. Основные положения теории вибрационного перемещения и многочисленные примеры практического использования этого принципа движения изложены в монографиях [17; 18]. Вибрационное перемещение капсульных систем в средах с кусочно-линейным и квадратичным законами сопротивления рассматриваются в работах [19; 20]. В работе [21] изучается вертикальное вибрационное перемещение капсульного робота в среде с кусочно-линейным законом сопротивления в поле силы тяжести. Рассмотрен случай гармонических

вынужденных колебаний внутреннего тела относительно корпуса робота, для которого определены параметры критического режима вибрационного перемещения, характеризующегося неизменным положением центра тяжести системы относительно поверхности земли.

Эффект резонанса часто используют в мобильных системах управляемых вибрацией [15; 22—24].

Научной основой создания капсульных роботов служат исследования динамики и процессов управления локомоциями систем, перемещающихся в сопротивляющихся средах за счет движения внутренних тел. Наибольший интерес при этом представляют движения системы с периодически изменяющейся скоростью, порождаемые периодическим движением внутренних тел. Важным аспектом здесь является оптимизация движений по скорости и энергозатратам.

В [25; 26] впервые поставлена задача оптимизации движений в сопротивляющейся среде тела, управляемого его взаимодействием с подвижным внутренним телом. Рассмотрен случай, когда корпус движется по прямой в горизонтальной плоскости и на него действует сухое трение, подчиняющееся закону Кулона. Построены периодические режимы управления относительным движением внутреннего тела, при которых корпус движется с периодически изменяющейся скоростью, проходя за период одно и то же расстояние в заданном направлении. Внутреннему телу разрешено перемещаться в фиксированных пределах. Предполагается, что в начале и в конце каждого периода скорость корпуса равна нулю, а подвижное тело покоится в одном из крайних положений. Рассмотрены режимы управления по скорости и по ускорению внутреннего тела. В первом случае внутреннее тело движется между фиксированными крайними положениями с постоянной скоростью относительно корпуса, различной при движении в направлении желаемого перемещения корпуса и в противоположном направлении. Варьируемыми параметрами служат величины скоростей движения внутреннего тела. Второй режим предусматривает на периоде три интервала постоянства относительного ускорения внутреннего тела. На абсолютную величину ускорения наложено ограничение. Варьируемыми параметрами служат длины этих интервалов и абсолютная величина ускорения внутреннего тела на каждом из них. Найдены оптимальные параметры обоих режимов, при которых средняя скорость движения корпуса максимальна. Аналогичные задачи решены в [27]; В отличие от [25; 26] отсутствует предположение об обращении в нуль скорости корпуса, когда внутреннее тело находится в одном из крайних положений. Оптимальные

параметры управления по скорости внутреннего тела найдены не только для среды с сухим трением, но и для сред с кусочно-линейным и квадратичным законами сопротивления движению корпуса. Оптимальные параметры управления по ускорению внутреннего тела в среде с кусочно-линейным законом сопротивления были определены численно в [28].

Решена задача оптимального управления движением описанной выше механической системы по прямой в горизонтальной плоскости в случае, когда между корпусом и плоскостью действует кулоново трение [29]. Управляющей переменной служит ускорение внутреннего тела относительно корпуса, на которое наложено ограничение по абсолютной величине. Построено периодическое управление с нулевым средним и отвечающее ему периодическое по скорости движение корпуса с максимальным перемещением за период. По построенному управлению восстанавливается периодический закон движения внутреннего тела, порождающий оптимальное движение системы. В [30] решена аналогичная задача для системы с двумя внутренними телами, одно из которых совершает периодические движения вдоль горизонтальной прямой, параллельной линии движения корпуса, а другое – вдоль вертикальной прямой. Наличие внутреннего тела, движущегося по вертикали, позволяет управлять нормальным давлением корпуса на плоскость опоры и тем самым величиной силы трения, действующей на корпус при его движении. В [31] исследована задача оптимального управления прямолинейным движением тела с подвижной внутренней массой для широкого класса нелинейных законов сопротивления внешней среды. Критерий оптимальности и ограничения – те же, что и в [29]. Предложен алгоритм расчета оптимального управления и изучены характерные особенности.

В работе [32] построены и исследованы оптимальные по энергозатратам режимы управления системой с одним внутренним телом в средах со степенным законом сопротивления движению корпуса. Энергозатраты измерялись работой сил сопротивления за период движения системы. При построении оптимального управления период относительного движения внутреннего тела и средняя скорость системы считались заданными, никаких других ограничений на движение системы не налагалось. Похожая задача решена в [33] для случая, когда используется наследственная модель для описания взаимодействия корпуса и жидкой среды.

В [34] представлен капсульный робот, управление которым базируется на принципах, изложенных в [25; 26]. Прототип этого робота построен и испытан в

Токийском университете Денки (Tokyo Denki University) в Японии. Робот имеет электромагнитный (соленоидный) привод. Управление величиной и направлением действия силы, приложенной к внутреннему телу осуществляется изменением величины и полярности напряжения, подаваемого на обмотку соленоида.

Различные аспекты планирования, моделирования и оптимизации движений капсульных роботов рассматривались также в ряде работ зарубежных авторов [35—39].

Во всех цитируемых выше работах предполагалось, что единственная сила, действующая на внутреннюю массу мобильного робота в направлении ее движения, – это управляющая сила, генерируемая приводом системы. В настоящей работе рассматривается капсульный робот, в котором внутреннее тело прикреплено к корпусу пружиной. В этом случае в системе появляется колебательное звено “корпус–пружина–внутреннее тело”, характеризующееся собственной частотой, что существенно изменяет динамическое поведение системы, в частности, в ней могут наблюдаться резонансные явления, если управляющая сила изменяется периодически. Вибрационный робот, тела которого соединены пружиной, рассматривался в [40—42]. Этот робот предназначался для движения внутри труб. Он состоял из двух тел (модулей), которые оба контактировали с поверхностью трубы. Управление системой осуществлялось электромагнитным приводом, реализующим силовое взаимодействие между модулями. Контактные поверхности модулей имели упоры [42] или покрытия [40; 41], создающие анизотропию трения о поверхность трубы так, чтобы сила трения, препятствующая движению робота в желаемом направлении, была значительно меньше силы трения, препятствующей движению в противоположном направлении. В [42] в общих чертах описан принцип движения робота, приведены формулы для расчета силы магнитного взаимодействия между модулями, даны параметры физического прототипа робота, построенного авторами, и кратко описаны результаты экспериментальных исследований. В [40; 41] построена математическая модель двухмодульного вибрационного внутритрубного робота с электромагнитным проводом и возвратной пружиной, позволяющая проводить анализ динамики системы. Методом численного моделирования изучена динамика робота, в частности, его поведение в установившемся режиме, когда тела робота совершают периодические колебания друг относительно друга, в предположении, что сила взаимодействия тел робота изменяется периодически в широтно-импульсном режиме. Исследована зависимость средней скорости движения робота от периода и коэффициента

заполнения широтно-импульсного возбуждающего сигнала. Найдены оптимальные параметры, при которых робот движется внутри трубы с максимальной скоростью. Создан физический прототип внутритрубного вибрационного робота и проведены эксперименты, результаты которых согласуются с результатами моделирования. Система, которая изучается в настоящей работе, отличается от системы, рассмотренной в [40; 41], тем, что одно из тел является внутренним и не контактирует с поверхностью, по которой движется робот, и тем, что трение между другим телом (корпусом) и поверхностью – классическое сухое кулоново трение, не обладающее анизотропией.

Капсульные мобильные системы с эластичными и диссипативными элементами изучены в работах [43—48]. Авторы этих статей рассматривают систему, которая состоит из капсулы (корпуса) и внутреннего тела, которое может двигаться внутри капсулы. Внутреннее тело связано с корпусом посредством пружины и демпфера, соединенные параллельно. В основном рассматриваются пружины с нелинейной характеристикой. Внутри капсулы расположены регуляторы (ограничители), которые ограничивают движение внутреннего тела. Ограничители моделируются безмассовыми пластинами, присоединенными к корпусу посредством пружин. Корпус взаимодействует с внешней средой. Существенное отличие между системой в процитированных работах и системой, изучаемой в настоящей работе, состоит в том, что в [43—48] возбуждающая сила является внешней, она задается вне капсулы. Например, эта сила может быть задана внешним электромагнитом. Преимуществом таких систем является отсутствие проблем с энергообеспечением системы. Можно изготовить капсульный робот очень маленьких размеров, а поскольку система снабжения питанием внешняя, она может быть произвольной. Такие роботы изучаются в основном как отдельный случай нелинейных вибро-ударных систем. Авторы сфокусированы на классификации стационарных режимов движения, анализе устойчивости, явлений хаоса и т.д.

В [49] рассмотрен капсульный робот, который состоит из твердого корпуса и расположенного внутри перевернутого маятника. Корпус движется вдоль прямой линии на горизонтальной шероховатой поверхности. Между корпусом и поверхностью действует сухое кулоново трение. Маятник прикреплен к корпусу вязкоупругим шарниром, ось которого параллельна поверхности и перпендикулярна линии движения корпуса. Система возбуждается управляемым моментом, приложенному к шарниру маятника и изменяющимся по гармоническому закону. Изучено поведения такой мобильной системы методами нелинейной динамики.

Проанализировано влияние жесткости и коэффициента демпфирования шарнира на динамические свойства системы.

Капсульный робот, рассмотренный в нашей статье, содержит одно внутреннее тело, которое может перемещаться прямолинейно относительно корпуса. Такая конструкция позволяет роботу двигаться по прямой линии. Большинство публикаций, в том числе цитированные выше, посвящены капсульным роботам, движущимся по прямой. Однако локомоционные системы, управляемые движением нескольких внутренних масс, могут выполнять более сложные движения, в частности, плоские движения, при которых изменяется как положение центра масс робота, так и его ориентация. Чтобы иметь возможность выполнять контролируемые плоские движения, капсульные роботы должны иметь соответствующую конструкцию.

В [50—54] рассмотрены капсульные роботы с двумя внутренними телами, движущимися по прямолинейным направляющим, которые параллельны друг другу и подстилающей поверхности. Когда внутренние тела движутся синхронно в фазе, робот перемещается по прямой линии, как в случае системы с одним внутренним телом. Когда внутренние тела движутся синхронно в противофазе, робот вращается, изменяя свою ориентацию. Чередую эти два типа движения, можно осуществить перемещение робота между двумя произвольными состояниями (характеризуемыми положением центра масс и ориентацией робота). Также возможны более сложные стратегии управления, которые позволяют одновременно изменять положение центра масс и ориентацию робота. Представлены как теоретические, так и экспериментальные исследования.

Локомоционный робот, совершающий плоское движение и управляемый двумя внутренними телами, движущимися по прямолинейным направляющим, которые параллельны плоскости перемещения робота и перпендикулярны друг другу, рассматривается в [55].

В [56] предлагается альтернативный дизайн капсульного робота с двумя внутренними массами. Локомоционная система состоит из жесткого корпуса и двух внутренних тел - точечной массы, способной перемещаться вдоль горизонтальной линии, фиксированной в корпусе, и ротора, который может вращаться вокруг вертикальной оси, жестко закрепленной на корпусе. Предполагается, что направляющая для движения точечной массы проходит через ось вращения ротора, а центр масс ротора лежит на оси его вращения, которая является осью динамической симметрии ротора. Система движется по шероховатой го-

ризонтальной плоскости. Сухое кулоново трение действует между корпусом и плоскостью перемещения. Внутренние тела взаимодействуют с корпусом, но не взаимодействуют с плоскостью перемещения. Конфигурация системы определяется положением ее центра масс на плоскости, положением внутренней точечной массы на линии ее движения относительно корпуса и углом поворота корпуса. Доказана управляемость этой системы на плоскости и разработана стратегия управления, которая перемещает систему между двумя заданными конфигурациями.

Локомоционная система с внутренними массами, которые движутся по прямым линиям относительно корпуса, и ротора также рассматривается в [57]. Однако, в отличие от [56], ротор вращается вокруг горизонтальной, а не вертикальной оси и управляется крутящим моментом, приложенным к этой оси. Этот момент вызывает асимметрию в распределении нормального давления по поверхности контакта системы, что приводит к ненулевому моменту сил трения, приложенных к корпусу робота при его движении. Благодаря этому моменту корпус робота изменяет свою ориентацию относительно подстилающей плоскости. Предложена стратегия управления, которая обеспечивает желаемое плоское движение рассматриваемой системы.

В [58] показано, что управление плоским движением капсульного робота может обеспечиваться одним внутренним телом, которое движется по криволинейной траектории относительно корпуса, и представлена соответствующая стратегия управления. В соответствии с этой стратегией внутреннее тело сначала движется по окружности относительно корпуса, при этом корпус осуществляет поворот и приобретает нужную ориентацию, а затем корпус перемещается вдоль двузвенной ломаной в заданное конечное положение за счет прямолинейных относительных движений внутреннего тела.

1.2 Механическая модель капсульного робота

В настоящей главе рассматривается 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 при выключенном электромагните за счет пружины. Схематическое изображение описанной системы дано на рис. 1.1.

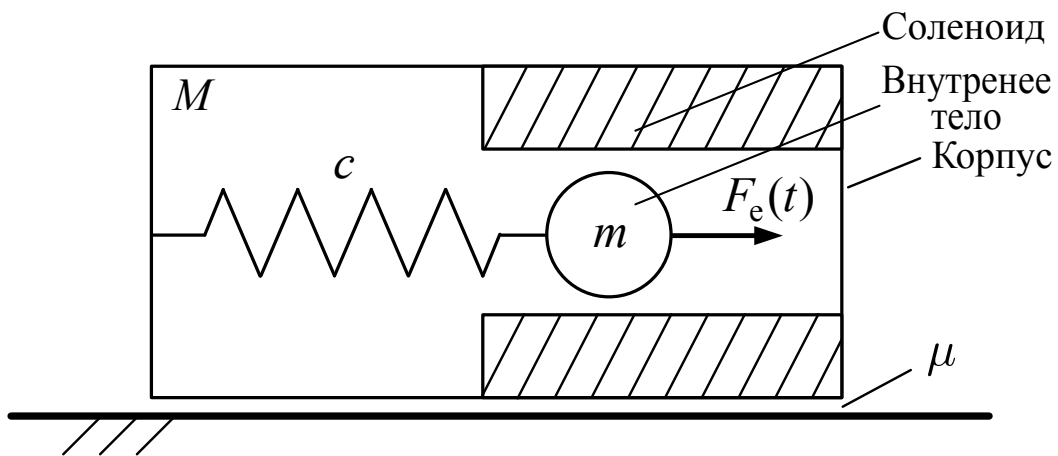


Рисунок 1.1 — Модель капсульного робота.

В математической модели управляющей переменной выбрана сила, приложенная соленоидом к сердечнику. Динамика электрической цепи соленоида не учитывается. Будем исследовать движения робота вдоль горизонтальной прямой, параллельной оси его корпуса.

Введем 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. Будем предполагать, что сила сопротивления среды движению корпуса зависит от его скорости относительно среды, то есть $F_{fr} = F_{fr}(\dot{x})$.

Применяя второй закон Ньютона отдельно к корпусу и сердечнику, получим уравнения движения рассматриваемой системы в следующей форме:

$$M\ddot{x} = c\xi - F_e + F_{fr}(\dot{x}), \quad m(\ddot{x} + \ddot{\xi}) = -c\xi + F_e. \quad (1.1)$$

Введем новую переменную

$$X = x + \frac{m}{M+m}\xi, \quad (1.2)$$

которая представляет координату центра масс системы в неподвижной системе отсчета, и преобразуем систему уравнений (1.1) к виду

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{X} &= F_{fr}\left(\dot{X} - \frac{m}{M+m}\dot{\xi}\right), \\ \frac{Mm}{M+m}\ddot{\xi} + c\xi &= F_e - \frac{m}{M+m}F_{fr}\left(\dot{X} - \frac{m}{M+m}\dot{\xi}\right). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Перейдем к безразмерным (штрихованным) переменным

$$\begin{aligned} X' &= \frac{X}{L}, \quad \xi' = \frac{\xi}{L}, \quad t' = \omega t, \quad F'_e = \frac{F_e}{cL}, \\ F'_{fr}\left(\frac{dX'}{dt'} - m_2\frac{d\xi'}{dt'}\right) &= \frac{1}{cL}F_{fr}\left(\omega L\left(\frac{dX'}{dt'} - m_2\frac{d\xi'}{dt'}\right)\right), \\ \omega &= \sqrt{\frac{c(M+m)}{Mm}}, \quad m_1 = \frac{M}{M+m}, \quad m_2 = \frac{m}{M+m}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где L – неопределенная пока величина, имеющая размерность длины и принятая за единицу измерения. В безразмерных переменных уравнения (1.3) представляются следующим образом (штрихи опущены, точка обозначает производную по безразмерному времени):

$$\begin{aligned} \ddot{X} &= m_1m_2F_{fr}\left(\dot{X} - m_2\dot{\xi}\right), \\ \ddot{\xi} + \xi &= F_e - m_2F_{fr}\left(\dot{X} - m_2\dot{\xi}\right). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Пусть между корпусом и средой, в которой он движется, действует сухое трение, подчиняющееся закону Кулона. Тогда

$$F_{fr}(\dot{x}) = \begin{cases} -N\text{sign } \dot{x}, & \dot{x} \neq 0, \\ -c\xi + F_e, & \dot{x} = 0, \quad |c\xi - F_e| \leq N, \\ -N\text{sign}(c\xi - F_e), & \dot{x} = 0, \quad |c\xi - F_e| > N, \end{cases} \quad (1.6)$$

где N – максимальная абсолютная величина силы трения покоя.

Силу F_e , генерируемую приводом, будем моделировать периодической кусочно-постоянной функцией

$$F_e = \begin{cases} F_0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} < \tau, \\ 0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} \geq \tau, \end{cases} \quad (1.7)$$

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 (1.7) 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.

Соотношения (1.6) и (1.7) представлены в исходных размерных переменных.

Перейдем к безразмерным переменным, выбрав постоянную L в равенствах (1.4) следующим образом:

$$L = \frac{F_0}{c}. \quad (1.8)$$

Такой выбор означает, что при обезразмеривании в качестве единицы длины принимается статическое растяжение пружины силой F_0 . Тогда выражение для F_{fr} , входящее в правые части уравнений (1.5), представляется в виде

$$F_{fr}(\dot{X} - m_2 \dot{\xi}) = \begin{cases} -\varepsilon \operatorname{sign}(\dot{X} - m_2 \dot{\xi}), & \dot{X} - m_2 \dot{\xi} \neq 0, \\ F_e - \xi, & \dot{X} - m_2 \dot{\xi} = 0, \quad |\xi - F_e| \leq \varepsilon, \\ -\varepsilon \operatorname{sign}(\xi - F_e), & \dot{X} - m_2 \dot{\xi} = 0, \quad |\xi - F_e| > \varepsilon, \end{cases} \quad (1.9)$$

где $\varepsilon = N/F_0$, а безразмерное выражение для силы F_e определяется формулой (1.7) при $F_0 = 1$.

Безразмерные уравнения динамики (1.5) в случае, когда управляющая сила и сила трения моделируются выражениями (1.7) и (1.9) соответственно, содержат пять безразмерных параметров: $m_1, m_2, T, \tau, \varepsilon$. Из этих параметров независимых – четыре, поскольку $m_1 + m_2 = 1$.

1.3 Компьютерное моделирование динамики робота

Для роботов рассматриваемого типа наибольший интерес представляет режим движения, при котором сердечник колеблется с периодом T относительно корпуса, а корпус движется относительно среды со скоростью, изменяющейся периодически с тем же периодом T . Такой режим движения назовем стационарным. При стационарных движениях функции $\xi(t)$ и $\dot{X}(t)$ – T -периодические. Важнейшей характеристикой стационарного движения робота представляется его средняя скорость V , определяемая выражением

$$V = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{X}(t) dt. \quad (1.10)$$

Величина V есть средняя скорость движения центра масс робота относительно среды; она совпадает со средней скоростью v движения корпуса относительно среды, которая определяется равенством

$$v = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{x}(t) dt. \quad (1.11)$$

Равенство величин V и v вытекает из соотношения (1.2) и T -периодичности функции $\xi(t)$ при стационарном движении.

Основное содержание данного раздела – анализ зависимости средней скорости движения робота от параметров возбуждения T и τ .

Средняя скорость стационарного движения определялась на основе компьютерного моделирования движения робота, которое состояло в численном интегрировании уравнений (1.5), где функция F_{fr} задается выражением (1.9). 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 между корпусом робота и поверхностью, по которой он движется, отличен от нуля ($\varepsilon \neq 0$).

Моделирование проводилось при следующих значениях неварьируемых параметров робота:

$$\begin{aligned} M &= 0.0213 \text{ кг}, & m &= 0.0231 \text{ кг}, & c &= 360 \text{ Нм}^{-1}, \\ F_0 &= 0.8 \text{ Н}, & N &= 0.7 \text{ Н}, & \omega &= \sqrt{\frac{c(M+m)}{Mm}} = 180.2 \text{ с}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Эти параметры отвечают прототипу миниатюрного внутритрубного вибрационного робота, созданного в Институте проблем механики РАН [15]. Внутритрубный робот отличается от рассматриваемого здесь капсульного робота тем, что его сердечник снабжен штоком, выступающим за пределы корпуса и имеющим на конце контактное устройство, с помощью которого сердечник, как и корпус, взаимодействует со стенкой трубы. Контактные поверхности корпуса и штока имеют покрытие, обеспечивающее анизотропию трения этих модулей о стенку трубы, а именно, сила трения, препятствующая движению корпуса и штока в направлении желаемого перемещения робота значительно меньше силы трения, препятствующего движению в противоположном направлении.

Безразмерные параметры m_1, m_2, ε для рассматриваемой модели имеют следующие значения:

$$m_1 = 0.480, \quad m_2 = 0.520, \quad \varepsilon = 0.88. \quad (1.13)$$

1.4 Анализ стационарного движения робота

Исследуем зависимость средней скорости V стационарного движения системы от параметра τ , характеризующего закон возбуждения (1.7).

На рис. 1.2а и 1.2б представлены в безразмерных единицах типичные зависимости величины V от параметра τ . Рисунок 1.2а соответствует $T = T_1 = 7.7$, а рис. 1.2б отвечает $T = T_2 = 6.0$. Обратим внимание на то, что для периодов возбуждения T_1 и T_2 выполнены неравенства $T_2 < 2\pi < T_1$ и что 2π – это безразмерный период свободных колебаний робота, обусловленных упругостью пружины, связывающей корпус с внутренним телом. Поэтому режим возбуждения с периодом T_1 можно назвать зарезонансным, а режим возбуждения с периодом T_2 – дорезонансным.

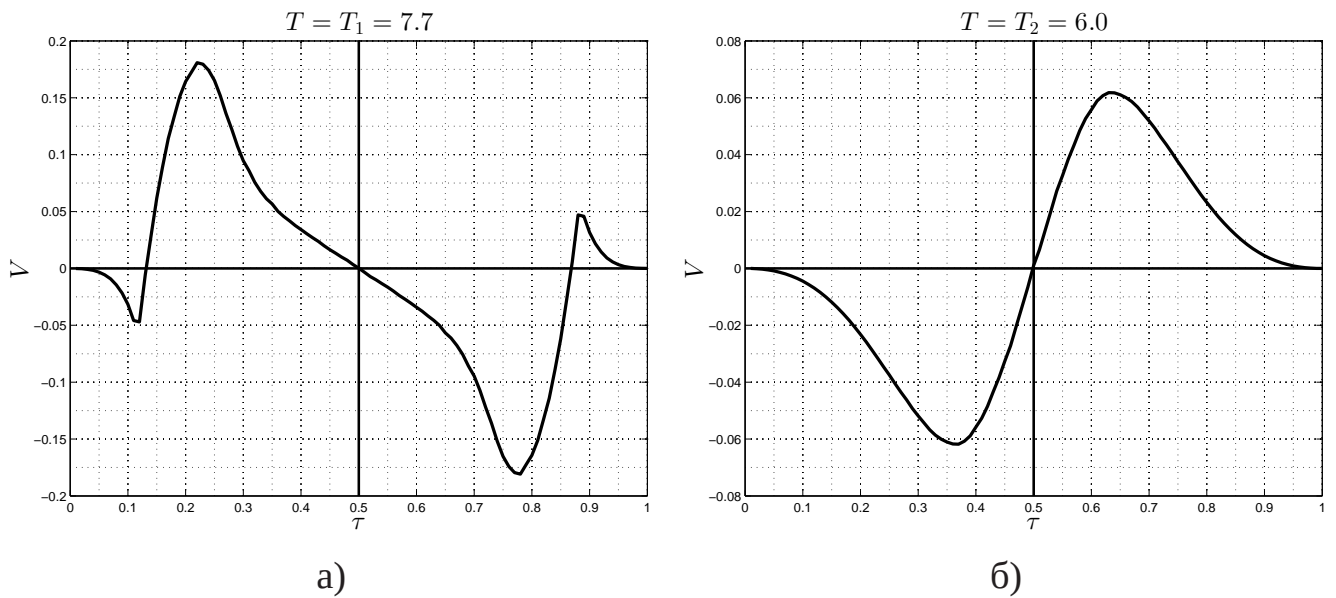


Рисунок 1.2 — Зависимость средней скорости робота от параметра τ при постоянном периоде T

Обе кривые выявляют существенную зависимость средней скорости стационарного движения робота от коэффициента заполнения широтно-импульсного сигнала возбуждения, обуславливая таким образом возможность управлять движением робота, изменяя только параметр τ . При $\tau = 0$, $\tau = 1/2$ и $\tau = 1$ средняя скорость робота равна нулю. Обе кривые обладают свойством центральной симметрии относительно точки $(1/2, 0)$ координатной плоскости τV . Это означает, что изменение коэффициента заполнения сигнала возбуждения с τ на $1 - \tau$ при одном и том же периоде ведет к изменению направления движения капсульного робота при сохранении абсолютной величины его скорости.

Последнее свойство выполняется для всех систем, подчиняющихся уравнениям (1.5), (1.9), при широтно-импульсном режиме возбуждения (1.7). Докажем соответствующее математическое утверждение. Зависимость величин V и $F_e(t)$ от параметра τ будем отмечать верхним индексом в квадратных скобках, т.е. вместо V и $F_e(t)$ будем писать $V^{[\tau]}$ и $F_e^{[\tau]}(t)$ соответственно.

Из определения (1.7) для функции $F_e^{[\tau]}(t)$ при $F_0 = 1$ вытекает равенство

$$F_e^{[\tau]}(t) = 1 - F_e^{[1-\tau]}(t - \tau T). \quad (1.14)$$

У т в е р ж д е н и е. Средние скорости $V^{[\tau]}$ и $V^{[1-\tau]}$ связаны соотношением

$$V^{[\tau]} = -V^{[1-\tau]}. \quad (1.15)$$

Доказательство. Сделаем в уравнениях (1.5), где $F_e = F_e^{[\tau]}(t)$ замену переменных

$$Y(t) = -X(t + \tau T), \quad \eta(t) = -\xi(t + \tau T) + 1. \quad (1.16)$$

С учетом нечетности функции $F_{fr}(z)$ по аргументу $z = \dot{X} - m_2 \dot{\xi}$ и равенства (1.14) получим

$$\begin{aligned} \ddot{Y} &= m_1 m_2 F_{fr}(\dot{Y} - m_2 \dot{\eta}), \\ \ddot{\eta} + \eta &= F_e^{[1-\tau]}(t) - m_2 F_{fr}(\dot{Y} - m_2 \dot{\eta}). \end{aligned} \quad (1.17)$$

Таким образом показано, что если функции $X(t)$ и $\xi(t)$ дают решение системы (1.5) при $F_e = F_e^{[\tau]}(t)$, то функции $Y(t)$ и $\eta(t)$ дают решение этой же системы при $F_e = F_e^{[1-\tau]}(t)$. Если при этом функции $\dot{X}(t)$ и $\xi(t)$ – T -периодические, то функции $\dot{Y}(t)$ и $\eta(t)$ – также T -периодические. Дифференцирование первого равенства (1.16) дает соотношение $\dot{Y}(t) = -\dot{X}(t + \tau T)$, из которого в случае T -периодичности функции $\dot{X}(t)$ вытекают равенства

$$\int_0^T \dot{Y}(t) dt = - \int_0^T \dot{X}(t + \tau T) dt = - \int_0^T \dot{X}(t) dt. \quad (1.18)$$

Поскольку

$$V^{[\tau]} = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{X}(t) dt, \quad V^{[1-\tau]} = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{Y}(t) dt, \quad (1.19)$$

из равенств (1.18) получаем соотношение (1.15). Утверждение доказано.

С л е д с т в и е. При $\tau = 1/2$ средняя скорость стационарного движения системы равна нулю: $V^{[1/2]} = 0$.

Существенное качественное отличие кривых на рис. 1.2а и 1.2б состоит в том, что на интервале $\tau \in (0, 1/2)$ величина V на рис. 1.2а достигает максимума, и этот максимум – положительный, а на рис. 1.2б – минимума, и этот минимум отрицательный. Вспомним, что рис. 1.2а отвечает зарезонансному режиму возбуждения ($T > 2\pi$), а рис. 1.2б – дорезонансному режиму ($T < 2\pi$). Это наблюдение позволяет высказать гипотезу о резонансном эффекте, выражающемся в изменении направления движения системы при прохождении периодом

возбуждения T некоторых критических значений, близких к величинам, кратным периоду собственных упругих колебаний системы.

Причину изменения направления движения системы, связанного с явлением резонанса, можно пояснить исходя из уравнений (1.5), (1.9) при малых значениях коэффициента трения ($\varepsilon \ll 1$). В этом случае вторым слагаемым в правой части второго уравнения (1.5) можно пренебречь по сравнению с F_e . Представим T -периодическую функцию $F_e(t)$ ее рядом Фурье:

$$F_e(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t), \quad \omega_n = \frac{2\pi n}{T}, \quad (1.20)$$

где a_0, a_n, b_n – постоянные коэффициенты (коэффициенты Фурье). Тогда периодическое решение второго уравнения (1.5) при $F_{\text{fr}} = 0$ представляется рядом

$$\xi(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1 - \omega_n^2} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t), \quad \omega_n \neq 1, \quad (1.21)$$

дифференцирование которого дает

$$\dot{\xi}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_n}{1 - \omega_n^2} (b_n \cos \omega_n t - a_n \sin \omega_n t), \quad \omega_n \neq 1. \quad (1.22)$$

При выполнении равенства $\omega_n = 1$ в системе наблюдается резонанс. В этом случае периодического решения второго уравнения (1.5) при $F_{\text{fr}} = 0$ не существует. Вблизи резонанса для величины $\dot{\xi}(t)$ имеет место асимптотическое выражение

$$\dot{\xi}(t) = \frac{1}{2(1 - \omega_n)} (b_n \cos t - a_n \sin t) + O(1), \quad 0 < |1 - \omega_n| \ll 1. \quad (1.23)$$

Первое уравнение (1.5) инвариантно к замене переменных $\dot{X} \rightarrow -\dot{X}$, $\dot{\xi} \rightarrow -\dot{\xi}$. Из асимптотического выражения (1.23) в первом приближении вытекает, что при замене частоты ω_n на $2 - \omega_n$ в выражении (1.5) функция $\dot{\xi}(t)$ меняет знак. Следовательно, меняет знак и функция $\dot{X}(t)$, а вместе с ней и средняя скорость V движения системы в стационарном режиме. Расстройки частот ω_n и $2 - \omega_n$ от резонансной частоты, равной единице, одинаковы по абсолютной величине, но противоположны по знаку.

В терминах периода возбуждения условие резонанса выражается равенством $T = 2\pi n$, $n = 1, 2, \dots$. Следовательно, по крайней мере в случае слабого трения ($\varepsilon \ll 1$), можно ожидать многократных изменений направления движения системы при увеличении периода возбуждения.

Изменение направления движение мобильной системы с вибрационным способом возбуждения, связанное с явлением резонанса, ранее отмечалось в статье [16]. В этой работе рассматривается двухмодульная локомоционная система, движущаяся вдоль прямой по горизонтальной шероховатой плоскости. Система состоит из двух одинаковых модулей, представляющих собой твердые тела, на каждом из которых расположен дебалансный вибровозбудитель. Дебалансный вибровозбудитель – это ротор, центр масс которого не лежит на оси вращения. Модули соединены между собой пружиной с линейной характеристикой. Между модулями системы и плоскостью, по которой она движется, действует сухое кулоново трение. Сила трения предполагается малой. Возбуждение системы происходит при вращении обоих роторов с одинаковыми постоянными угловыми скоростями, но со сдвигом по фазе (перпендикуляры, опущенные из центров масс роторов на оси их вращения, не параллельны). В описанной системе наблюдается изменение направления движения при прохождении частоты возбуждения через резонансное значение, равное частоте собственных колебаний модулей, соединенных пружиной, в отсутствие трения. Движение локомоционных систем, состоящих из двух тел, соединенных пружиной и управляемых силами взаимодействия между соседними телами, изучалось в монографии [17]. В частности, рассматривалось их поведение вблизи резонанса. Однако, в отличие от модели, рассматриваемой в данной статье, в [17] предполагалось, что оба тела системы взаимодействуют со средой, управляющие силы меняются по гармоническому закону, а трение между телами системы и средой относительно мало.

Явление резонансного изменения знака средней скорости движения робота ясно проявляется на кривой, изображающей зависимость величины V от периода возбуждения T . На рис. 1.3 такая зависимость показана для $\tau = 0.2$. Изменение знака скорости здесь происходит в точке $T = 7.14$. Вблизи этой точки достигаются экстремальные значения величины V – минимум, равный -0.086 , при $T = 6.9$ и максимум, равный 0.18 , при $T = 8.0$. Сдвиг точки изменения знака скорости V от резонансного периода $T = 2\pi$ объясняется влиянием сухого трения между корпусом робота и плоскостью, по которой он движется, на колебания внутреннего тела (сердечника). Качественно картина сохраняется и для других $0 < \tau < 1/2$. Согласно доказанному выше утверждению, графики зависимости V от T , отвечающие значениям τ и $1 - \tau$ коэффициента заполнения широтно-импульсного сигнала возбуждения, симметричны друг другу относительно оси T .

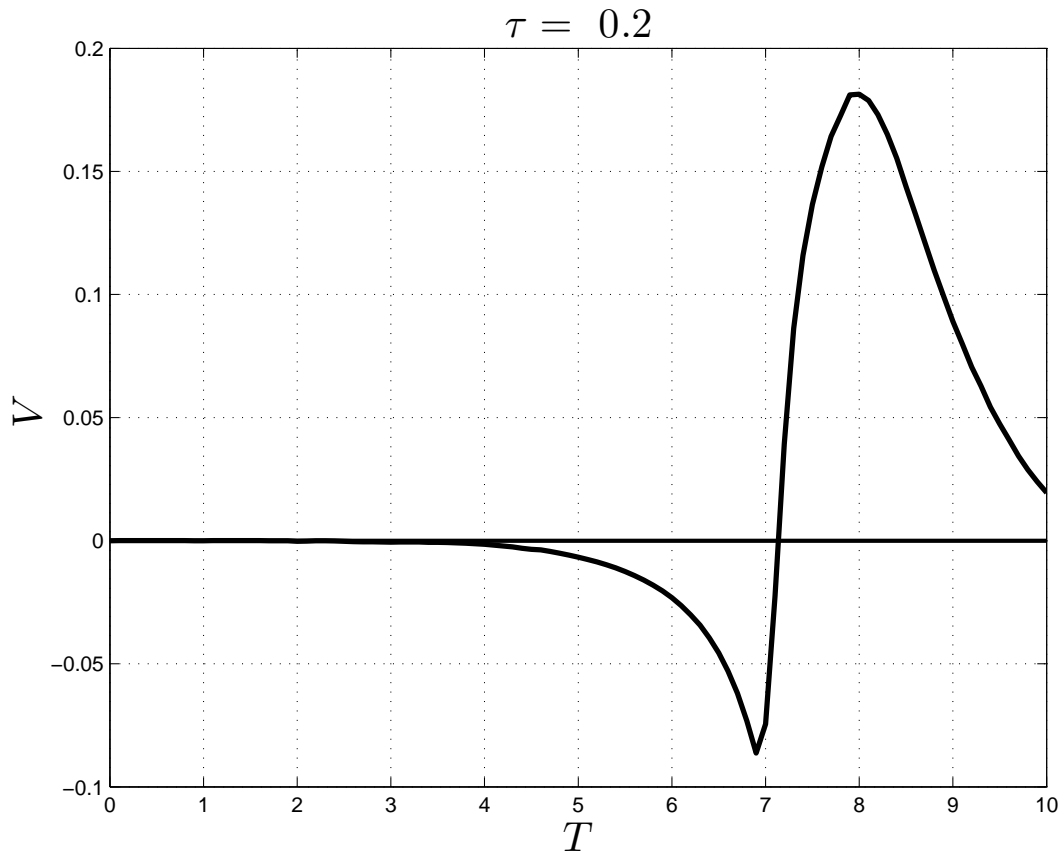


Рисунок 1.3 — Зависимость средней скорости робота от периода T при постоянном параметре τ .

Таким образом, изменяя период возбуждения T или параметр τ , можно управлять как величиной скорости, так и направлением движения капсульного робота. На рис. 1.4 изображен график величины V как функции параметров T и τ в области $\{T, \tau : 0 < T < 10.0, 0 < \tau < 0.5\}$. Согласно равенству (1.15), в области $\{T, \tau : 0 < T < 10.0, 0.5 < \tau < 1\}$ график этой функции получается поворотом графика, изображенного на рис. 1.4, на 180° относительно прямой $V = 0, \tau = 0.5$ в координатном пространстве $T\tau V$.

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 (1.12) в безразмерных единицах дают (см. также рис. 1.4)

$$\begin{aligned} V_{max} &= 0.1868, & T_{max} &= 7.95, & \tau_{max} &= 0.215, \\ V_{min} &= -0.1868, & T_{min} &= 7.95, & \tau_{min} &= 0.785. \end{aligned} \tag{1.24}$$

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

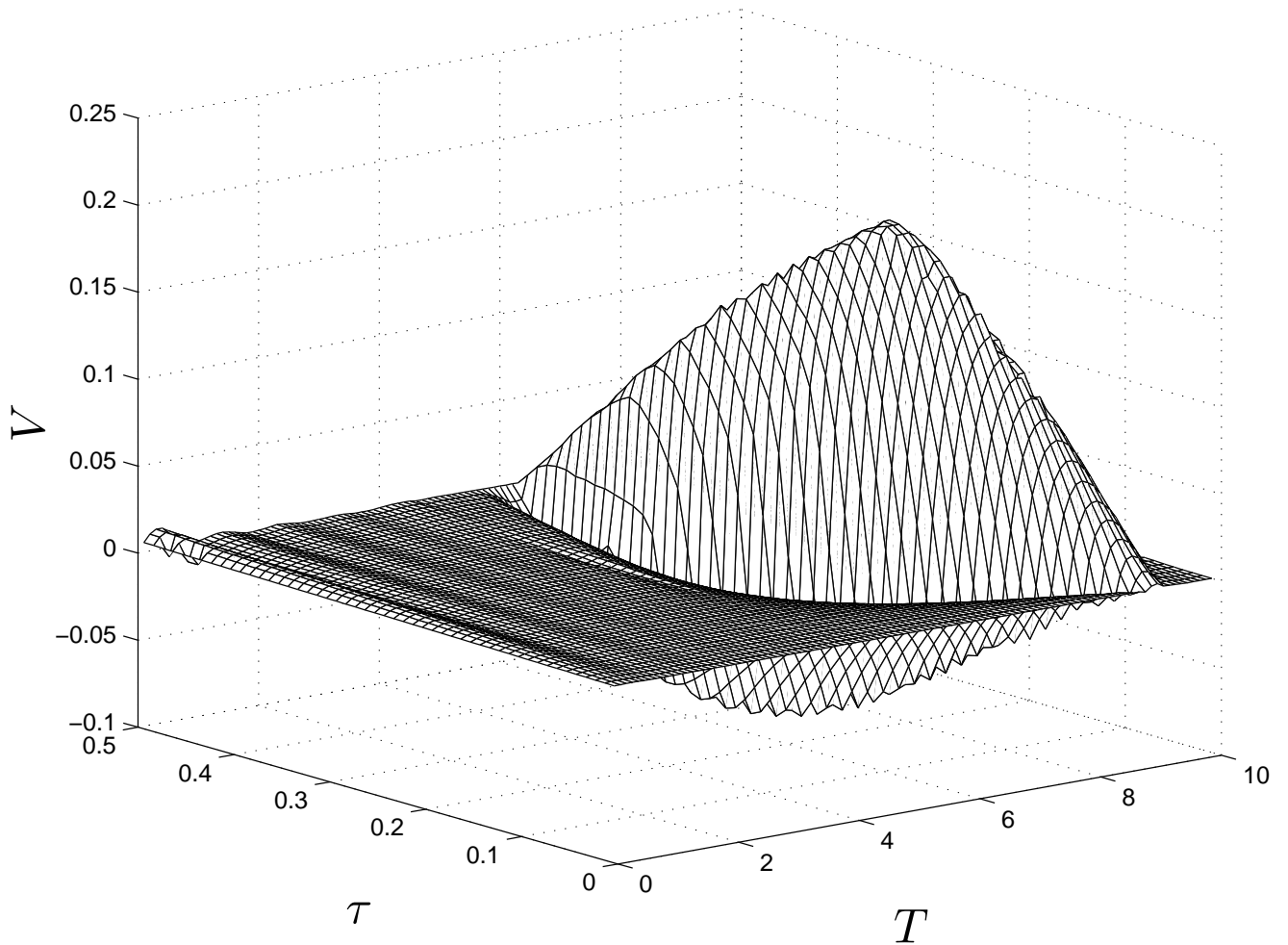


Рисунок 1.4 — Зависимость средней скорости робота от периода T и параметра τ .

В исходных размерных единицах равенства (1.24) представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} V_{max} &= 0.0748 \frac{\text{М}}{\text{с}}, & T_{max} &= 0.0441 \text{ с}, & \tau_{max} &= 0.215, \\ V_{min} &= -0.0748 \frac{\text{М}}{\text{с}}, & T_{min} &= 0.0441 \text{ с}, & \tau_{min} &= 0.785. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Обратим внимание на то, что

$$V_{min} = -V_{max}, \quad T_{max} = T_{min}, \quad \tau_{max} = 1 - \tau_{min}. \quad (1.26)$$

Эти равенства выполняются для робота рассматриваемого типа с любыми параметрами, а не только с параметрами (1.12), для которых проводилось моделирование. Равенства (1.26) следуют из общего соотношения (1.15).

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. Таким образом, если в течение периода корпус робота никогда не движется назад, он должен некоторое время покоиться относительно среды.

Моделирование показывает, что движение корпуса робота относительно среды может иметь разнообразный характер, зависящий от параметров T и τ , что иллюстрируют рис. 1.5. На этих рисунках в безразмерных переменных представлены зависимости скорости корпуса робота относительно среды ($v(t)$, сплошные кривые), скорости сердечника относительно корпуса ($\dot{\xi}(t)$, штриховые кривые) и скорости центра масс системы относительно среды ($\dot{X}(t)$, штрих-пунктирные кривые) от времени при некоторых значениях T и $\tau \in (0, 0.5)$. Обратим внимание на то, что стационарные движения рассматриваются при больших значениях безразмерного времени t , причем эти значения могут быть различными на различных рисунках. Этот факт отражает реальную историю моделирования: стационарный режим устанавливается после относительно продолжительного переходного процесса, длительность которого зависит от параметров возбуждения. Рисунки 1.5а и 1.5б отвечают движению при достаточно малых τ . В этом случае корпус движется в направлении средней скорости на одном интервале времени и покоится в течение остальной части периода. Рисунок 1.5а отвечает дорезонансному режиму ($T = 6$, $\tau = 0.2$), а рис. 1.5б – зарезонансному режиму ($T = 7.7$, $\tau = 0.1$). Кривые на рис. 1.5в и 1.5г отвечают движению при τ , близком к 0.5, в дорезонансном (рис. 1.5в, $T = 6$, $\tau = 0.49$) и зарезонансном (рис. 1.5г, $T = 7.7$, $\tau = 0.49$) режимах. Здесь можно выделить период, разбивающийся на два интервала, на одном из которых корпус движется вперед, а на другом – назад; интервалов покоя корпуса нет. Наблюдаются также стационарные режимы движения, в которых на каждом периоде корпус имеет интервалы движения вперед и назад, а также один

(рис. 1.5д, $T = 7.1$, $\tau = 0.2$) или несколько (рис. 1.5е, $T = 9.8$, $\tau = 0.2$) интервалов покоя. На рис. 1.5ж изображены кривые, отвечающие оптимальным параметрам (1.24). Как видно из этого рисунка, период стационарного движения робота можно определить так, что каждый период будет содержать один интервал времени, на котором корпус движется вперед, два интервала времени, на которых корпус движется назад, и один интервал времени, в течение которого корпус покоится.

1.5 Оптимизация конструкции капсульного робота

Диапазон возможных средних скоростей робота при форме управляющего сигнала (1.7) определяется параметрами среды и конструкцией робота. В этом разделе представлено исследование влияния полной массы робота, отношения массы корпуса к полной массе робота и величины возбуждающей силы F_0 на величину максимально возможной средней скорости капсульного робота. Исследования проводилось следующим образом. Для каждого набора параметров системы находились параметры возбуждения так, чтобы максимизировать среднюю скорость робота. Ставится цель получения только качественных зависимостей максимальной средней скорости робота от конструктивных параметров, поэтому параметры возбуждения варьируются с увеличенным шагом: шаг для параметра T равен 0.25, для параметра τ – 0.1.

В модели с безразмерными переменными (1.5) параметры m_1 (или $m_2 = 1 - m_1$) и ε характеризуют конструкцию робота. Параметр m_1 – это отношение массы корпуса к полной массе робота, ε – отношение максимальной величины силы трения покоя N к величине возбуждающей силы F_0 . На рис. 1.6 представлена зависимость максимальной средней скорости робота от параметра ε . Максимальная средняя скорость находилась в процессе интегрировании уравнений движения при различных параметрах системы: параметр T изменялся от 0 до 12, параметр τ – от 0 до 0.5, параметр $m_1 = 0.48$, параметр ε – от 0 до 10. Полученная зависимость имеет максимум при $\varepsilon \approx 2$. При увеличении ε средняя скорость снижается, но даже при величине силы трения N превосходящей силу возбуждения F_0 в 10 раз движение остается возможным. На рис. 1.7 отображены зависимости средних скоростей робота в зависимости от T при различных ε и оптимальном τ . Из этих

графиков можно заметить, что с увеличением ε движение остается возможным только при T , близком к резонансному периоду. Такой результат связан с тем, что на координату внутреннего тела относительно корпуса не наложены ограничения. В системе есть пружина, поэтому если в определенные моменты времени мы будем периодически прикладывать силу F_0 , то возможно существенно увеличить амплитуду колебаний внутреннего тела, тем самым сделав упругую силу пружины превосходящей силу трения. Этот результат продемонстрирован на рис. 1.8. При $\varepsilon = 0.5$, амплитуда движений внутреннего тела составляет около 20% от длины статического растяжения пружины под действием постоянной силы F_0 , тогда как при $\varepsilon = 10$ амплитуда движения внутреннего тела составляет около 400%.

Для исследования влияния F_0 на максимальную среднюю скорость робота, будем считать, что N постоянно и равно 0.71Н. Переведем результаты моделирования на рис. 1.6 в размерные переменные и выделим искомую зависимость. Из определения ε находим $F_0 = N/\varepsilon$. Для получения значения скорости в размерных переменных результаты моделирования необходимо домножить на $L\omega$, где ω фиксирована, а величина L выражается через ε и фиксированные параметры N и c :

$$L = \frac{F_0}{c} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{N}{c}. \quad (1.27)$$

На рис. 1.9 отображена зависимость средней скорости робота от F_0 в размерных переменных. Найденная кривая выявляет существенную зависимость средней скорости стационарного движения робота от F_0 , причем при увеличении значения возбуждающей силы F_0 максимальная скорость робота увеличивается. Таким образом, увеличение скоростных характеристик робота может быть выбором через электромагнитного привода, действующего на сердечник с большей силой.

Для изучения влияния полной массы робота на максимальную среднюю скорость будем считать, что $N = \mu(M + m)g$, а F_0 , μ и отношения массы корпуса и внутреннего тела к полной массе робота фиксированы, тогда увеличение значения параметра ε означает увеличение полной массы робота $M + m$. Поскольку L и ω при изменении полной массы робота постоянны, то наблюдения, сделанные для модели в безразмерных переменных, справедливы для модели в размерных переменных. Тогда наличие максимума около $\varepsilon = 2$, приводит к выводу что для заданных μ , F_0 существует оптимальная масса робота, максимизирующая диапазон возможных средних скоростей робота.

Для исследования влияния параметра m_1 на максимальную среднюю скорость, будем считать, что полная масса робота постоянна, и будем варьировать отношение массы корпуса к полной массе робота. На верхнем графике рис. 1.10 отображена полученная зависимость. Максимальная средняя скорость находилась при интегрировании уравнений при различных фиксированных параметрах: параметр T изменялся от 0 до 24, параметр τ от 0 до 0.5, параметр m_1 от 0.1 до 0.9, параметр $\varepsilon = 0.88$. Для интерпретации этого графика переведем его в размерные переменные. При изменении m_1 меняется величина обезразмеривания ω , которая выражается через m_1 из (1.4) следующим образом:

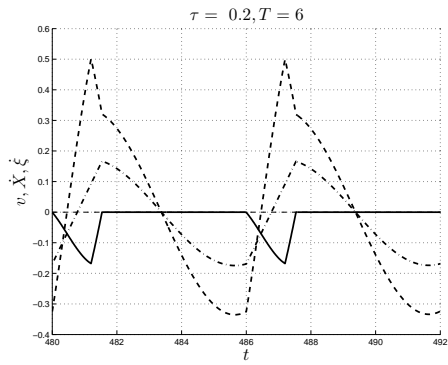
$$\omega = \sqrt{\frac{c}{M + m} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{1 - m_1} \right)} \quad (1.28)$$

Тогда домножив данные, полученные для модели в безразмерных переменных (верхний график из рис. 1.10), на $L\omega$ (средний график из рис. 1.10), получим график зависимости максимальной средней скорости робота от параметра m_1 в размерных переменных (нижний график из рис. 1.10). Полученная кривая выявляет существенную зависимость средней скорости стационарного движения робота от относительной массы корпуса, с экстремумом в точке $m_1 = 0.2$. Следовательно система сможет двигаться с большей средней скоростью, если масса корпуса составляет 20% от полной массы робота. На отрезке $[0.2; 0.9]$ увеличение массы корпуса приводит к уменьшению максимальной средней скорости робота, поэтому при $m_1 > 0.2$ перераспределение массы с корпуса на внутреннее тело приведет к увеличению диапазона возможных средних скоростей капсульного робота, а при $m_1 < 0.2$ следует перераспределять массу с внутреннего тела на корпус.

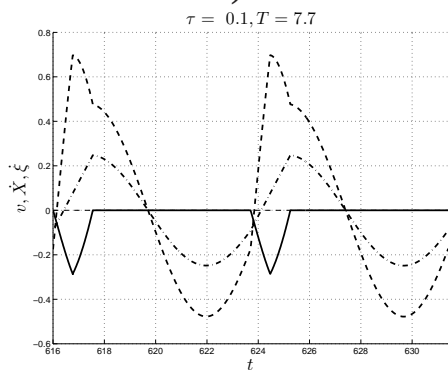
1.6 Выводы по главе 1

Направлением и величиной скорости движения капсульного робота, в котором внутреннее тело прикреплено к корпусу с помощью пружины, можно управлять, изменяя силу взаимодействия между корпусом и внутренним телом периодически в широтно-импульсном режиме. При таком режиме управляющая сила знакопостоянна, а настраиваемыми параметрами служат период и коэффициент заполнения управляющего сигнала. Монотонное изменение периода при

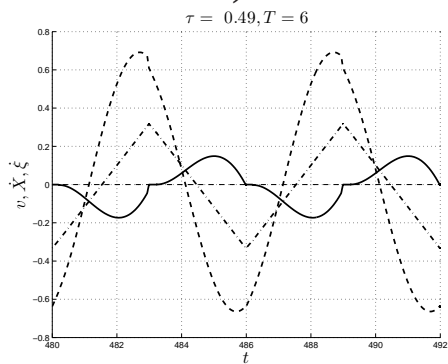
постоянном коэффициенте заполнения влечет непрерывное изменение средней скорости робота в установившемся движении, причем при некоторых критических значениях периода скорость меняет знак. Изменение знака скорости связано с резонансными явлениями в колебательном звене системы. Изменение коэффициента заполнения при постоянном периоде также 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 противоположных направлениях. Таким образом, управлять системой можно как изменением периода, так и изменением коэффициента заполнения управляющего сигнала. Наиболее целесообразным представляется управление путем изменения коэффициента заполнения при фиксированном периоде, соответствующем абсолютному максимуму средней скорости движения робота. В этом случае варьирование коэффициента заполнения позволяет охватить весь диапазон возможных скоростей робота. Зависимость скорости корпуса робота относительно среды и скорости сердечника относительно корпуса от времени при стационарном режиме движения имеет различный характер при различных значениях параметров возбуждения. В частности, 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. Для увеличения диапазона возможных скоростей робота следует увеличивать силу взаимодействия внутреннего тела и корпуса, также величина максимальной средней скорости робота существенно зависит от полной массы робота и отношения массы корпуса к полной массе системы.



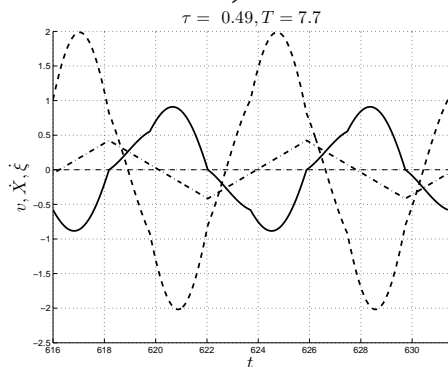
а)



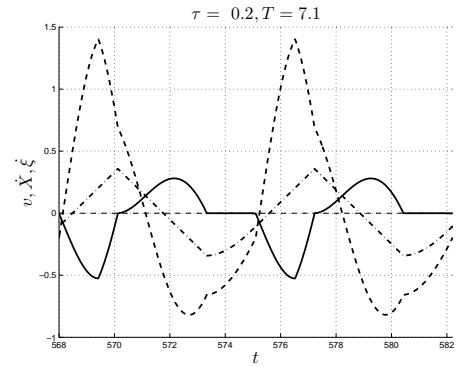
б)



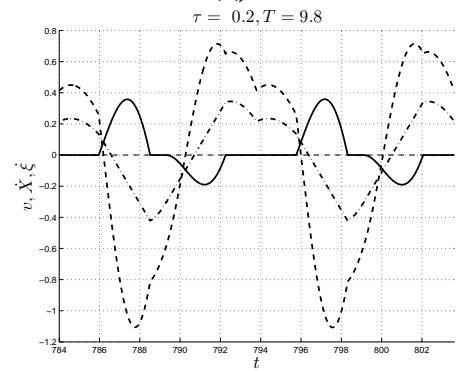
в)



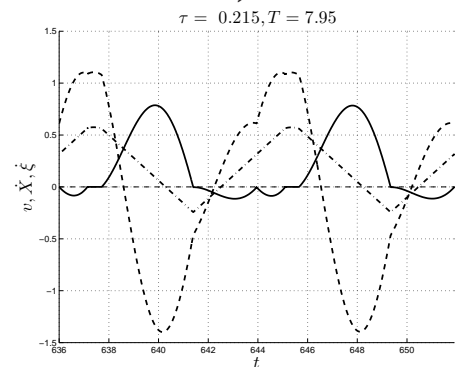
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 1.5 — Зависимости скорости корпуса робота, сердечника и ц.м. системы от времени

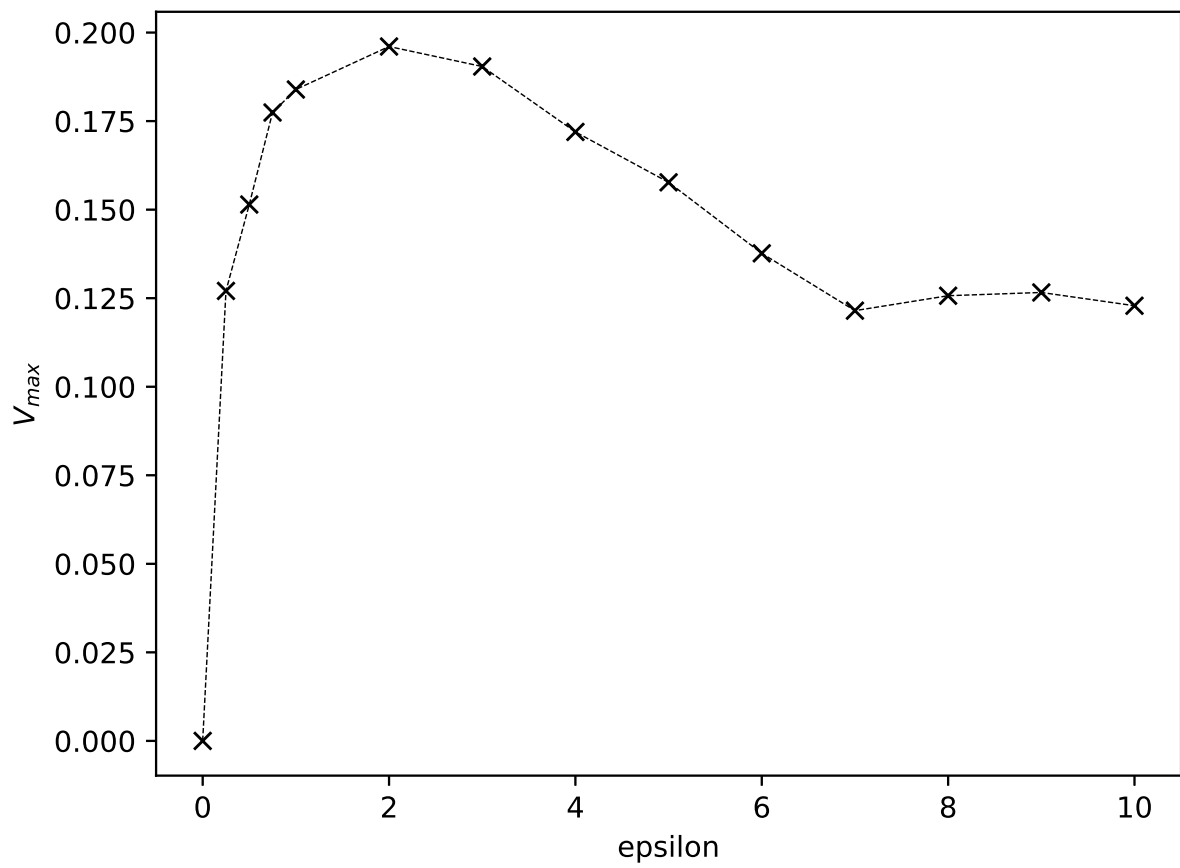


Рисунок 1.6 — Зависимость максимальной средней скорости робота от параметра ϵ . Безразмерные переменные.

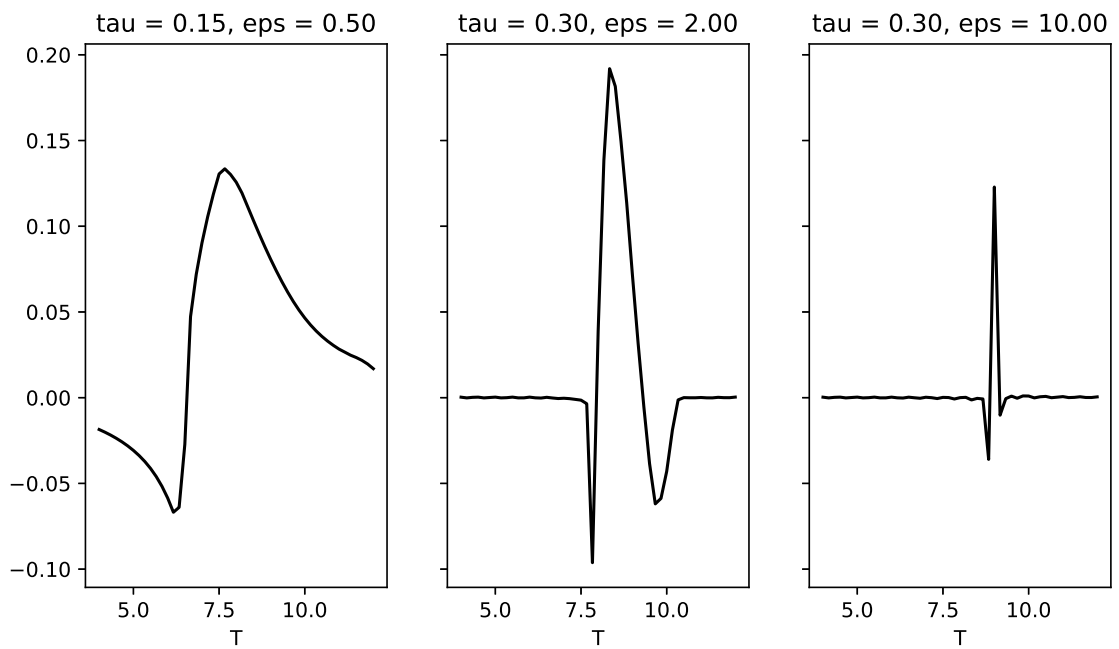


Рисунок 1.7 — Зависимости средней скорости робота от параметра T при различных τ и ϵ

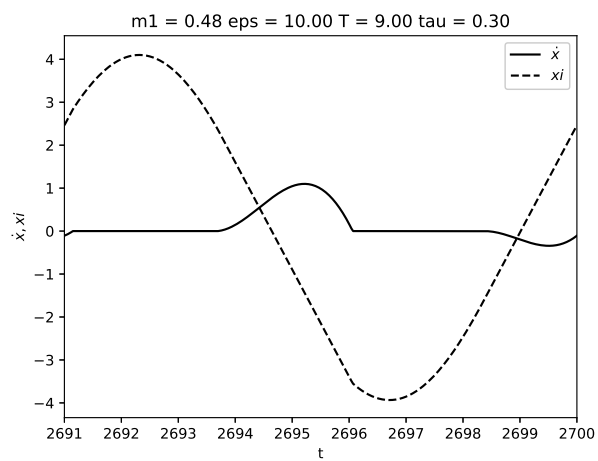
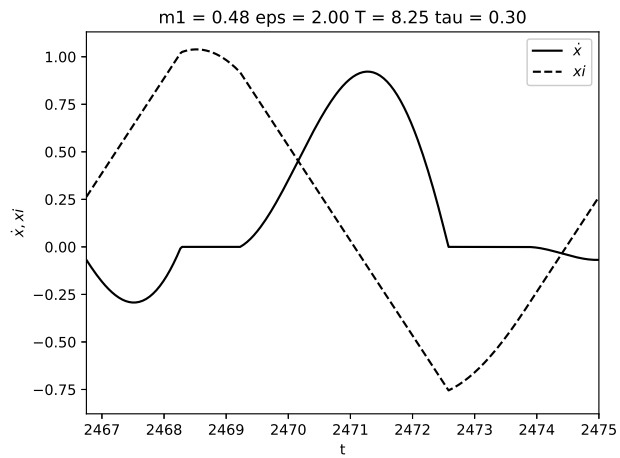
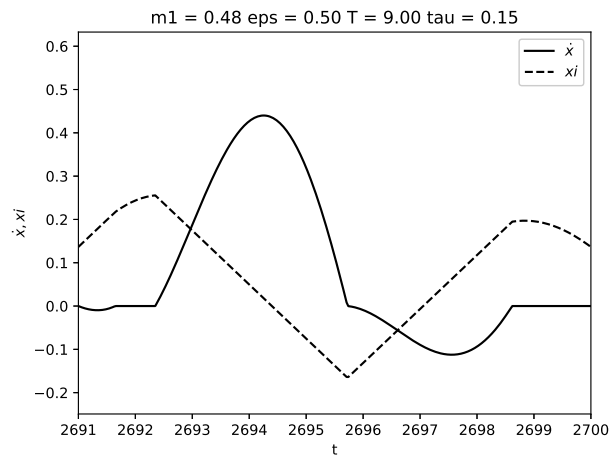


Рисунок 1.8 — Зависимость координат x и ξ от времени.

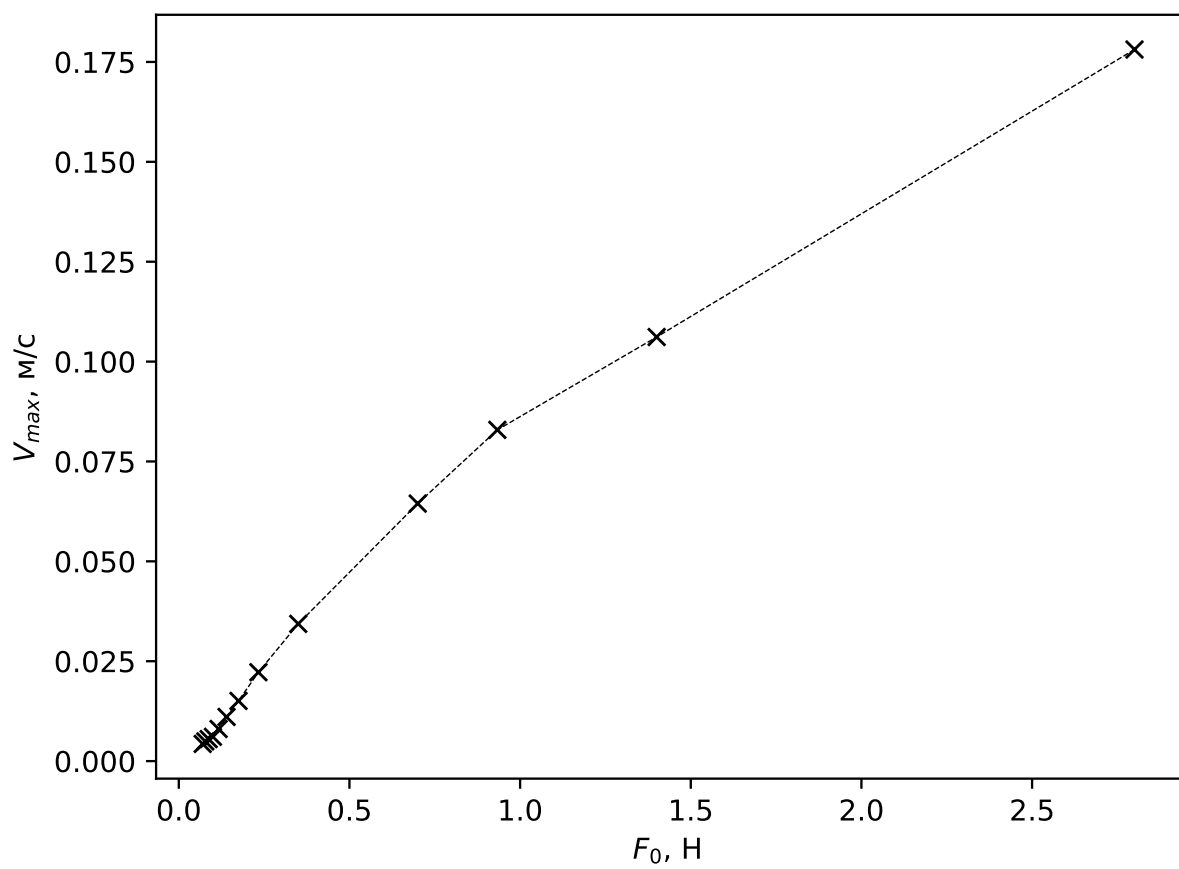


Рисунок 1.9 — Зависимость максимальной средней скорости робота от F_0 .
Размерные переменные.

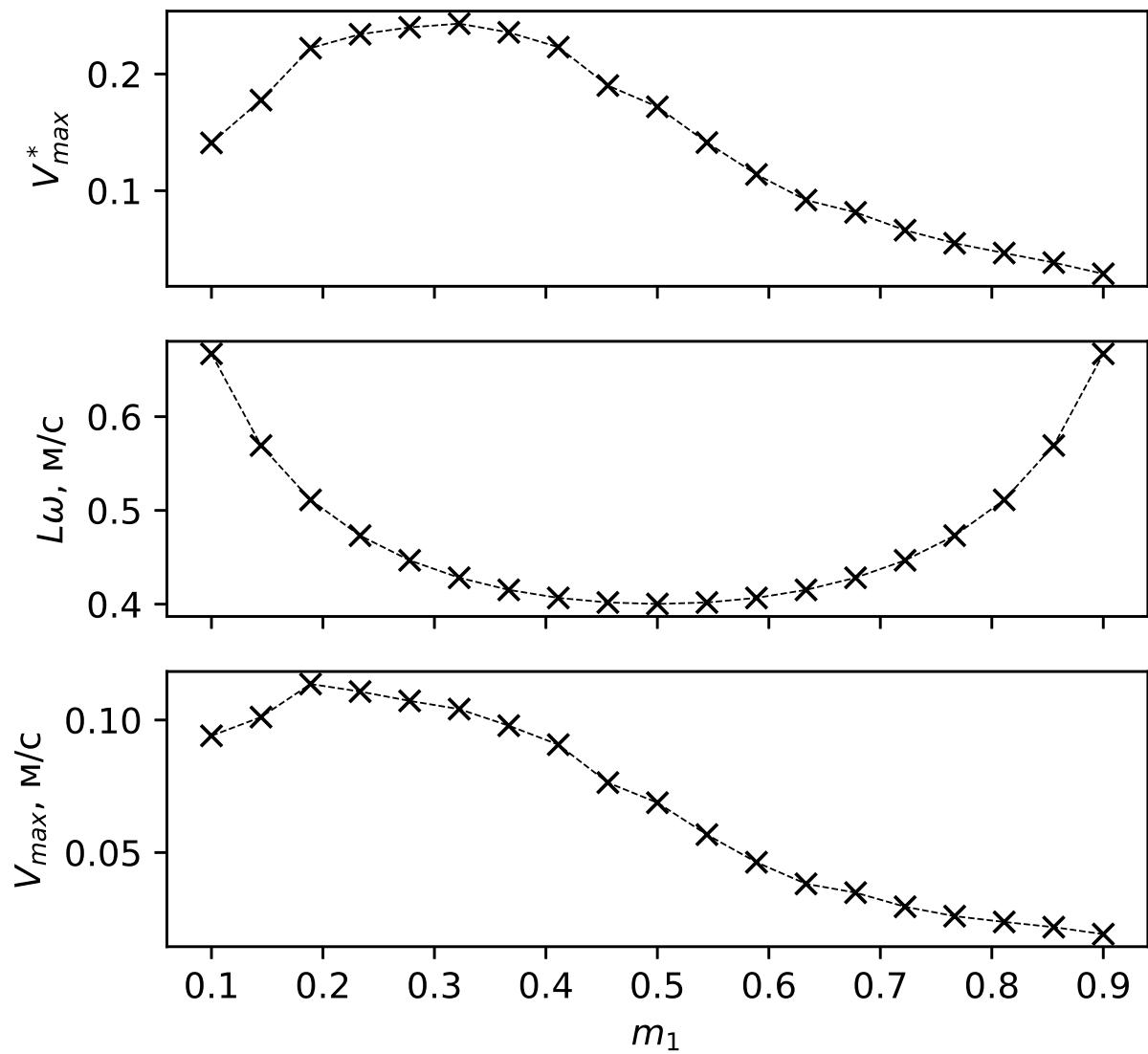


Рисунок 1.10 — Зависимость максимальной средней скорости робота от параметра m_1 .

Глава 2. Капсульный вибрационный робот с возвратной пружиной: экспериментальное исследование

Для проведения экспериментального исследования разработан прототип капсульного робота, модель которого представлена в главе 1. В экспериментах изучается влияние параметров возбуждающего сигнала на среднюю скорость установившегося движения. Математическое моделирование динамики капсульного робота выявило два значимых свойства системы: во-первых, изменение параметра τ при фиксированном параметре T может привести к изменению направления средней скорости робота с сохранением величины средней скорости; во-вторых, направление средней скорости робота может быть изменено в процессе варьирования параметра T при фиксированном параметре τ . Последнее свойство связывается с резонансным эффектом, обусловленным наличием пружины и периодической возбуждающей силы. При значениях периода возбуждения T , близких к периоду собственных колебаний системы внутреннее тело–пружина–корпус, происходит смена направления средней скорости робота. Выявление аналогичных свойств у прототипа капсульного робота является одной из основных задач исследования, представленного в этой главе.

2.1 Проведение эксперимента и анализ экспериментальных данных

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. 2.1 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	$\mu = 0.29$

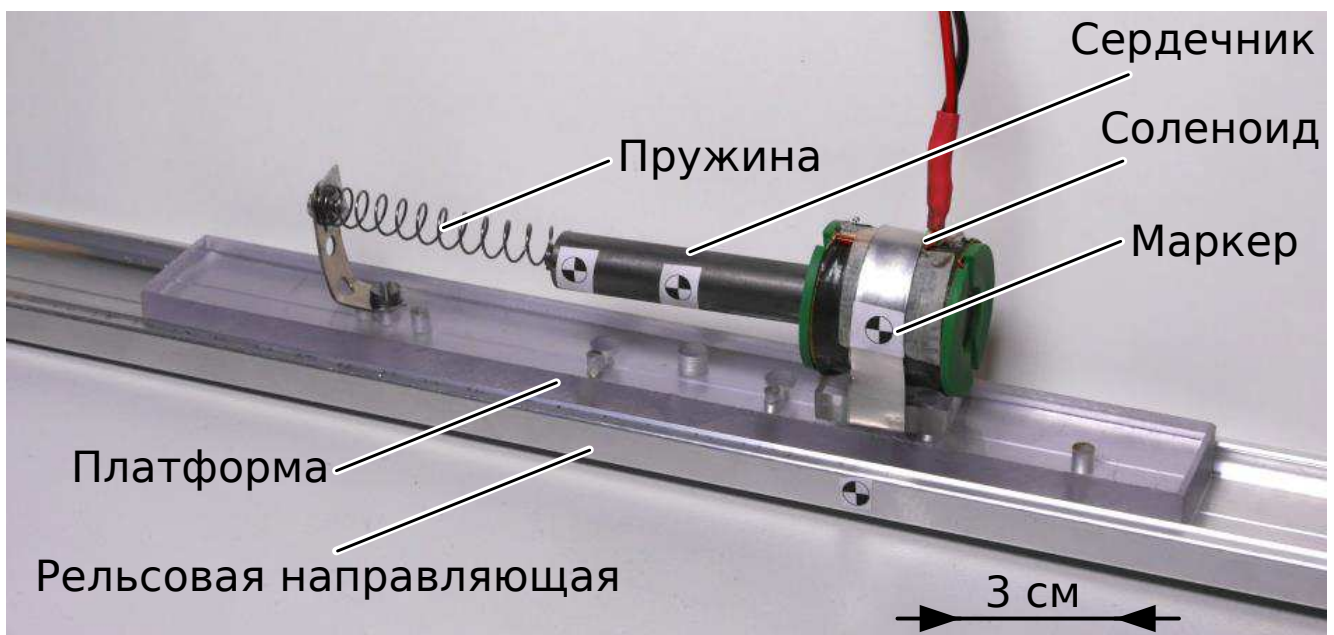


Рисунок 2.1 — Прототип капсульного робота

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

$$U_e = \begin{cases} U_0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} < \tau, \\ 0, & \left\{ \frac{t}{T} \right\} \geq \tau, \end{cases} \quad (2.1)$$

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. Выбранный режим управления напряжением не гарантирует, что временная зависимость результирующей силы F_e совпадет с зависимостью, использованной в математической модели (1.7). Поэтому количественное совпадение модельных и экспериментальных данных не ожидается. Тем не менее, предполагается сохранение качественных эффектов.

Локомоция робота анализируется с помощью наблюдения за маркерами, размещенными на сердечнике и катушке. Две иллюстративные локомоционные характеристики представлены на рис. 2.2 и рис. 2.3. Видеокадры демонстрируют движение системы в течение одного периода T и ее смещение после нескольких периодов. Диаграммы на рис. 2.2 и рис. 2.3 представляют временные зависимости координат сердечника и соленоида. Сердечник совершает периодическое движение относительно корпуса робота, которое приводит к движению всего робота с постоянной средней скоростью. На рис. 2.2 представлены результаты наблюдения, когда период возбуждающего сигнала ниже предполагаемого математической моделью резонансного периода, тогда как на рис. 2.3 изображены результаты для случая, когда период превосходит значение резонансного периода.

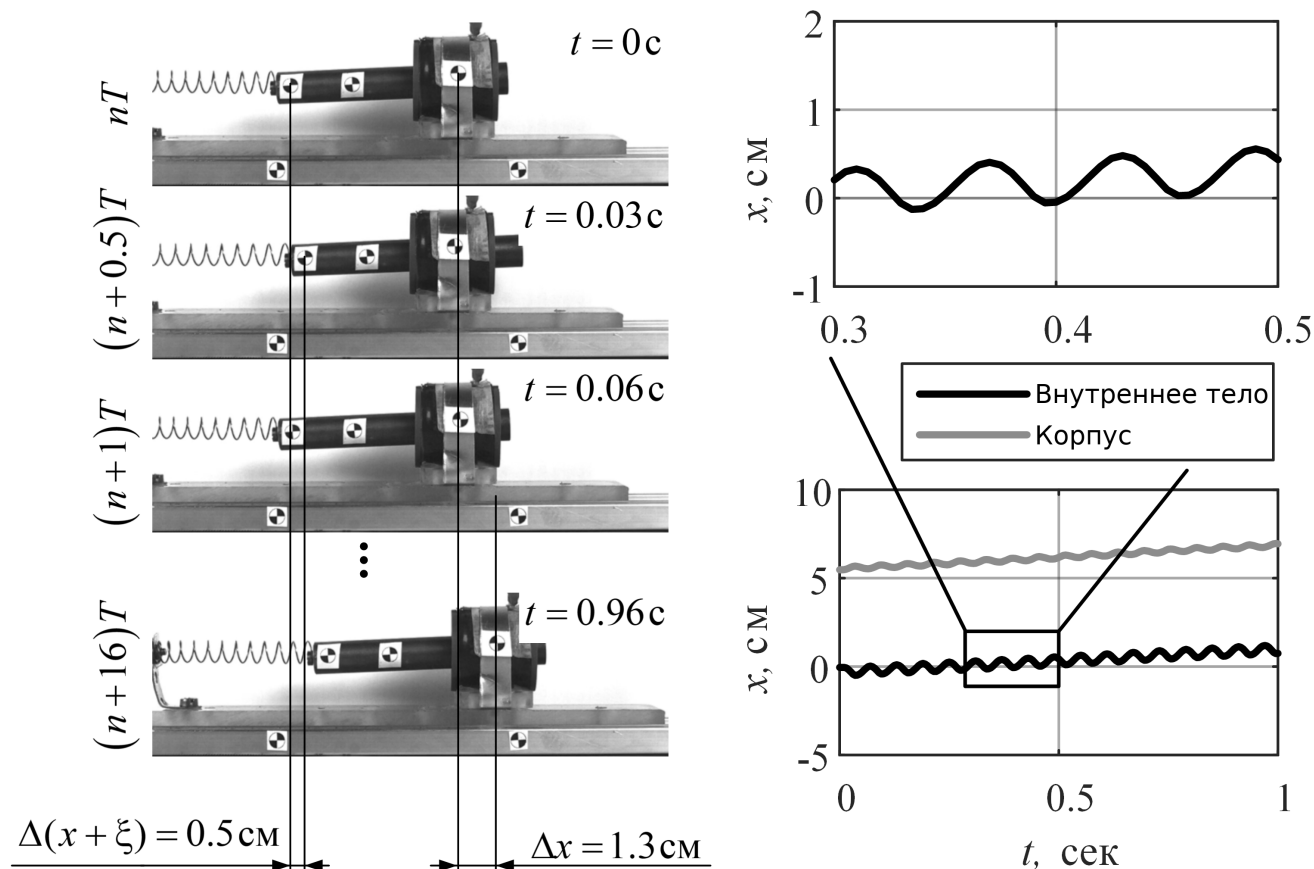


Рисунок 2.2 — Движения экспериментальной системы: $T = 60$ мс, $\tau = 0.70$

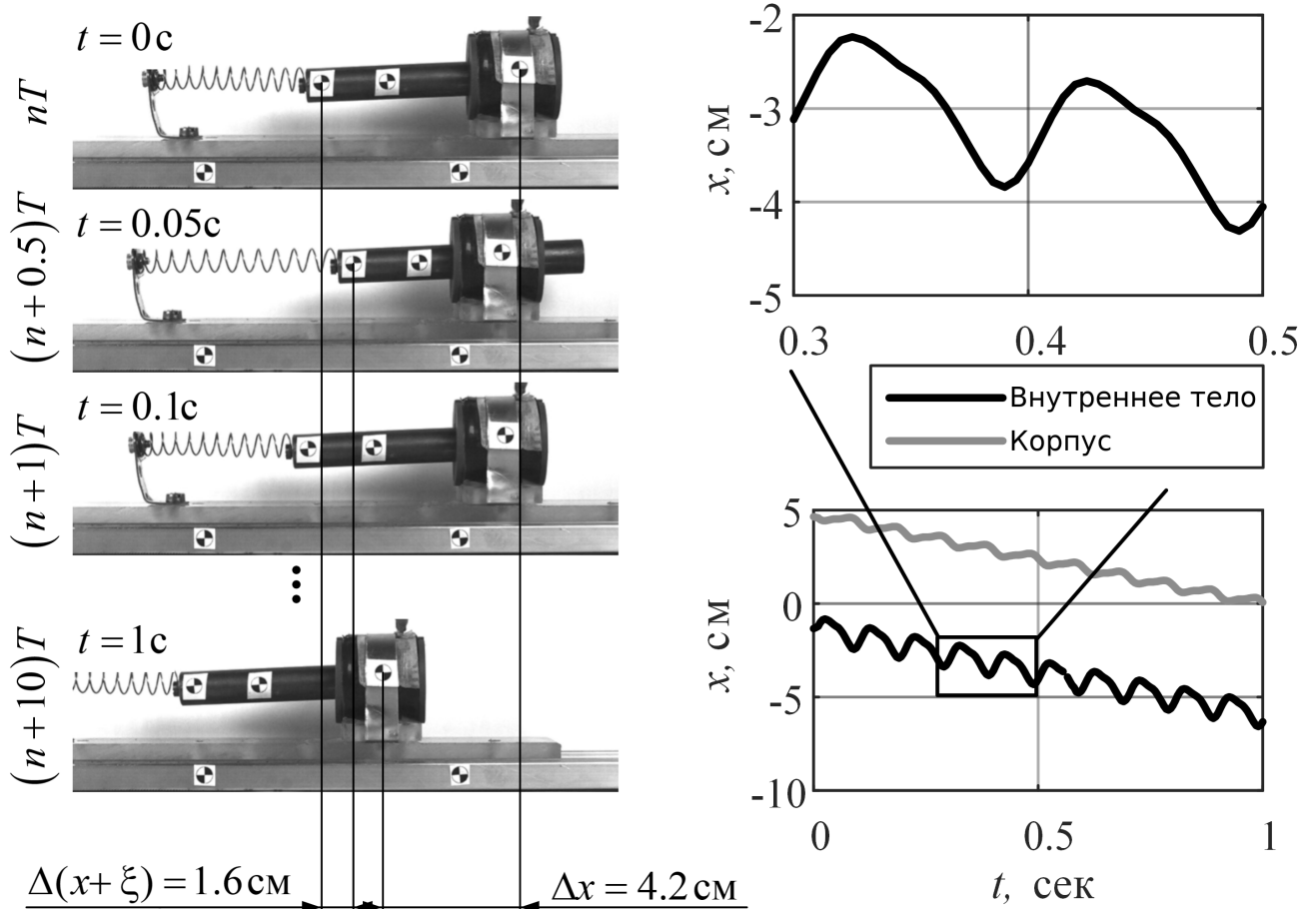


Рисунок 2.3 — Движение экспериментальной системы: $T = 100$ мс, $\tau = 0.70$

Анализ экспериментов и его результаты представлены в безразмерных переменных, которые использовались в предыдущей главе. Вместо V , t и T , мы используем переменные $Vc/(F_0\omega)$, ωt и ωT , но сохраняем первоначальные обозначения для безразмерных переменных. Временной параметр ω определяется выражением (1.12), что соответствует собственной частоте колебательной системы, образованной корпусом и внутренним телом, соединенными пружиной.

Первая часть эксперимента направлена на исследование зависимости средней скорости робота V от параметра возбуждения τ при фиксированном параметре T . Пусть смещение корпуса робота x_t измеряется за время t , тогда средняя скорость вычисляется как x_t/t . Два значения T выбираются по аналогии с математическим исследованием в главе 1; одно соответствует зарезонансному периоду ($T = 1.10 \cdot 2\pi$), а другое - дорезонансному периоду ($T = 0.66 \cdot 2\pi$).

На рис. 2.4 представлены полученные из экспериментов зависимости средней скорости робота от τ . Обе кривые выражают существенную зависимость средней скорости робота от коэффициента заполнения возбуждающего сигнала τ . Для $\tau = 0$, $\tau = 1$ и около $\tau = 0.5$ средняя скорость робота равна нулю.

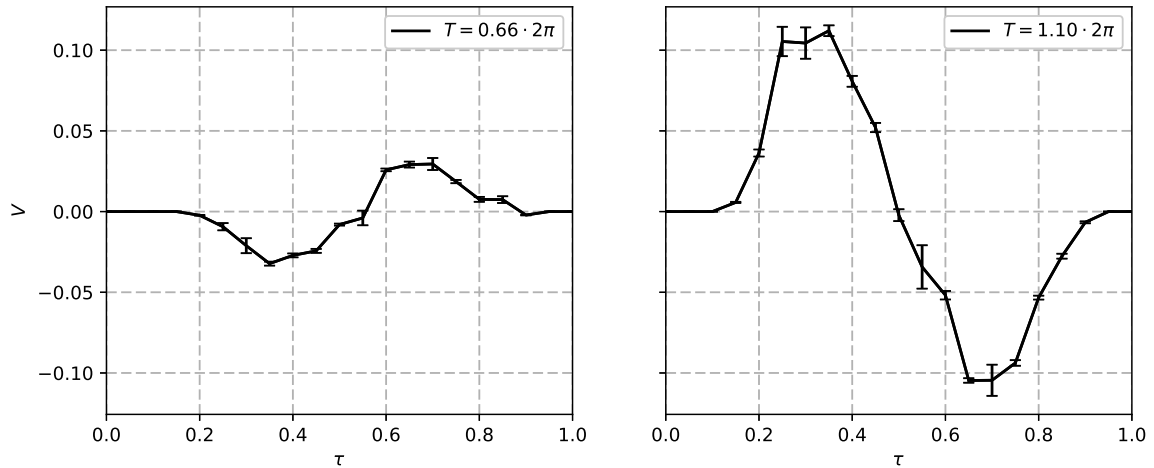


Рисунок 2.4 — Зависимости средней скорости робота от τ

Разница между абсолютными величинами максимальной и минимальной средней скорости при варьировании τ для каждого фиксированного T менее 20% (см. таблицу 2).

Таблица 2 — Экстремальные значения средней скорости

	$T = 0.66 \cdot 2\pi$	$T = 1.10 \cdot 2\pi$
V_{max}	0.032 ± 0.0008	0.104 ± 0.0009
V_{min}	-0.029 ± 0.0015	-0.112 ± 0.0023

Таким образом, движение в любом направлении без существенной потери средней скорости возможно при управлении только одним параметром τ при неизменном параметре T .

В рассматриваемой системе явление резонанса проявляется в виде смены знака средней скорости при монотонном изменении периода возбуждающей силы T . Это явление можно увидеть на графике зависимости средней скорости робота от периода T . С этой целью вторая часть эксперимента посвящена изучению влияния периода T на среднюю скорость робота при фиксированном τ . Для экспериментов выбраны $\tau = \tau_1 = 0.3$ и $\tau = \tau_2 = 0.7$ ($\tau_2 = 1 - \tau_1$). Кривые, представленные на рис. 2.5, демонстрирует существенную зависимость знака и величины средней скорости робота от параметра T . В случае кривой с $\tau = 0.3$, смена знака средней скорости происходит вблизи $T = 0.82 \cdot 2\pi$, тогда как для кривой с $\tau = 0.7$ смена знака средней скорости происходит вблизи $T = 0.77 \cdot 2\pi$. Таким образом, экспериментальные данные регистрируют резонансную смену знака средней скорости, что ранее предсказано математической моделью.

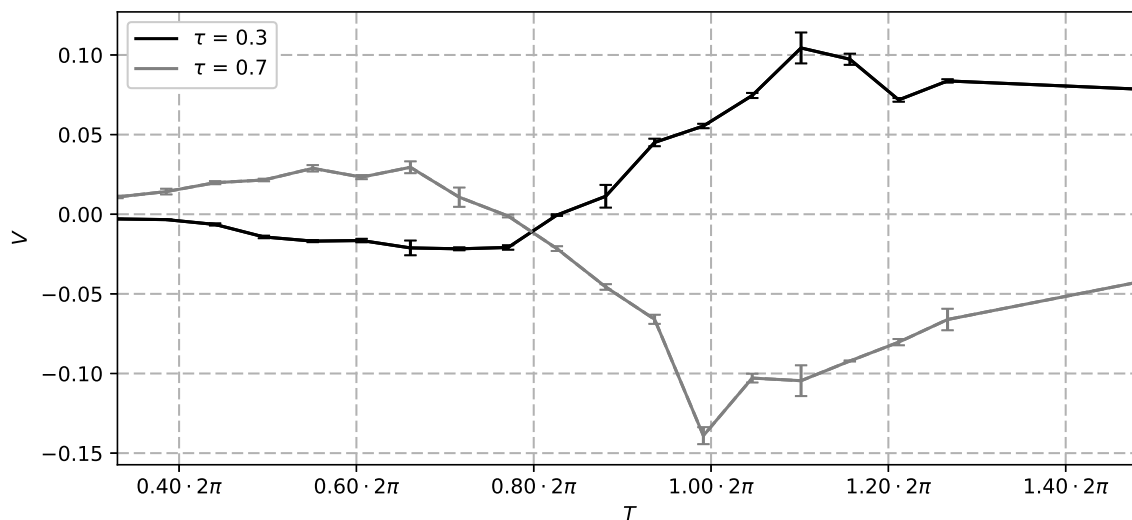


Рисунок 2.5 — Зависимости средней скорости работа от T

2.2 Сравнение результатов моделирования и эксперимента

2.2.1 Компьютерное моделирование динамики робота с параметрами, соответствующими экспериментальной установке

Для последующего анализа результатов экспериментов проведено математическое моделирование с параметрами экспериментального прототипа (таблица 1) аналогично моделированию, представленному в главе 1. В результате моделирования получены кривые, изображенные на рис. 2.6 и 2.7. При изменении параметров моделирования обнаруженные в главе 1 качественные явления сохранились. Величина и знак средней скорости робота выражают существенную зависимость от параметров возбуждения T и τ . На рис. 2.6 нули функции $V(\tau)$ отвечают значениям $\tau = 0$, $\tau = 0.5$ и $\tau = 1$. Наблюдается свойство центральной симметрии относительно точки $(0.5, 0)$ координатной плоскости τV . На рис. 2.7 проявляется резонансная смена знака средней скорости при монотонном изменении T . Таким образом, сохраняется возможность управления величиной и знаком средней скорости как по одному параметру T , так и по одному параметру τ .

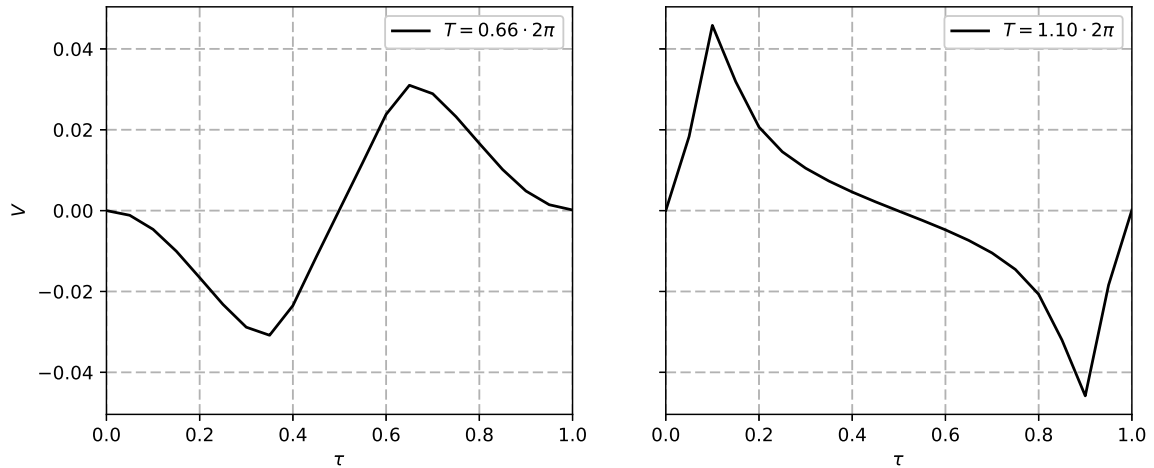


Рисунок 2.6 — Зависимости средней скорости робота от τ при фиксированном T

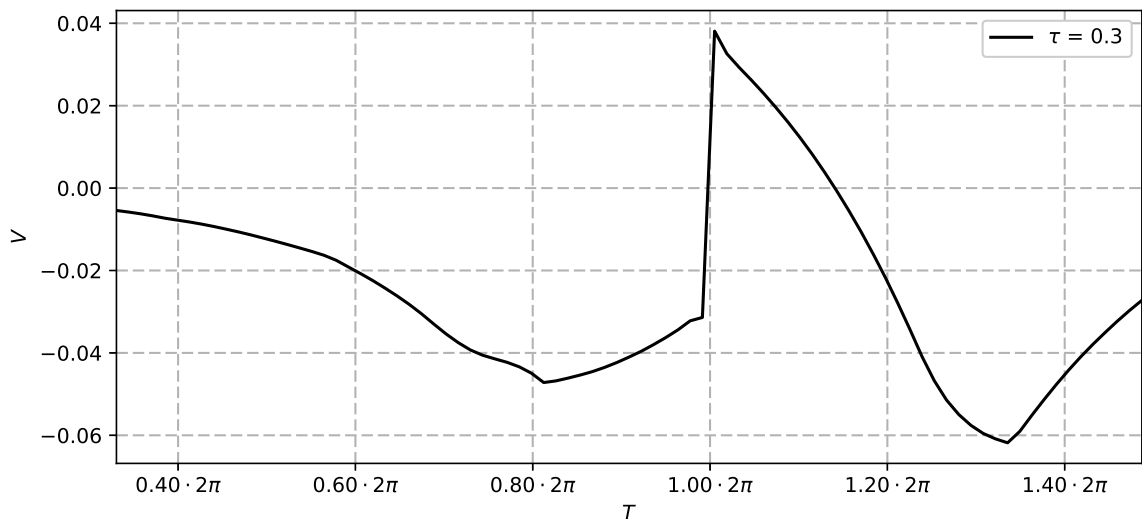


Рисунок 2.7 — Зависимость средней скорости робота от T при фиксированном τ

2.2.2 Свойство центральной симметрии

Для модельных данных свойство $V^{[\tau]} = -V^{[1-\tau]}$ выполняется для всех механических систем с уравнениями (1.3) с широтно-импульсным режимом возбуждения (1.7), 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 свой-

ство. В этом исследовании используется функция

$$V = f(\tau) = A \sin \left(\frac{\pi(\tau - \tau_c)}{\omega_s} \right), \quad (2.2)$$

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 $[0, 1]$.

Примем следующую модель для процесса измерения:

$$V(\tau) = f(\tau) + \xi, \quad (2.3)$$

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. Мы предполагаем, что случайная величина ξ распределена по закону Гаусса с нулевым математическим ожиданием.

Пусть $\{V\}$ обозначает множество значений V , полученных в результате n измерений: $\{V\} = (V_1, V_2, \dots, V_n)$. Значения τ для разных измерений могут как отличаться, так и совпадать. Целесообразно выбирать параметры функции $f(\tau)$ таким образом, чтобы максимизировать вероятность реализации данных измерений (принцип максимального правдоподобия). В нашем случае параметры A , τ_c и ω_s функции $f(\tau)$ определяются в результате минимизации суммы квадратов ошибок измерений, полученных в процессе последовательных серий экспериментов:

$$\sum_{i=1}^n \xi_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(V_i - f(\tau_i) \right)^2 \rightarrow \min_{A, \tau_c, \omega_s}, \quad (2.4)$$

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

Минимизация производилась с помощью алгоритма Левенберга—Марквардта [59; 60]. В вычислениях использовался 95% доверительный интервал [61]. Результаты приближения кривой (2.2) отображены на рис. 2.8; соответствующая статистическая информация представлена в таблице 3.

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.

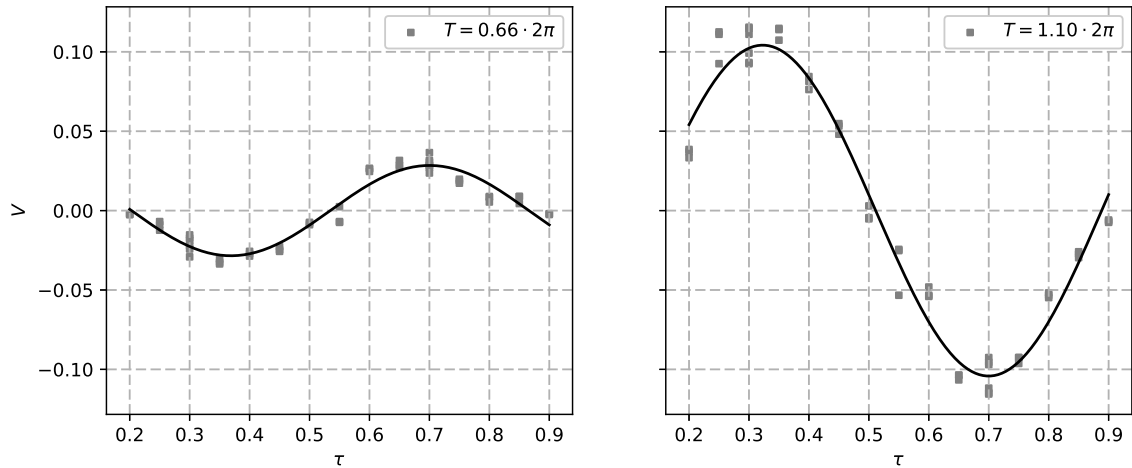
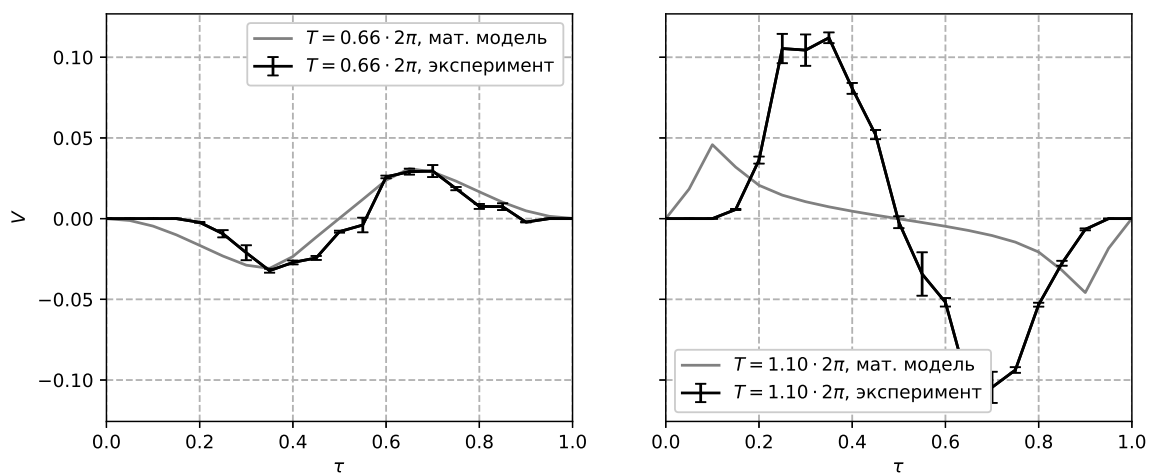


Рисунок 2.8 — Приближение с помощью кривых

Таблица 3 — Параметры приближения

	T	τ_c	ω_s	A
Величина	$0.66 \cdot 2\pi$	0.53453	0.33147	-0.02844
Стандартная ошибка	—	0.00735	0.00578	0.00113
Величина	$1.10 \cdot 2\pi$	0.51141	0.37698	0.10421
Стандартная ошибка	—	0.00334	0.00542	0.0025

2.2.3 Сравнение экспериментальных и модельных данных

Рисунок 2.9 — Зависимости средних скоростей работа от параметра τ

Сравнение модельных и экспериментальных данных представлено на рис. 2.9. 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 солениодом. Однако наблюдается хорошее качественное совпадение: нули соответствующих кривых лежат близко, а знаки полученных значений одинаковы для большинства значений τ . 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.

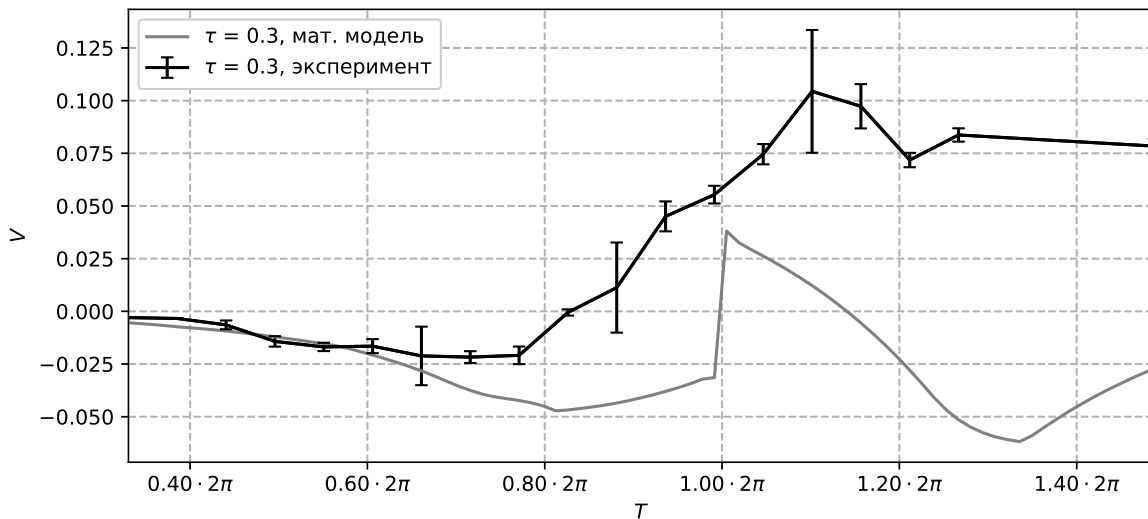


Рисунок 2.10 — Зависимости средних скоростей от параметра T

На рис. 2.10 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 параметра T можно через несоответствие профилей возбуждающей силы в математической модели и экспериментальной системе.

2.3 Выводы по главе 2

Представлено экспериментальное исследование движения электромеханического капсульного робота с периодическим управляющим напряжением. Закон возбуждения определяется двумя управляющими параметрами: периодом и коэффициентом заполнения. Экспериментальное исследование показывает, что направление и величина средней скорости робота существенно зависят от параметров управления. Также обнаружен резонансный характер смены направления средней скорости робота при монотонном увеличении периода возбуждающего сигнала. Зависимость средней скорости робота от параметра τ при фиксированном периоде обладает свойством $V^{[\tau]} = -V^{[1-\tau]}$, подразумевающим, что при коэффициентах заполнения τ и $\tau - 1$ робот двигается в разных направлениях, но с одинаковой по величине средней скоростью. Таким образом, любая средняя скорость из диапазона возможных средних скоростей робота может быть достигнута при варьировании одного параметра τ при T , соответствующем значению, при котором возможно достижение максимальной средней скорости робота. Эти результаты согласуются с результатами главы 1.

Глава 3. Модель с сосредоточенными параметрами термомеханического актюатора для миниатюрного шагающего робота

3.1 Термомеханические актюаторы, их расчетные модели и применения в робототехнике

Термомеханические актюаторы используют эффект теплового расширения для создания управляемой деформации. Наиболее распространенные схемы таких актюаторов приведены на рис. 3.1. Эффективность актюатора определим как прирост его деформации на единицу изменения температуры.

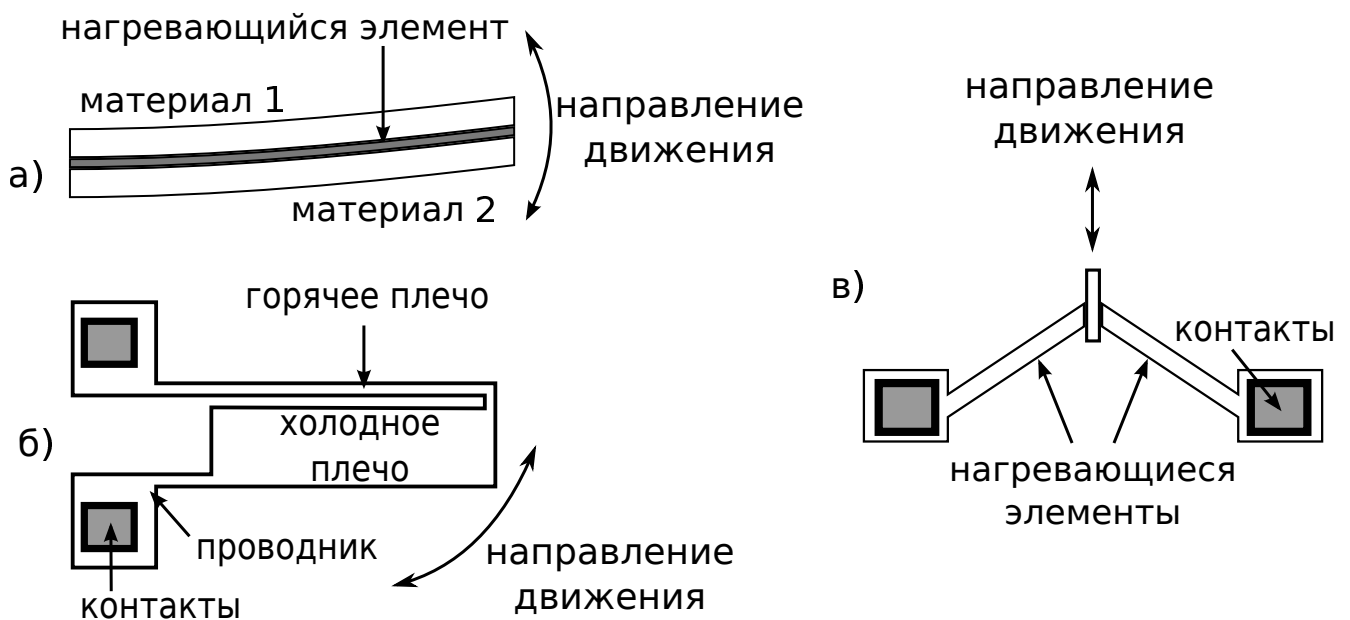


Рисунок 3.1 — Конструкции термомеханических актюаторов

Актюатор, изображенный на рис. 3.1а, основан на биморфном эффекте, возникающем при использовании материалов с отличающимися коэффициентами теплового расширения [62]. В [63] представлена конструкция и исследование шагающего робота на таких актюаторах. Каждая нога (рис. 3.2) состоит из двух актюаторов для управления ее движением. Представлено численное моделирование деформации ноги в программном обеспечении ANSYS методом конечных элементов, моделирование позволило определить возможные углы отклонения актюатора, необходимые энергозатраты и принцип управления. Получена оценка быстродействия ноги, что позволило оценить скорость ходьбы робота. Проведено экспериментальное исследование изготовленного прототипа шагающего робота.

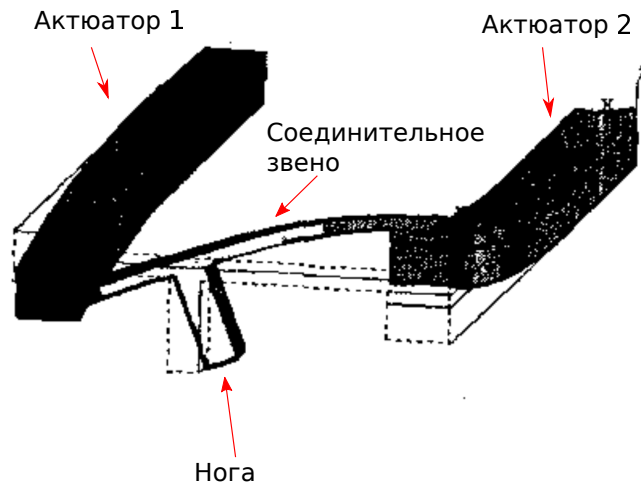


Рисунок 3.2 — Нога шагающего робота

На рис. 3.1б изображена конструкция балочного актюатора. Принцип действия балочного актюатора основан на различной тепловой деформации элементов актюатора за счет отличных электрических сопротивлений. (В англоязычной литературе элемент с меньшей температурой называют холодным плечом (cold arm), с большей - горячим плечом (hot arm).) Например, разницу в температурах можно обеспечить за счет отличающихся площадей поперечных сечений отдельных частей актюатора [64], тогда при подаче тока через актюатор, часть с большим поперечным сечением будет иметь меньшую температуру. Этот же принцип используется в работе [65], где представлено моделирование и анализ двунаправленного балочного актюатора (рис. 3.3). Актюатор имеет двухслойную структуру. В каждом слое находится один балочный актюатор, причем под горячим плечом актюатора из первого слоя находится холодное плечо актюатора из второго слоя, а под холодным плечом актюатора из первого слоя находится горячее плечо второго актюатора. Между слоями есть зазор для теплоизоляции, а концы актюаторов соединены. Каждый актюатор является элементом отдельной электрической цепи. При подаче напряжения на одну из цепей актюатор деформируется в определенном направлении, при подаче на другую цепь направление деформации будет противоположным. В исследовании предложена аналитическая модель актюатора. Проведено моделирование методом конечных элементов, а также экспериментальное исследование. Дано сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования. В [66] предложена конструкция микросхвата на балочных актюаторах (рис. 3.4), построена численная электро-тепло-механическая модель, сформированная в программном обеспечении COMSOL Multiphysics и моделируемая методом конечных элементов. На базе

полученной модели производится сравнение эффективности схвата в зависимости от используемого для актюаторов материала. Наибольшую эффективность продемонстрировал схват из меди.

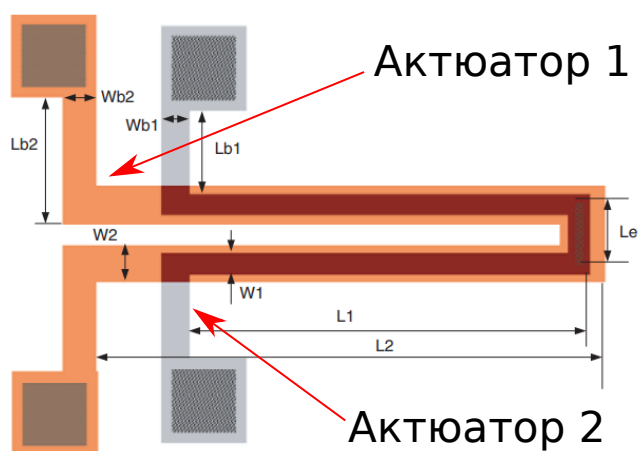


Рисунок 3.3 — Двуплечный балочный актюатор

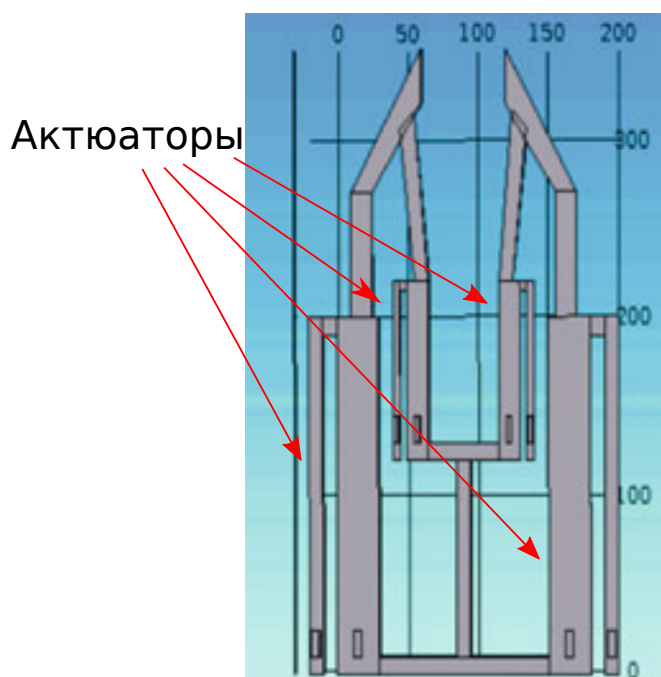


Рисунок 3.4 — Конструкция микросхвата

Актюатор на рис. 3.1в создает действующую силу за счет специального расположения нагревательных элементов, например, V-образное расположение [67]. В иностранной литературе их иногда называют тепловыми актюаторами типа шеврон (chevron-type thermal actuator). Такое название связано с возможностью увеличения действующей силы актюатора через добавление параллельных V-образных рядов. В статье [68] построена аналитическая модель актюатора типа шеврон, в которой V-образные элементы актюатора моделируются упругими

балками с прямоугольным сечением. На базе этой модели производится структурная оптимизация актюатора, находится угол между нагревательными элементами, при котором достигается максимальное перемещение центральной части актюатора после нагрева. В [69] исследуется стандартная модель кремниевого актюатора типа шеврон. Представлена аналитическая модель актюатора, в которой учитывается только линейное расширение V-образных лучей под действием температуры. Аналитическая модель выявила линейную зависимость величины перемещения рабочей точки актюатора от температуры. Проведено численное моделирование деформации актюатора методом конечных элементов. Проводится сравнение перемещения центральной части актюатора в зависимости от угла между V-образными балками актюатора. При уменьшении угла перемещение рабочей точки актюатора увеличивается, но также увеличивается механическое напряжение.

В работах [70—74] исследуются возможности использования термомеханических актюаторов в микроробототехнике. Одним из преимуществ использования подобных актюаторов в микроробототехнике является возможность сочетать двигатель и движитель в одном устройстве, что важно для миниатюризации.

В [75] предложена конструкция биморфного термомеханического актюатора с V-образными канавками. На кремниевой пластине вытравливаются V-образные канавки, которые потом заполняют полиимидом. Изменение температуры полиимида приводит к сгибанию или разгибанию актюатора, так как в верхней части V-образной канавки величина теплового расширения больше, чем в нижней части. Управление температурой производится при помощи поликремниевых резисторов, расположенных на поверхности актюатора. Представлена аналитическая модель для расчета термоупругих свойств отдельного элемента с V-образной выемкой. Исследование основных характеристик актюатора проводится с помощью численного моделирования в программном обеспечении FEMLAB методом конечных элементов, но в основном работа содержит натурные исследования. Актюатор показал работоспособность в статических и динамических режимах, характеристики не ухудшались в условиях сырости, постоянного изменения температуры и при более чем 200млн. циклах нагрузки. Продемонстрирована возможность построения шагающего микроробота и конвейера, у которых в качестве движителей используются термомеханические актюаторы.

В [76] исследуется подобный биморфный термомеханический актюатор с V-образным полиимидными вставками. Построена аналитическая тепловая

модель, описывающая процессы теплообмена внутри структуры актюатора. Получено выражение для нахождения отклонения от начального положения хвостовика актюатора при известном температурном распределении. В программном комплексе ANSYS построена твердотельная модель актюатора и моделируются электро-термо-деформационные процессы методом конечных элементов при различных возмущающих воздействиях. Исследуется влияние конструктивных параметров на характеристики актюатора. В патентах [77–79] предложено использовать актюатор с подобной конструкцией в космосе. В частности, их предлагают использовать для системы контроля температуры [80] на борту космического аппарата.

В настоящей работе исследуется разработанный ОАО «Российские космические системы» прототип термомеханического актюатора, основанный на биморфном эффекте. Увеличение эффективности в основном достигается экспериментально, при помощи изменения конструкции актюатора или физических свойств используемых материалов. Исследуемый актюатор имеет сложную геометрию слоев полиимида в кремниевых выемках, поэтому для аналитической оценки эффективности актюатора требуется производить сложные расчеты, учитывающие сложные термомеханические процессы. В [75; 76] кремниво-полиимидный актюатор моделируется системой дифференциальных уравнений в частных производных, которые решаются методом конечных элементов. Для моделирования динамики и управления движением робототехнической системы, использующей большое количество таких актюаторов, необходимо создание модели, которая не требует таких сложных расчетов. Создание аналитической модели, которая при относительно простых расчетах обеспечит надежное предсказание свойств микроактюатора, остается актуальной проблемой. В диссертационной работе строится и экспериментально исследуется упрощенная механическая модель актюатора, в которой упругие параметры выемок с полиимидом характеризуются средними значениями, найденными экспериментально, что позволяет существенно сократить сложность расчетов деформации актюатора.

3.2 Конструкция шагающего робота на термомеханических актюаторах

В статье [81] предложена концепция шагающего робота на кремниво-полиимидных термомеханических актюаторах с V-образными вставками. Конструкция подвижной части представлена на рис. 3.5. Предложенная концепция ноги предполагает наличие нескольких зон деформации. Актюаторы основной подвижной зоны будут использованы для перемещения робота вдоль плоскости, а актюаторы дополнительной подвижной зоны будут использоваться для управления движением хвостовика (стопы). Между зонами деформации размещены шарниры из гибких полимерных вставок в которых практически отсутствует механическое напряжение. Фиксирование стопы на поверхности предполагается осуществлять за счет адгезивного материала, нанесенного на стопу каждой ноги.

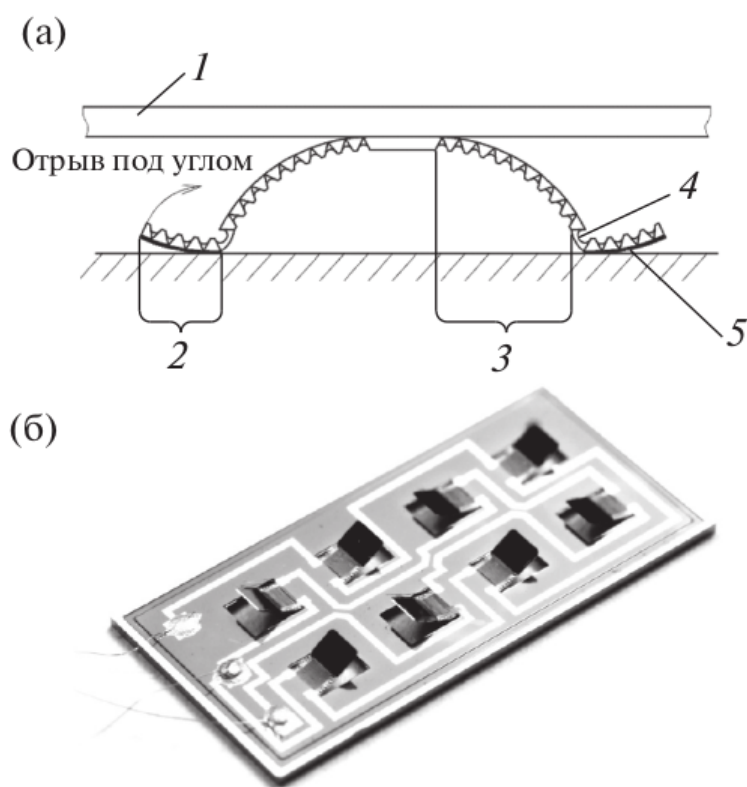


Рисунок 3.5 — Предложенная (а), спроектированная и реализованная (б) подвижная часть микроробота: 1 – основание с полезной нагрузкой; 2 – подвижная зона прилипания/отлипания; 3 – основная подвижная зона; 4 – гибкое сочленение; 5 – адгезив.

На рис. 3.6 представлен один цикл движения такого робота:

1. Робот зафиксирован на поверхности правыми стопами, остальные ноги и стопы

разогнуты.

2. Перемещение робота вправо. Правые стопы поддерживают сцепление с поверхностью, а за счет сгибания правых ног робот перемещается.
3. Подготовка к продолжению движения робота вправо. Чтобы закрепить левые стопы на поверхности, сгибаются левые ноги. Затем разгибаются левые стопы для закрепления на поверхности.
4. Освобождение правых ног за счет сгибания правых стоп.
5. Выпрямление правых ног.
6. Перемещение робота вправо. Левые стопы поддерживают сцепление с поверхностью, а за счет разгибания левых ног робот перемещается.
7. Возвращение в начальную конфигурацию. Правые стопы разгибаются, левые стопы сгибаются.

Повторение этого цикла обеспечивает перемещение робота на необходимое расстояние. Аналогичную схему можно реализовать для противоположного движения системы.

Габариты подвижной части составляют 15.5×7.5 мм при массе в 65.5 мг. Экспериментально установлено, что полезная нагрузка может достигать массы до 1.5 г (такая дополнительная масса на подвижной части робота не приводит к разрушению устройства). Для изготовления подвижной части микроробота использовались материалы, устойчивые к условиям космического пространства: полиимид, монокристаллический кремний, алюминий. Эти материалы позволяют использовать актюатор в открытом космосе, так как они обладают необходимой устойчивостью к действию плазмы, условиям микрогравитации и температурному диапазону от -196 до 400°C . В работе [82] представлена возможность использования такого актюатора в качестве датчиков обратной связи. Таким образом в конструкции робота термомеханические актюаторы будут выполнять одновременно роли движителей и датчиков измерения параметров движения робота.

В настоящей работе предлагается расчетная модель для актюаторов, входящих в состав такого робота.

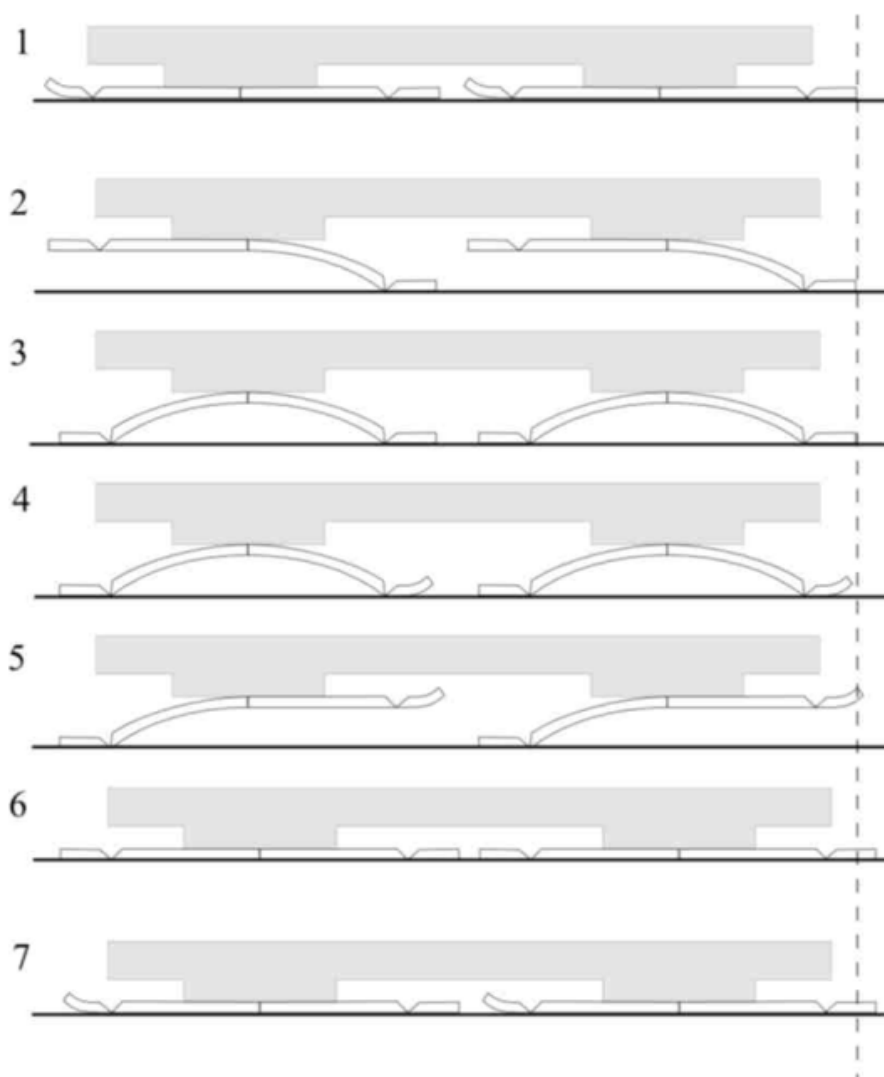


Рисунок 3.6 — Фазы движения робота

3.3 Принцип действия и конструкция термомеханического биморфного актюатора на основе кремния и полиимида

В данном исследовании рассматривается термомеханический биморфный актюатор, который состоит из кремниевой балки с V-образными выемками, заполненными полиимидом [77]. Фотография образца такого актюатора приведена на рис. 3.7. 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

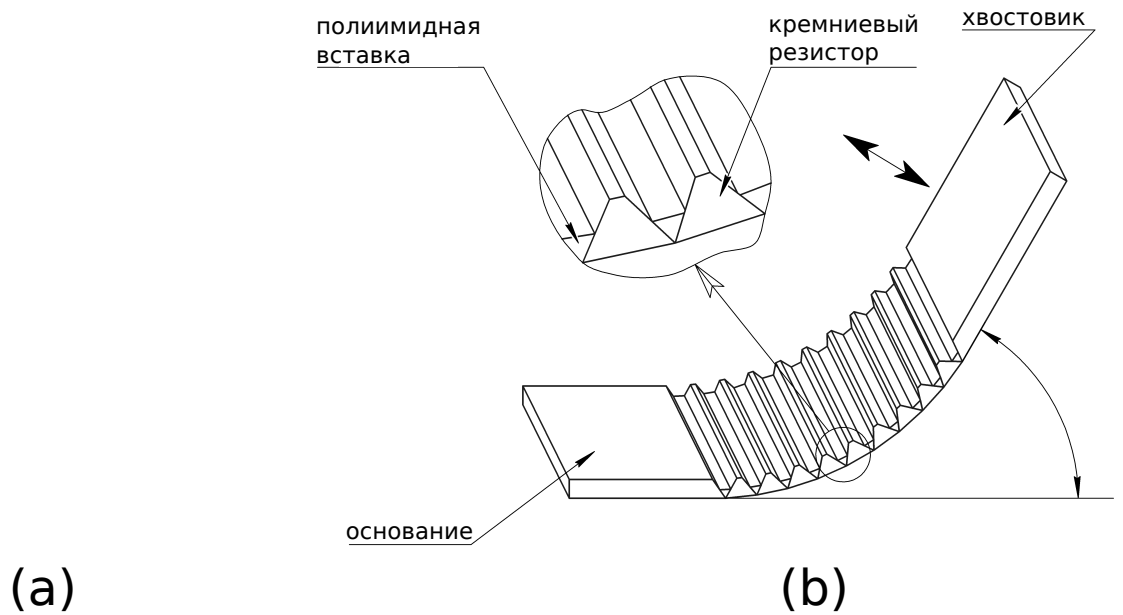


Рисунок 3.7 — Общий вид актюатора и его конструкция

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 подводимого тока. На обратной стороне актюатора проложены алюминиевые шины. В местах выемок с полиимидом помещены резистивные нагреватели, с помощью которых осуществляется нагрев полиимида.

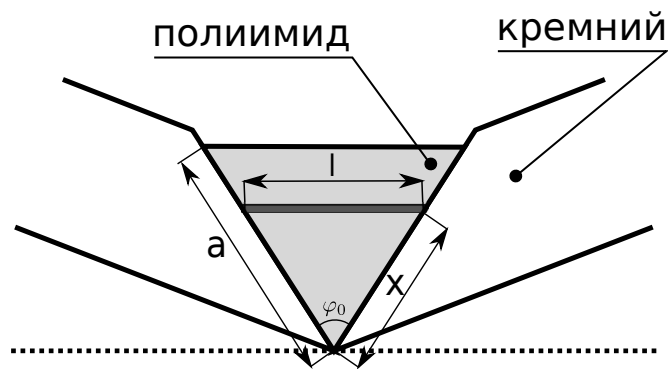


Рисунок 3.8 — Модель V-образной вставки

Модель одного V-образного элемента отображена на рис. 3.8. Оценим зависимость изменения угла раскрытия такого элемента как результат изменения температуры полиимида. Для этого разделим объем полиимида внутри выемки на тонкие прямоугольные пластины, плоскость которых перпендикулярна

биссектрисе угла раскрытия выемки. Тогда длины пластин вдоль плоскости, перпендикулярной биссектрисе определяются выражением

$$l = 2x \sin \frac{\varphi_0}{2}, \quad (3.1)$$

где l – длина пластины, пересекающей биссектрису угла раскрытия выемки на расстоянии x , измеренном вдоль грани V-образной выемки, а φ_0 – угол раскрытия выемки. Величина x изменяется от 0 до a , где a – это длина грани выемки. Длина каждой пластины зависит от температуры в соответствии с законом:

$$l(T_2) = l(T_1) (1 + \varepsilon_T(T_2 - T_1)), \quad (3.2)$$

где $l(T)$ это длина пластины при температуре T ; ε_T это температурный коэффициент линейного расширения, который считается постоянным; T_1 и T_2 это две произвольные величины температуры пластины. В соответствии с уравнением (3.1), угол раскрытия выемки также зависит от температуры:

$$l(T) = 2x \sin \frac{\varphi_0(T)}{2}, \quad (3.3)$$

Вычислим изменение угла раскрытия как результат изменения температуры полиимида с T_1 до T_2 . Из уравнений (3.2) и (3.3) получаем

$$l(T_1) = 2x \sin \frac{\varphi_0(T_1)}{2}, \quad (3.4)$$

$$l(T_2) = l(T_1) (1 + \varepsilon_T(T_2 - T_1)) = 2x \sin \frac{\varphi_0(T_2)}{2}. \quad (3.5)$$

Чтобы получить выражения для $l(T_1)$, подставляем (3.4) в выражение (3.5)

$$\sin \frac{\varphi_0(T_1)}{2} (1 + \varepsilon_T(T_2 - T_1)) = \sin \frac{\varphi_0(T_2)}{2}. \quad (3.6)$$

Естественно предположить, что угол раскрытия выемки φ_0 существенно меньше π при любой температуре. Тогда $\sin \varphi_0(T_2)/2 < 1$, а решение уравнения (3.6) для $\varphi_0(T_2)$ задается

$$\varphi_0(T_2) = 2 \arcsin \left[\sin \frac{\varphi_0(T_1)}{2} (1 + \varepsilon_T(T_2 - T_1)) \right]. \quad (3.7)$$

Поскольку относительное тепловое расширение мало, т.е.

$$|\varepsilon_T(T_2 - T_1)| \ll 1,$$

можно использовать линейную аппроксимацию выражения через разложение правой части выражения (3.7) в ряд Тейлора относительно параметра $\varepsilon_T(T_2 - T_1)$, сохраняя члены нулевого и первого порядков. Получается

$$\varphi_0(T_2) = \varphi_0(T_1) + 2\varepsilon_T(T_2 - T_1)\tan\frac{\varphi_0(T_1)}{2}. \quad (3.8)$$

3.4 Шарнирный многозвенник как расчетная модель термомеханического актюатора

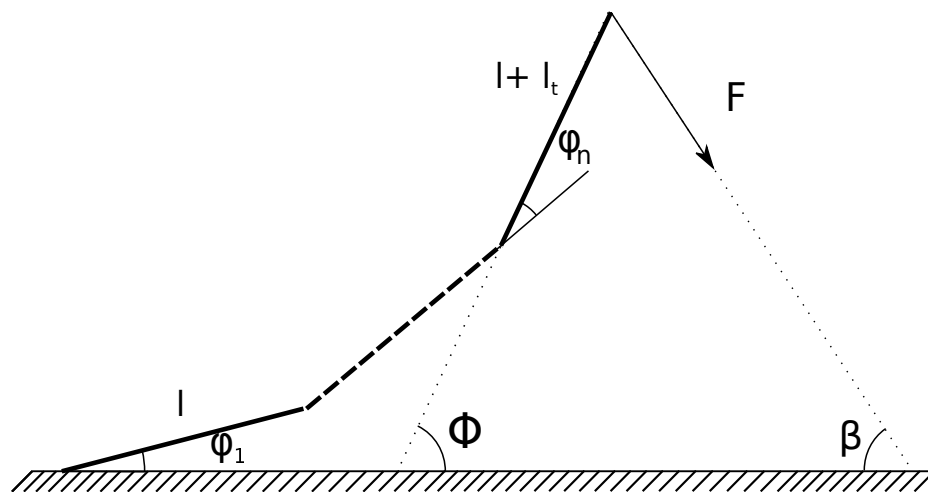


Рисунок 3.9 — Модель актюатора в виде шарнирного многозвенника

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, состоящими из кремния. Шарниры соответствуют сгибающимся частям актюатора, содержащими полиимид. Исследуем статическую деформацию актюатора под действием сосредоточенной силы, приложенной к концу хвостовика актюатора.

Введем 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. 3.9.

Для записи уравнений равновесия, описанной механической системы, в качестве обобщенных координат взяты углы φ_i . Тогда обобщенные силы Q_i определяются выражениями

$$Q_i = \begin{bmatrix} F \cos(\beta) \\ -F \sin(\beta) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -l \sum_{j=i}^n \sin \left(\sum_{k=1}^j \varphi_k \right) - l_t \sin \sum_{k=1}^n \varphi_k \\ l \sum_{j=i}^n \cos \left(\sum_{k=1}^j \varphi_k \right) + l_t \cos \sum_{k=1}^n \varphi_k \end{bmatrix} - C(\varphi_i - \varphi_0). \quad (3.9)$$

Если система находится в положении равновесия, то все обобщенные силы равны нулю. Используя выражение (3.9), получим условия равновесия

$$\begin{aligned} & F \cos \beta \left[l \sum_{j=i}^n \sin \left(\sum_{k=1}^j \varphi_k \right) + l_t \sin \sum_{k=1}^n \varphi_k \right] + \\ & F \sin \beta \left[l \sum_{j=i}^n \cos \left(\sum_{k=1}^j \varphi_k \right) + l_t \cos \sum_{k=1}^n \varphi_k \right] + \\ & C(\varphi_i - \varphi_0) = 0, \quad i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (3.10)$$

которые выражают тот факт, что момент сосредоточенной силы компенсируется упругими моментами в шарнирах актюатора. Полученная система уравнений (3.10) позволяет определять конфигурацию актюатора при заданных параметрах F , l , l_t , n , β , C и φ_0 .

3.5 Экспериментальное исследование

Деформируемые элементы реального актюатора, состоящие из V-образной канавки с полиимидом, представляют собой сложные термомеханические системы с распределенными параметрами, тогда как предложенная модель описывает упругие характеристики в терминах сосредоточенной упругости шарниров многозвенника. Для использования этой модели требуется вычислить крутильную жесткость шарниров C и провести верификацию полученной модели. Для решения этих задач был проведен эксперимент.

Два соседних элемента актюатора схематически изображены на рис. 3.10, в таблице 4 приведены его размеры.

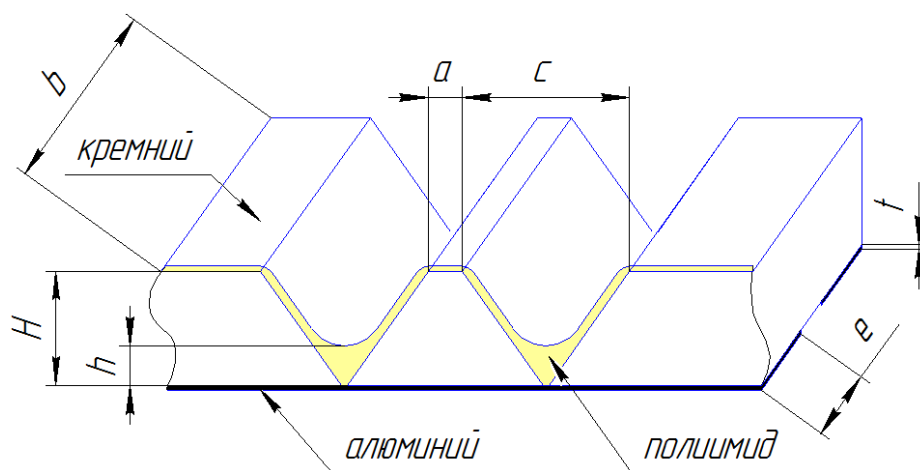


Рисунок 3.10 — Схема актюатора

Таблица 4 — Размеры актюатора

H	h	b	a	c	e
180мкм	~30–40мкм	5850мкм	50мкм	250мкм	1000мкм

3.5.1 Методика измерений

Разработана методика измерения деформаций и усилий, возникающих на хвостовике термомеханического актюатора. Особенностью методики, отличающей её от существующих [83; 84], является возможность задания усилий в

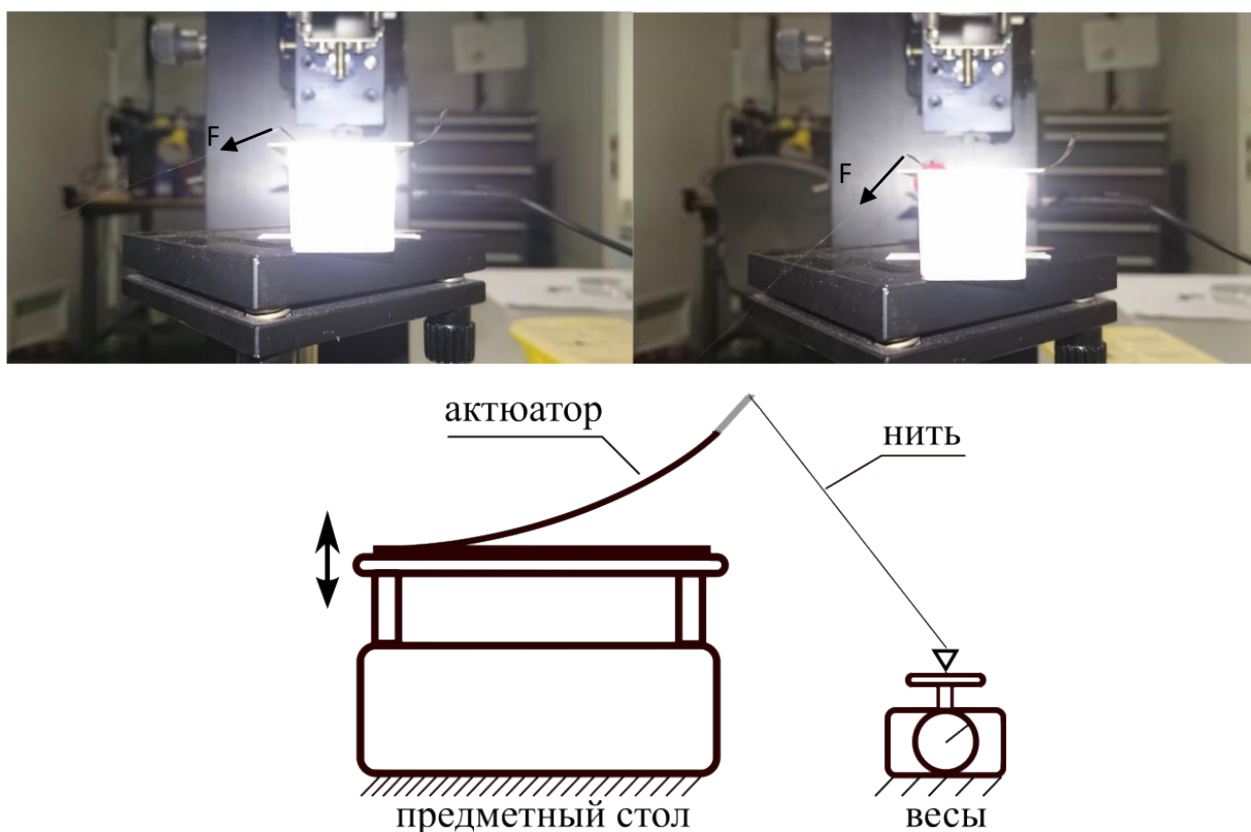


Рисунок 3.11 — Вид и схема измерительного стенда по определению деформационно-силового воздействия на актюаторные элементы

различных направлениях относительно плоскости основания, на котором расположен актюатор.

При своем функционировании актюатор прилагает своим хвостовиком силу к объекту контакта или манипулирования. Эта сила возникает вследствие сопротивления актюатора его деформации при взаимодействии с объектом. Поэтому важной функциональной характеристикой актюатора является зависимость его деформации от силы, приложенной к хвостовику, при этом важны как величина силы, так и направление ее действия. В данной работе рассматривается статическая характеристика, то есть измерения производятся в состоянии равновесия. В этом случае конфигурацию актюатора можно характеризовать углом наклона хвостовика к поверхности основания (предметного столика), на котором актюатор закреплен способом жесткой заделки. Предлагаемая методика эксперимента позволяет одновременно измерять угол наклона хвостовика актюатора, величину силы, приложенную к хвостовику, и наклон линии действия этой силы по отношению к основанию. Определение конфигурации деформированного термоактюатора происходит на основе анализа его видеоизображения.

Для проведения измерений выбрана лабораторная видеокамера из состава гониометрической установки CAM101 фирмы KSV Ltd. Instruments. Программное обеспечение, входящее в комплект этой установки, позволяет измерять углы поворота хвостовика в динамике, в том числе под внешней нагрузкой. Схема установки представлена на рис. 3.11. Установка состоит из перемещающегося столика с расположенным на нём образцом актюатора. Столик позволяет перемещать образец в поле зрения видеокамеры. Образец на столике располагают таким образом, чтобы в поле зрения видеокамеры попал его профиль. За образцом находится яркий светодиод, который предназначен для увеличения контраста образца на фотоизображении при проведении измерений.

Кинематически образец соединён гибким элементом с лабораторными весами Vibra HTR-220CE, которые применяют в химических лабораториях и на производстве для высокоточного взвешивания предметов небольшой массы (до 220 г). Гибкий элемент представляет собой «нерастяжимую» нить, один конец которой закреплен на хвостовике актюатора, а другой – на чаше весов. Весы и образец располагают друг относительно друга таким образом, чтобы угол между нитью и плоскостью стола соответствовал требуемому направлению приложения нагрузки. При изменении положения весов в пространстве нагрузка будет прилагаться не только по нормали к плоскости основания, но и под любым требуемым углом в диапазоне от 0 до 60 градусов. Угол приложения нагрузки определяется с помощью предварительно сделанного фотоснимка.

При проведении измерений образец, попадая в поле зрения видеокамеры, в режиме реального времени отображается на экране монитора, после чего с помощью программного обеспечения происходит автоматическое фотографирование и измерение деформации актюатора. При перемещении образца в вертикальном направлении нить натягивается и передает усилие на чашу весов. Сопоставлением измеренных усилий и углов отклонения актюатора были получены зависимости угла отклонения хвостовика актюатора от величины силы, приложенной к хвостовику. Точность проводимых измерений обуславливается точностью измерительных средств – гониометра ($\pm 0,1$ град.) и высокоточных весов ($\pm 0,3$ мг). Диапазон измеряемых нагрузок составляет от 0,1 мН до 2,15 Н.

Таким образом, 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 3.12. Обозна-

чим через Φ_0 угол между хвостовиком актюатора и предметным столом при ненагруженном актюаторе, тогда параметры используемого образца в терминах математической модели (3.10) приведены в таблице 5. Параметры определены с учетом конструкции актюатора из таблицы 4.

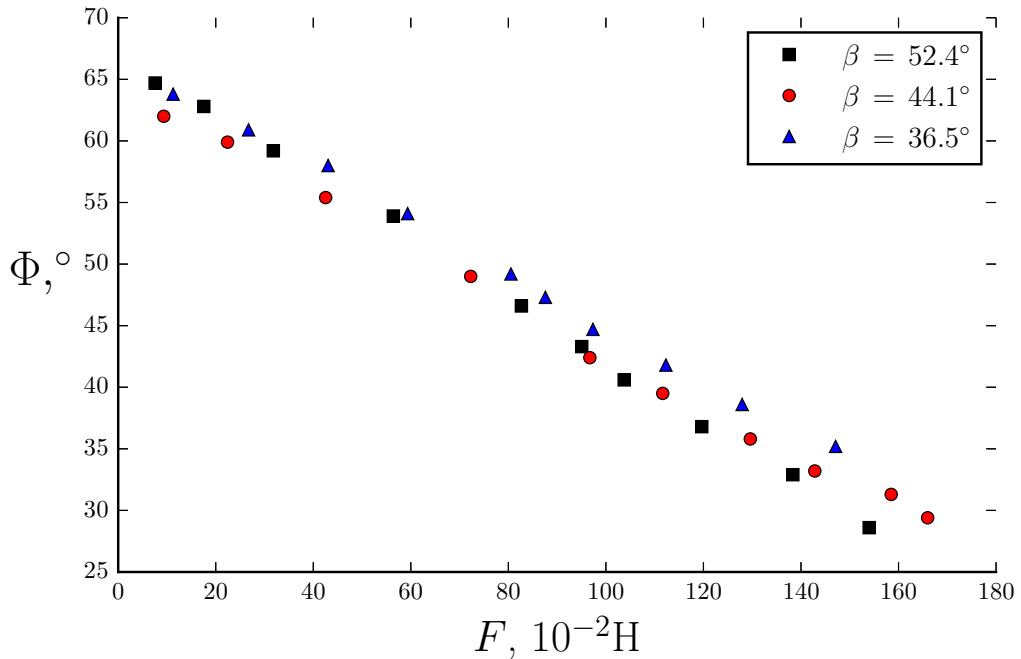


Рисунок 3.12 — Экспериментальные данные

Таблица 5 — Параметры актюатора.

n	$l = a + c$	l_t	$L = nl + l_t$	Φ_0	$\varphi_0 = \Phi_0/n$
33	0.03см	0.30см	1.29см	65°	1.97°

3.5.2 Идентификация параметров расчетной модели

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 $\varphi^{C,k}$ – решения системы уравнений (3.10), найденные 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:

$$\Psi = \sum_k (\Phi_k - \Phi^{C,k})^2 \rightarrow \min_C, \quad (3.11)$$

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 (3.10) найдено с помощью функции *fsolve* из библиотеки *scipy.optimize* языка программирования *python*. Сумма квадратов (3.11) минимизирована с помощью функции *brent* той же библиотеки. В результате найдено значение $C = 0.57 \text{ Нм/рад}$.

3.5.3 Верификация модели

Верификация модели проведена на наборах экспериментальных данных с $\beta = 36.5^\circ$. Для этого найдены значения углов $\Phi^{C,k}$ из системы уравнений (3.10), 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. 3.13.

Для оценки качества модели вычислены среднеквадратичная ошибка и относительные ошибки между экспериментальными и модельными данными. Квадратный корень из среднеквадратичной ошибки определен по формуле

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_k (\Phi_k - \Phi^{C,k})^2} = 1.22^\circ. \quad (3.12)$$

Относительная ошибка для k -ого набора данных была определена по формуле

$$RE_k = \frac{|\Phi_k - \Phi^{C,k}|}{\Phi_k}. \quad (3.13)$$

Найденные $RE_k < 3.7\%$ для всех k .

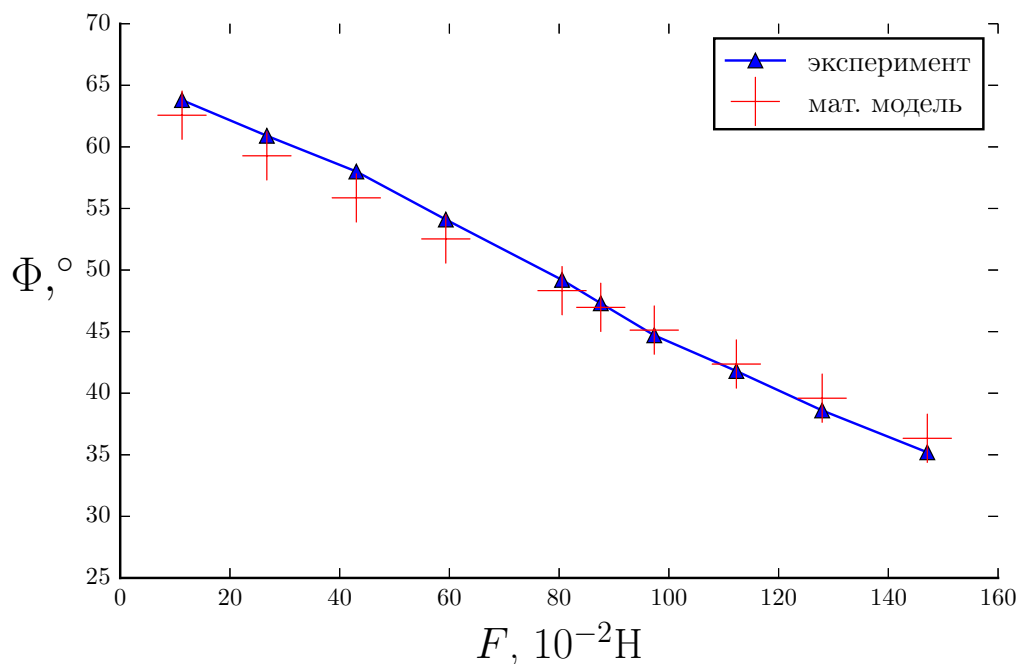


Рисунок 3.13 — Верификация модели

3.6 Выводы по главе 3

Построена математическая модель термомеханического актюатора в виде шарнирного многосвязника. Вычислен параметр крутильной жесткости одного шарнира актюатора. Проведена верификация построенной модели на экспериментальных данных. В дальнейших работах предполагается использовать полученную модель и коэффициент крутильной жесткости при моделировании динамики и управления движением космического робота, который будет использовать в качестве движителей 8 термомеханических актюаторов.

Заключение

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. Установлено, что для увеличения диапазона возможных скоростей робота масса корпуса робота составляет 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. Подтверждена существенная зависимость средней скорости движения робота от параметров возбуждающего сигнала. 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, сопровождающееся сменой 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.

Список литературы

1. Болотник, Н. Н. Капсульный вибрационный робот с электромагнитным приводом и возвратной пружиной: динамика и управление движением / Н. Н. Болотник, А. М. Нунупаров, В. Г. Чащухин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2016. — № 6. — С. 146—160.
2. Bolotnik, N. Dynamics and Control of Motion of a Capsule Robot with an Opposing Spring / N. Bolotnik, A. Nunuparov, V. Chashchukhin // 2016 International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference). — 2016. — P. 1—4.
3. Static modelling of a thermomechanical actuator for a walking microrobot / I. Bogoslavsky [et al.] // 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 / А. М. Нунупаров // 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 / А. М. Нунупаров // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ, Физтех-школа аэрокосмических технологий. — 2018. — С. 174—175.
6. Capsubot with an Opposing Spring: Simulation and Experiments / A. Nunuparov [et al.] // MATHMOD 2018 Extended Abstract Volume. — 2018. — P. 71—72.
7. Vibration-Driven Capsubot with an Opposing Spring: An Experimental Study / A. Nunuparov [et al.] // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. — Cham : Springer International Publishing, 2019. — P. 126—133.
8. Thermomechanical Actuator for Micro-robotic Systems: A Model and Parameter Estimation / N. Bolotnik [et al.] // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. — Cham : Springer International Publishing, 2019. — P. 340—346.
9. Dynamics and motion control of a capsule robot with an opposing spring / A. Nunuparov [и др.] // Archive of Applied Mechanics. — 2019. — Июнь. — URL: <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01571-8>.

10. *Bogue, R.* Miniature and microrobots: a review of recent developments. / R. Bogue // *Ind Robot.* — 2015. — Т. 42, № 2. — С. 98—102.
11. *Diller, E.* Micro-scale mobile robotics. / E. Diller, M. Sitti // *Found Trends Robot.* — 2013. — Т. 2, № 3. — С. 143—259.
12. *Sahu, B.* Emerging challenges of microactuators for nanoscale positioning, assembly, and manipulation. / B. Sahu, C. Taylor, K. Leang // *J Manuf Sci Eng.* — 2010. — Т. 132, № 3. — С. 030917-030917—16.
13. Robotics in the small. / J. J. Abbott [и др.] // *IEEE Robot Autom Mag.* — 2007. — Т. 14, № 2. — С. 92—103.
14. Biomedical Applications of Untethered Mobile Milli/Microrobots. / M. Sitti [и др.] // *Proceedings of the IEEE.* — 2015. — Т. 103, № 2. — С. 205—224.
15. Locomotion Principles for Microrobots Based on Vibrations. / F. Becker [и др.] // *Microactuators and Micromechanisms.* — Cham : Springer International Publishing, 2017. — С. 91—102.
16. *Zimmermann, K.* Mechanics of Terrestrial Locomotion with a Focus on Nonpedal Motion Systems. / K. Zimmermann, I. Zeidis, C. Behn. — Springer-Verlag, 2009.
17. *Блехман, И. И.* Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. — Наука, 1964.
18. *Блехман, И. И.* Вибрационная механика / И. И. Блехман. — Физматлит, 1994.
19. *Нагаев, Р. Ф.* Вибрационное перемещение в среде с квадратичным сопротивлением движению / Р. Ф. Нагаев, Е. А. Тамм // *Машиноведение.* — 1980. — № 4. — С. 3—8.
20. *Герасимов, С. А.* Автомодельность вибрационного перемещения в среде с сопротивлением / С. А. Герасимов // *Прикладная механика и техническая физика.* — 2002. — Т. 43, № 1. — С. 108—111.
21. *Герасимов, С. А.* О вибрационном перемещении в поле силы тяжести / С. А. Герасимов // *Прикладная механика и техническая физика.* — 2003. — Т. 44, № 6. — С. 44—48.
22. An amphibious vibration-driven microrobot with a piezoelectric actuator. / F. Becker [и др.] // *Regul Chaotic Dyn.* — 2013. — Т. 18, № 1/2. — С. 63—74.

23. Locomotion Study of a Standing Wave Driven Piezoelectric Miniature Robot for Bi-Directional Motion. / H. N. Hariri [и др.] // IEEE T Robot. — 2017. — Т. 33, № 3. — С. 742—747.
24. Rios, S. A. Miniature Resonant Ambulatory Robot. / S. A. Rios, A. J. Fleming, Y. K. Yong // IEEE Robot Autom Letters. — 2017. — Т. 2, № 1. — С. 337—343.
25. Черноусько, Ф. Л. О движении тела, содержащего подвижную внутреннюю массу / Ф. Л. Черноусько // Доклады Академии Наук. — 2005. — Т. 405, № 1. — С. 56—60.
26. Черноусько, Ф. Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. — 2006. — Т. 70, № 6. — С. 819—842.
27. Черноусько, Ф. Л. Оптимальные периодические движения двухмассовой системы в сопротивляющейся среде / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. — 2008. — Т. 72, № 2. — С. 116—125.
28. Fang, H. B. Dynamic analysis and optimization of a three-phase control mode of a mobile system with an internal mass. / H. B. Fang, J. Xu // Journal of Vibration and Control. — 2011. — Т. 74, № 4. — С. 443—451.
29. Фигурина, Т. Ю. Оптимальное управление движением системы двух тел по прямой / Т. Ю. Фигурина // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2007. — № 2. — С. 65—71.
30. Болотник, Н. Н. Оптимальное управление прямолинейным движением твердого тела по шероховатой плоскости посредством перемещения двух внутренних масс / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигурина // Прикладная математика и механика. — 2008. — Т. 72, № 2. — С. 216—229.
31. Болотник, Н. Н. Оптимальное управление прямолинейным движением системы двух тел в сопротивляющейся среде / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигурина, Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. — 2012. — Т. 76, № 1. — С. 3—22.
32. Егоров, А. Г. Оптимальное по энергетическим затратам движение виброробота в среде с сопротивлением / А. Г. Егоров, О. С. Захарова // Прикладная математика и механика. — 2010. — Т. 74, № 4. — С. 620—632.

33. *Егоров, А. Г.* Энергетически оптимальное движение виброробота в среде с наследственным законом сопротивления / А. Г. Егоров, О. С. Захарова // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2015. — № 3. — С. 168—176.
34. *Li, H.* Motion Generation of the Capsbot Using Internal Force and Static Friction / H. Li, K. Furuta, F. L. Chernousko // Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. — 12.2006. — С. 6575—6580.
35. *Farahani, A. A.* Optimal controller design of legless piezo capsbot movement. / A. A. Farahani, A. A. Suratgar, H. A. Talebi // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2013. — Т. 10, № 2. — С. 126.
36. *Huda, M. N.* Self-contained capsbot propulsion mechanism. / M. N. Huda, H. Yu, S. O. Wane // International Journal of Automation and Computing. — 2011. — Т. 8, № 3. — С. 348—356.
37. *Huda, M. N.* Trajectory tracking control of an underactuated capsbot / M. N. Huda, H. Yu // Autonomous Robots. — 2015. — Авг. — Т. 39, № 2. — С. 183—198.
38. *Liu, Y.* Analysis and Control of a Capsbot / Y. Liu, H. Yu, T. Yang // IFAC Proceedings Volumes. — 2008. — Т. 41, № 2. — С. 756—761. — 17th IFAC World Congress.
39. *Yu, H.* A novel acceleration profile for the motion control of capsbots / H. Yu, M. Nazmul Huda, Samuel Oliver Wane // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 05.2011. — С. 2437—2442.
40. *Чащухин, В. Г.* Моделирование динамики и определение управляющих параметров внутритрубного миниробота / В. Г. Чащухин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2008. — № 5. — С. 142—147.
41. *Механика миниатюрных роботов / В. Г. Градецкий [и др.]. — Наука, 2010.*
42. *Sun, L.* Study on Micro Robot in Small Pipe. / L. Sun, P. Sun, X. Qin // Proc. of International Conference on Control'98, Swansea. — 09.1998. — С. 1212—1217.
43. *Vibro-impact responses of a capsule systems with various friction models. / Y. Liu [и др.] // Int. J. Mech. Sci. — 2013. — Т. 72. — С. 39—54.*
44. *Forward and backward motion control of a vibro-impact capsule system. / Y. Liu [и др.] // Int. J. Mech. Sci. — 2013. — Т. 74. — С. 2—11.*

45. Modelling of a vibro-impact capsule system. / Y. Liu [и др.] // *Int. J. Non-Linear Mech.* — 2015. — Т. 70. — С. 30—46.
46. Liu, Y. Experimental verification of the vibro-impact capsule model. / Y. Liu, E. Pavlovskaya, M. Wiercigroch // *Nonlinear Dyn.* — 2016. — Т. 83. — С. 1029—1041.
47. Optimization of the vibro-impact capsule system. / Y. Liu [и др.] // *J. Mech. Eng.* — 2016. — Т. 62. — С. 430—439.
48. Yan, Y. A comparative study of the vibro-impact capsule systems with one-sided and two-sided constraints. / Y. Yan, Y. Liu, M. Liao // *Nonlinear Dyn.* — 2015. — Т. 89. — С. 1063—1087.
49. A self-propelled robotic system with a visco-elastic joint: dynamics and motion analysis / P. Liu [и др.] // *Engineering with Computers.* — 2019. — Февр. — . <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00722-3>.
50. Huda, M. N. Modelling and Motion Control of a Novel Double Parallel Mass Capsubot / M. N. Huda, H. Yu // *IFAC Proceedings Volumes.* — 2011. — Т. 44, № 1. — С. 8120—8125. — 18th IFAC World Congress.
51. Huda, M. N. Experimental study of a capsobot for two dimensional movements / M. N. Huda, H. Yu, M. J. Goodwin // *Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control.* — 09.2012. — С. 108—113.
52. Huda, M. N. Behaviour-based control approach for the trajectory tracking of an underactuated planar capsule robot / M. N. Huda, H. Yu, S. Cang // *IET Control Theory Applications.* — 2015. — Т. 9, № 2. — С. 163—175.
53. Сахаров, А. В. Поворот тела с двумя подвижными внутренними массами на шероховатой плоскости / А. В. Сахаров // *Прикладная математика и механика.* — 2015. — Т. 79, № 2. — С. 196—209.
54. Zhan, X. A vibration-driven planar locomotion robot—Shell / X. Zhan, J. Xu, H. Fang // *Robotica.* — 2018. — Т. 36, № 9. — С. 1402—1420.
55. Zhan, X. Planar locomotion of a vibration-driven system with two internal masses / X. Zhan, J. Xu, H. Fang // *Applied Mathematical Modelling.* — 2016. — Т. 40, № 2. — С. 871—885.

56. Черноусько, Ф. Л. Движение тела по плоскости под влиянием подвижных внутренних масс / Ф. Л. Черноусько // Доклады Академии Наук. — 2016. — № 4. — С. 406—410.
57. Иванов, А. П. Динамика твердого тела с подвижными внутренними массами и ротором на шероховатой плоскости / А. П. Иванов, А. В. Сахаров // Нелинейная Динамика. — 2012. — Т. 8, № 4. — С. 763—772.
58. Chernousko, F. L. Two-Dimensional Motions of a Robot Under the Influence of Movable Internal Masses / F. L. Chernousko // Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines: Contributions from the 3rd International Workshop, Perm, Russia / под ред. V. P. Matveenko [и др.]. — Cham : Springer International Publishing, 2019. — С. 49—56.
59. Levenberg, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares / K. Levenberg // Q. Appl. Math. — 1944. — Т. 2, № 2. — С. 164—168.
60. Marquardt, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D. W. Marquardt // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. — 1963. — Т. 11, № 2. — С. 431—441.
61. Rao, C. R. Linear Statistical Inference and Its Applications / C. R. Rao. — Wiley-Interscience, 1965.
62. Phinney, L. Thermal Microactuators / L. Phinney, J. Serrano, M. Baker // Microelectromechanical Systems and Devices / под ред. N. Islam. — Rijeka : InTech, 2012. — Гл. 16.
63. Bonvilain, A. Microfabricated thermally actuated microrobot / A. Bonvilain, N. Chaillet // 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422). Т. 3. — 09.2003. — 2960—2965 vol.3.
64. Huang, Q.-A. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator / Q.-A. Huang, N. K. S. Lee // Journal of Micromechanics and Microengineering. — 1999. — Т. 9, № 1. — С. 64.
65. Yan, D. Design and modeling of a MEMS bidirectional vertical thermal actuator / D. Yan, A. Khajepour, R. Mansour // Journal of Micromechanics and Microengineering. — 2004. — Т. 14, № 7. — С. 841.

66. Investigation of Microgripper Using Thermal Actuator / N. Chatteraj [и др.] // Proceedings of the International Conference on Microelectronics, Computing & Communication Systems / под ред. V. Nath. — Singapore : Springer Singapore, 2018. — С. 259—269.
67. *Maloney, J. M.* Large-force electrothermal linear micromotors / J. M. Maloney, D. S. Schreiber, D. L. DeVoe // Journal of Micromechanics and Microengineering. — 2004. — Т. 14, № 2. — С. 226.
68. Modeling and Optimization of MEMS Thermal Actuator / H. Shi [и др.] // Proceedings of The 30th Annual Meeting of The American Society for Precision Engineering. — 2015. — С. 526—531.
69. *Joshi, A. S.* Analysis of a Chevron Beam Thermal Actuator / A. S. Joshi, H. Mohammed, S. M. Kulkarni // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Февр. — Т. 310. — С. 012123. — URL: <https://doi.org/10.1088%2F1757-899x%2F310%2F1%2F012123>.
70. Organic thermal and electrostatic ciliary microactuator array for object manipulation / J. W. Suh [и др.] // Sensors and Actuators A: Physical. — 1997. — Т. 58, № 1. — С. 51—60. — Micromechanics Sections of Sensors and Actuators.
71. Prototype microrobots for micro positioning in a manufacturing process and micro unmanned vehicles / P. E. Kiaditis [и др.] // Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.99CH36291). — 01.1999. — С. 570—575.
72. A robust micro conveyer realized by arrayed polyimide joint actuators / T. Ebefors [и др.] // Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.99CH36291). — 01.1999. — С. 576—581.
73. *Baglio, S.* Technologies and Architectures for Autonomous MEMS Microrobots / S. Baglio, S. Castorina, N. Savalli // Scaling Issues and Design of MEMS. — Wiley-Blackwell, 2008. — Гл. 7. С. 169—178.
74. Thermally Actuated Omnidirectional Walking Microrobot / E. Y. Erdem [и др.] // Journal of Microelectromechanical Systems. — 2010. — ИЮНЬ. — Т. 19, № 3. — С. 433—442.

75. *Ebefors, T.* “Polyimide V-Groove Joints for Three – Dimensional Silicon Transducers – Exemplified Through a 3-D Turbulent Gas Flow Sensor and Micro-robotic Devices : PhD dissertation / Ebefors T. — Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
76. *Козлов, Д. В.* Термомеханические актюаторы для систем микроперемещений в условиях открытого космического пространства / Д. В. Козлов. — Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2012.
77. Тепловой микромеханический актюатор и способ его изготовления / А. А. Жуков [и др.]. — Апрель.2012. — Патент RU2448896C2.
78. Микросистемный космический робот-инспектор (варианты) / И. П. Смирнов [и др.]. — Октябрь.2016. — Патент RU2566454C2.
79. Микросистемный захват / Ф. Л. Черноусько [и др.]. — Сентябрь.2016. — Патент RU2598416C1.
80. Микроструктурная система терморегулирования космического аппарата / А. С. Селиванов [и др.]. — Октябрь.2012. — Патент RU2465181C2.
81. Design of mobile microrobots with thermomechanical actuators / N. N. Bolotnik [и др.] // 2015 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). Т. 02. — 07.2015. — С. 252—258.
82. Physical characteristics of the sensing elements of feedback sensors combined with thermomechanical actuators for plant micromotion control systems / N. N. Bolotnik [и др.] // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2015. — Янв. — Т. 54, № 1. — С. 140—150.
83. Экспериментальное исследование силовых характеристик рабочего элемента тепловых микроактюаторов / Д. В. Козлов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. — 2011. — № 2. — С. 84—94.
84. *Козлов, Д. В.* Установка по исследованию деформационных характеристик объектов микроэлектромеханики / Д. В. Козлов, В. Л. Семенов // Приборы и техника эксперимента. — 2015. — № 6. — С. 97—103.

Список рисунков

1.1	Модель капсульного робота.	18
1.2	Зависимость средней скорости робота от параметра τ при постоянном периоде T	23
1.3	Зависимость средней скорости робота от периода T при постоянном параметре τ	27
1.4	Зависимость средней скорости робота от периода T и параметра τ . . .	28
1.5	Зависимости скорости корпуса робота, сердечника и ц.м. системы от времени	34
1.6	Зависимость максимальной средней скорости робота от параметра ε . Безразмерные переменные.	35
1.7	Зависимости средней скорости робота от параметра T при различных τ и ε	36
1.8	Зависимость координат x и ξ , от времени.	37
1.9	Зависимость максимальной средней скорости робота от F_0 . Размерные переменные.	38
1.10	Зависимость максимальной средней скорости робота от параметра m_1 . . .	39
2.1	Прототип капсульного робота	41
2.2	Движения экспериментальной системы: $T = 60$ мс, $\tau = 0.70$	42
2.3	Движение экспериментальной системы: $T = 100$ мс, $\tau = 0.70$	43
2.4	Зависимости средней скорости робота от τ	44
2.5	Зависимости средней скорости робота от T	45
2.6	Зависимости средней скорости робота от τ при фиксированном T . . .	46
2.7	Зависимость средней скорости робота от T при фиксированном τ . . .	46
2.8	Приближение с помощью кривых	48
2.9	Зависимости средних скоростей робота от параметра τ	48
2.10	Зависимости средних скоростей от параметра T	49
3.1	Конструкции термомеханических актюаторов	51
3.2	Нога шагающего робота	52
3.3	Двунаправленный балочный актюатор	53
3.4	Конструкция микросхвата	53

3.5	Предложенная (а), спроектированная и реализованная (б) подвижная часть микроробота: 1 – основание с полезной нагрузкой; 2 – подвижная зона прилипания/отлипания; 3 – основная подвижная зона; 4 – гибкое сочленение; 5 – адгезив.	56
3.6	Фазы движения робота	58
3.7	Общий вид актюатора и его конструкция	59
3.8	Модель V-образной вставки	59
3.9	Модель актюатора в виде шарнирного многозвенника	61
3.10	Схема актюатора	63
3.11	Вид и схема измерительного стенда по определению деформационно-силового воздействия на актюаторные элементы	64
3.12	Экспериментальные данные	66
3.13	Верификация модели	68

Список таблиц

1	Параметры экспериментальной системы	41
2	Экстремальные значения средней скорости	44
3	Параметры приближения	48
4	Размеры актюатора	63
5	Параметры актюатора.	66