

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Армена Мартыновича Нунупарова «Проблемы механики и управления движением мобильных капсульных роботов и роботов с термомеханическими актюаторами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Предмет исследования диссертации А.М. Нунупарова – математические модели и динамические свойства новых типов локомоционных систем, а именно, капсульных роботов, перемещающихся в сопротивляющихся средах за счет движения внутренних масс, и шагающих микророботов с термомеханическими актюаторами. К этим системам проявляют интерес исследователи и инженеры в области робототехники, усматривая в них перспективу для создания миниатюрных мобильных роботов, способных функционировать в стесненном пространстве (узких трубах, щелях) и в экстремальных физических условиях, в том числе в космосе. Динамические свойства и возможности управления движением таких систем в настоящее время не исследованы исчерпывающим образом, что порождает новые задачи, которые необходимо решать средствами теоретической механики. Именно таким задачам посвящена диссертация А.М. Нунупарова. Исследования А.М. Нунупарова представляются актуальными в научном и прикладном аспектах. Актуальность обосновывается инженерной востребованностью систем, рассматриваемых диссертантом, и нерешенностью ряда важных проблем механики таких систем. Задачи, решенные диссертантом, по постановке и методам решения отвечают специальности «Теоретическая механика».

Основной материал диссертации изложен в трех разделах. В первых двух разделах рассматривается капсульная локомоционная система (капсульный робот), состоящая из жесткого корпуса и внутреннего подвижного тела, прикрепленного к корпусу пружиной с линейной характеристикой. Корпус движется вдоль прямой на горизонтальной шероховатой плоскости. Внутреннее тело может перемещаться относительно корпуса вдоль прямой, параллельной линии движения корпуса. Между корпусом и плоскостью действует сухое трение, моделируемое законом Кулона. Движение системы возбуждается силой взаимодействия внутреннего тела с корпусом, изменяющейся периодически. Между корпусом и внешней средой действует кулоново сухое трение. В разделе 1 построена математическая модель капсульного робота, и на основе этой модели исследовано (аналитическими и численными методами) его периодическое движение, при котором скорость корпуса и положение внутреннего тела относительно корпуса изменяются периодически с периодом, равным периоду возбуждения. Предполагалось, что сила взаимодействия корпуса с внутренним телом изменяется в широтно-импульсном режиме; она постоянна в течение определенной доли периода и равна нулю в оставшееся время. Обнаружены важные и интересные особенности поведения капсульного робота с возвратной пружиной. Во-первых, показано, что, управляя только коэффициентом заполнения управляющего сигнала (относительной продолжительностью «активной» фазы, в течение которой управляющая сила не равна нулю), можно управлять величиной и направлением средней скорости робота в установившемся периодическом режиме. Доказано, что изменение коэффициента заполнения на значение, дополняющее его до единицы, влечет изменение направления средней скорости без изменения ее величины. Обнаружено резонансное изменение направления средней скорости движения робота при изменении частоты (или периода) управляющего сигнала. Это явление наблюдается при прохождении частоты возбуждения вблизи собственной частоты колебательной системы «корпус –

внутреннее тело – пружина». На основании проведенного анализа найдены оптимальные параметры режима возбуждения, при которых достигается максимальная средняя скорость движения капсульного робота. В разделе 2 описаны экспериментальные исследования динамики капсульного робота. В экспериментальной модели возбуждающая сила создавалась электромагнитным (соленоидным) приводом. Катушка соленоида жестко закреплялась на корпусе системы, а роль внутреннего тела играл сердечник, изготовленный из ферромагнитного материала. Управление приводом осуществлялось электрическим напряжением, подаваемым на соленоид и изменяющимся периодически в широтно-импульсном режиме, при котором управляющее напряжение постоянно и не равно нулю в течение определенной доли периода и равно нулю в остальное время. В экспериментах наблюдались все качественные особенности поведения капсульного робота, предсказанные исследованиями на основе математической модели.

В третьем разделе рассмотрены миниатюрные роботы с термомеханическим актюаторами – новый тип шагающего мобильного устройства, совмещающего привод и движитель в одном элементе – термомеханическом актюаторе, принцип действия которого основан на термическом изгибе биморфной балки, в конструкции которой используются материалы с различными коэффициентами термического расширения. А.М. Нунупаровым предложена простая расчетная модель термоактюатора, в которой актюатор представляется шарнирным многозвенником с упругими шарнирами. Конфигурация многозвенника, определяемая углами между звеньями, в недеформированном состоянии (когда упругие моменты в шарнирах равны нулю) зависит от его температуры. Эта зависимость определяется экспериментально. Параметры модели – коэффициенты жесткости крутильных пружин в шарнирах и число звеньев при заданной суммарной их длине – идентифицируются на основе максимального приближения данных моделирования зависимости статической конфигурации от внешней нагрузки многозвенника к экспериментальным данным. Предложенная модель предназначена для интегрирования в полную динамическую модель шагающего робота, на основе которой предполагается проводить компьютерную симуляцию поведения системы с целью планирования движений робота и расчета режимов управления для реализации этих движений.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. В разделе 1.3 «Компьютерное моделирование динамики робота» для полноты изложения следовало бы указать, каким методом и с какими характеристиками точности проводилось численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику капсульного робота.
2. Рисунок 2.10 свидетельствует о значительном расхождении модельных и экспериментальных данных. Автор диссертации полагает, что это расхождение обусловлено не вполне реалистичной моделью электромагнитной силы. Эту гипотезу следовало бы проверить, дополнив математическую модель капсульного робота еще одним уравнением, описывающим динамику электрической цепи.

Диссертация А.М. Нунупарова представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, посвященную проблемам механики капсульных локомоторных систем вибрационного принципа действия и мобильных роботов с термомеханическими актюаторами. Работа выполнена на высоком научном уровне. Все выносимые на защиту результаты представляются новыми и получены лично диссертантом, их достоверность гарантируется адекватностью математических моделей, положенных в основу теоретических исследований, корректностью использования аналитических и численных математических

методов и сравнением расчетных данных с экспериментальными. Диссертация демонстрирует высокую квалификацию ее автора в области теоретической механики. Кроме того, диссертант продемонстрировал умение ставить эксперимент, верифицирующий результаты теоретического анализа. Полученные А.М. Нунупаровым результаты вносят заметный вклад в теорию локомоционных систем и роботов с вибрационным возбуждением движения и роботов с термомеханическими актюаторами. С диссертацией А.М. Нунупарова целесообразно ознакомиться, прежде всего, научным работникам и инженерам, занимающимся проблемами вибрационного перемещения тел, а также созданием и исследованием локомоционных систем (мобильных роботов) вибрационного принципа действия, перемещающихся в сопротивляющихся средах без внешних движителей. Полученные диссертантом результаты могут быть использованы в научно-исследовательских институтах и вузах, в которых ведутся подобные исследования, в частности в Московском авиационном институте, Московском физико-техническом институте, Институте проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Юго-Западном государственном университете, МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также в научно-исследовательских отделах и конструкторских бюро предприятий, проектирующих мобильные роботы.

Результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых российских и международных научных журналах, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК РФ для соискателей ученых степеней по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, а также в сборниках трудов международных научных конференций.

Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Считаю, что диссертация «Проблемы механики и управления движением мобильных капсульных роботов и роботов с термомеханическими актюаторами» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, а ее автор, Армен Мартынович Нунупаров, заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент  
доктор физико-математических наук профессор  
Федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского» (ННГУ)

Баландин Дмитрий Владимирович

21 января 2020 г.

Контактные данные:

тел.: +7 903-042-1892, e-mail: [dbalandin@yandex.ru](mailto:dbalandin@yandex.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.02.01 – Теоретическая механика

Адрес места работы:

603950, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, д. 23,  
Институт информационных технологий, математики и механики,  
кафедра дифференциальных уравнений, математического и численного анализа  
Тел.: +7 (831) 4623363

Подпись профессора ИИТМУ  
Д.В.Баландина удостоверяю:

Ученый секретарь ИИТМУ



Л.Ю.Черноморская

21 января 2020 г.