

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Кленова Анатолия Игоревича на тему «Динамический синтез и анализ механизма, реализующего движение локомоционной мобильной платформы в жидкости», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.18 – Теория механизмов и машин

Диссертационная работа А.И. Кленова посвящена синтезу и исследованию динамики мобильной робототехнической платформы, двигающейся в жидкости за счет изменения распределения внутренних масс. Отличительная особенность рассматриваемой робототехнической платформы состоит в отсутствии гребных винтов, подвижных лопастей и других внешних видимых движителей. **Актуальность работы** подтверждается тем, что мобильные робототехнические системы находят широкое применение в самых разных областях науки и техники. Анализ и разработка новых типов мобильных устройств позволит расширить спектр решаемых с их помощью задач, а также улучшить их эффективность. Рассматриваемый в работе механизм обладает преимуществами по сравнению с классическими робототехническими устройствами, оснащенными внешними подвижными элементами: изолированность подвижных элементов от жидкости, низкий уровень шума, повышенная маневренность. С другой стороны, работ, посвященных созданию и анализу натуральных образцов мобильных робототехнических платформ крайне мало, что также подтверждает **новизну**: в диссертации проведен синтез конструкции локомоционной мобильной платформы, приведены управляющие воздействия, позволяющие реализовать стандартный набор типовых движений, проведена экспериментальная верификация математической модели.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в представленном в работе методе динамического синтеза механизма локомоционной мобильной платформы, разработанной конструкции внутренних подвижных звеньев, математической модели движения, системе управления.

Общая структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, суммарным объемом 137 страниц.

Во **введении** поясняется актуальность выбранной темы исследования, приводится список авторов, внесших наибольший вклад в тему диссертационного исследования, формулируются цели и задачи работы, методы, используемые при их достижении, обосновывается достоверность полученных результатов, новизна и значимость работы. Указаны выносимые на защиту положения, список конференций и публикаций, подтверждающих апробированность работы.

В **первой главе** приводится обзор и классификация надводных и подводных транспортных средств по типу их движителей, анализ работ, подтверждающих теоретическую возможность движения мобильного робототехнического устройства без изменения формы его внешней оболочки. В зависимости от типа движителя, устройства разделяются на пять классов: устройства с гребным винтом, перемещающиеся за счет изменения формы внешней оболочки (лопасти, щупальца, плавники и прочие элементы), реактивные, прочие (комбинированные, ротор Флетнера) и перемещающиеся за счет движения внутренних механизмов. Автор приводит основные достоинства и недостатки

каждого рассматриваемого принципа реализации движения надводного или подводного устройства. В силу специфики работы особое внимание уделяется локомоционным мобильным платформам. Для них приводится более детальный обзор литературы, упоминаются некоторые теоретические исследования и практические разработки. Результаты обзора сведены в общую наглядную таблицу.

Вторая глава посвящена разработке математической модели движения локомоционной мобильной платформы в жидкости и анализу зависимости характеристик движений от параметров математической модели. Глава разделена на две части. В первой части рассматривается двухмерная постановка, не предполагающая наличие колебаний мобильной платформы по углу крена и тангажа. Опираясь на уравнения Кирхгофа, задающих динамику тела в жидкости, диссертант получает уравнения движения. На основании теоремы Рашевского–Чжоу доказывается полная управляемость рассматриваемой системы. При условии начала движения из состояния покоя найдены управляющие движения механизмов, позволяющие реализовывать прямолинейное движение центра масс робота, его движение по окружности, а также разворотное движение. Во второй части главы рассматривается более сложная, трехмерная постановка задачи. Рассматриваемая модель робототехнической платформы имеет шесть степеней свободы, учитываются колебания по углу крена и тангажа. Исходя из уравнений Кирхгофа, диссертант получает систему кинематических и динамических дифференциальных уравнений. При этом предполагается, что на платформу действуют три силы (и соответствующие им моменты) – сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления со стороны жидкости, которая, в свою очередь, раскладывается на две: связанную с обтеканием жидкостью и с наличием у платформы килля. Для определения неизвестных параметров, входящих в выражения для силы, действующей со стороны жидкости, применялось математическое моделирование на основе уравнений Навье–Стокса. В конце главы устанавливаются и оптимизируются (с точки зрения максимизации предельной скорости) параметры задачи, вносящие существенный вклад в характер движения робота (величина подвижных масс, радиус и частота вращения подвижных звеньев, несущих эти массы).

В третьей главе диссертант производит синтез механизма, реализующего движение в соответствии с результатами, полученными во второй главе. Синтез механизма происходит в три этапа: структурный и кинематический синтезы, определения параметров натурального образца. Приводится достаточно подробный алгоритм выполнения структурного синтеза: определяются параметры звеньев, необходимые для формирования структуры зубчатого механизма, синтез структурной схемы плоского шарнирного механизма, конвертация в стандартное графическое изображение. На этапе выполнения кинематического синтеза диссертант проектирует выходное звено механизма с закрепленной массой, исходя из оценки минимально необходимого момента подбирает двигатель и редуктор, изображает структурную схему многоступенчатого зубчатого механизма, проектирует и изготавливает (с использованием технологии 3D печати) макет мобильной платформы, изготавливает внутренние элементы, изменяющие распределение масс платформы. На третьем этапе синтеза диссертант подробно описывает методику определения параметров натурального образца: геометрические параметры измеряются непосредственно, инерционные характеристики вычисляются на основе 3D модели. Для определения количественных характеристик гидродинамических свойств (присоединенных масс, присоединенных моментов, гидродинамического сопротивления) был разработан и собран специальный экспериментальный стенд, позволяющий определять

гидродинамические параметры методом протягивания (или вращения) натурального образца в жидкости с известным усилием. Эксперименты проводились многократно, а их результаты обрабатывались статистическими методами. В конце главы приводится схема системы управления локомобионной мобильной платформой.

В четвертой главе приведено описание и результаты проведенных диссертантом натуральных экспериментов движения мобильной платформы в жидкости. На основе этих результатов отмечается, что совпадения с предсказаниями модели в двухмерной постановке носят лишь качественный характер, в то время как количественные результаты различаются многократно. Диссертант приводит исследование характера движения жидкости в окрестности кия за один период оборота подвижных масс. На основании этого исследования делается вывод об образовании вихревых структур слева и справа от кия. По предположению диссертанта именно процесс вихреобразования приводит к многократным различиям экспериментальных результатов и предсказаний, сделанных исходя из двухмерной постановки задачи. В то же время результаты моделирования задачи в трехмерной постановке показали хорошее количественное совпадение с экспериментальными данными. Отсюда диссертант делает вывод о состоятельности этой модели с точки зрения количественных предсказаний, в то время как двухмерная модель годится для получения качественных оценок и поиска оптимальных управляющих воздействий.

В заключении приведены основные результаты работы и выводы.

Текст диссертации хорошо проиллюстрирован рисунками и графиками. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью исходных предпосылок, использованием широко известных теорем, строгими доказательствами формул и утверждений, а также сравнением полученных результатов с экспериментальными данными.

Автореферат вполне отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 печатных работах, среди которых 1 статья опубликована в журнале из международной базы Web of Science, 3 статьи в журналах из перечня ВАК. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть применены специалистами по теоретической механике, мехатронике и робототехнике в таких научно-исследовательских и учебных институтах как ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, МФТИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИТМО, МАИ, УдГУ, ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского.

Замечания по диссертационной работе:

1. На взгляд оппонента, использованные в диссертации термины «двухмерная» и «трехмерная» постановки не совсем понятны и корректны. В «двухмерной» постановке положение мобильной платформы определяется тремя координатами, что следует из формулы (2.1) на странице 49, в то время как на той же странице написано: «Движение рассматриваемой системы двумерное». В «трехмерной» постановке положение мобильной платформы определяется шестью координатами: три координаты задают положение центра масс платформы, еще три (углы Крылова) задают ее ориентацию. Кроме того, из текста диссертации не совсем понятно, является ли переменная z в «трехмерной» постановке независимой координатой или однозначно выражается через углы Крылова: на странице 65 сделано предположение 6, согласно

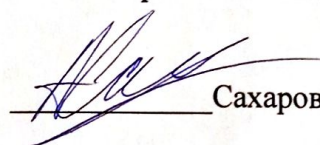
которому процесс волнообразования не учитывается, а объем погруженной части оболочки мобильной платформы H предполагается постоянным.

2. В диссертации присутствуют терминологические неточности. Термин «угловые скорости внутренних масс» на странице 51 не является корректным с учетом того, что диссертант предполагает массы точечными. Правильнее было бы говорить об угловых скоростях механизмов, вращающих эти массы. На странице 61 используется термин «вектор поступательной скорости тела», при том, что тело поступательно не движется. По всей видимости речь идет о скорости центра масс тела.
3. Функция Q в формуле (2.11) на странице 52 нигде не выписана. Можно было бы вынести более подробное объяснение получения формулы (2.11) в приложение к диссертации.
4. На некоторых графиках (например рисунки 2.9 и 2.10) обозначения и легенда написаны очень мелким шрифтом, что затрудняет их восприятие.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе, ее научной и практической ценности. Работа выполнена на высоком научном уровне, хорошо структурирована, написана ясным языком и представляет собой законченное исследование.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационная работа Кленова Анатолия Игоревича «Динамический синтез и анализ механизма, реализующего движение локомотивной мобильной платформы в жидкости» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а автор диссертации заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.18 – Теория механизмов и машин.

Официальный оппонент – доцент кафедры теоретической механики, кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика



Сахаров Александр Вадимович

«26» августа 2019 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Веб сайт: <http://www.mipt.ru>

Телефон: +7 (495) 408-78-66

e-mail: sah.aleksandr@gmail.com

Подпись и сведения Сахарова Александра Вадимовича заверяю
Ученый секретарь МФТИ, к.ф.-м.н.



Скалько Юрий Иванович