

На правах рукописи



КЛЕНОВ АНАТОЛИЙ ИГОРЕВИЧ

**Динамический синтез и анализ механизма,
реализующего движение локомотивной
мобильной платформы в жидкости**

05.02.18 – Теория механизмов и машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в *Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова.*

Научный руководитель: **Килин Александр Александрович**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Яцун Сергей Федорович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Механика, мехатроника и робототехника» ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Сахаров Александр Вадимович
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Теоретическая механика»
ФГБОУ ВО «Московский физико-технический институт»

Ведущая организация: Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис».

Защита состоится «08» октября 2019 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д.002.059.05 на базе *Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН)*, расположенного по адресу: *Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ФГБУН ИМАШ РАН* и на сайте: <http://www.imash.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Бозров Виктор Маирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В настоящее время существенный интерес проявляется к разработке автономных робототехнических систем, предназначенных для передвижения в жидкости. Как правило, такие устройства приводятся в движение с использованием гребных винтов или подвижных лопастей. Также встречаются и другие устройства, реализующие «нетрадиционные» способы передвижения. Один из таких типов устройств — это локомоционные мобильные платформы с внутренним механизмом, у которых в процессе движения внешняя оболочка остаётся неизменной, и отсутствуют приводные элементы, взаимодействующие непосредственно с жидкостью или воздухом над её поверхностью. При этом движение осуществляется за счёт работы внутреннего механизма, изменяющего положение центра масс системы и (или) гидростатический момент.

Данный тип мобильной платформы обладает рядом преимуществ по сравнению с другими «традиционными» конструкциями: изолированность рабочих узлов от жидкости, возможность полной гидроизоляции, низкий уровень гидродинамического шума при передвижении, повышенная маневренность. Эти особенности локомоционных мобильных платформ с внутренними механизмами позволяют применять их для исследования и мониторинга в жидкости с высокими экологическими нормами, в легковоспламеняющихся средах, в условиях высокого гидростатического давления.

Данный способ передвижения в жидкости является новым как с точки зрения гидродинамики, так и мобильной робототехники, что подтверждается наличием небольшого количества теоретических работ в данном направлении. Теоретические исследования движения таких систем, с периодически изменяющимся положением центра масс, в идеальной среде и в среде с заданным законом сопротивления представлены в работах академика РАН В.В. Козлова, академика РАН Ф.Л. Черноусько, докторов наук С.М. Рамоданова, Д.А. Онищенко, С.Ф. Яцуна. В немногочисленных работах S. Childress, S.E. Spagnolie, T. Tokieda, В.А. Тененева, С.М. Рамоданова рассматривались вопросы численного моделирования гидродинамики движущегося тела с изменяемым центром масс на основе совместного численного решения уравнений Навье-Стокса и уравнений динамики твёрдого тела в двумерной постановке.

Работы, посвященные созданию натуральных образцов таких систем и их экспериментальному исследованию, практически отсутствуют. Поэтому вопросы синтеза механизма, обеспечивающего передвижение локомоционной мобильной платформы в жидкости, и математического моделирования нестационарного движения в жидкости тел с изменяемым центром масс являются актуальными для создания подобных систем и управления ими.

В связи с изложенным выше тема диссертационной работы представляется актуальной.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является синтез и исследование механизма, обеспечивающего движение локомотивной мобильной платформы в жидкости за счёт изменения распределения масс.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Определение критериев синтеза механизма, осуществляющего изменение распределения масс локомотивной мобильной платформы.
2. Разработка динамической математической модели движения локомотивной мобильной платформы в жидкости и исследование влияния параметров механизма на характер движения мобильной платформы.
3. Разработка методики динамического синтеза механизма осуществляющего изменение распределения масс локомотивной мобильной платформы.
4. Синтез механизма, реализующего изменение распределения масс системы, и создание макета локомотивной мобильной платформы.
5. Разработка лабораторного стенда и методики определения гидродинамических параметров локомотивной мобильной платформы.
6. Проведение натурных экспериментов, исследование влияния режимов работы механизма на динамику локомотивной мобильной платформы и сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Методы исследования. Для решения поставленных в рамках диссертационного исследования задач использовались методы теории машин и механизмов, методы теоретической механики, аналитические и численные методы решения уравнений динамики. Для измерения гидродинамических параметров локомотивной мобильной платформы разработан лабораторный стенд и методика, позволяющая определить величины присоединённых масс и коэффициенты гидродинамического сопротивления. При проведении экспериментальных исследований движения локомотивной мобильной платформы использовались современные технологии захвата движения (Motion Capture). Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием программного комплекса Matlab. Программное обеспечение для управления локомотивной мобильной платформой разрабатывалось на языке Си для микроконтроллеров серии STM32F303 с ядром Cortex-M4 в среде Keil uVision4.

Достоверность и обоснованность. Разработанные математические модели основываются на классических утверждениях и теоремах и не противоречат известным результатам. Для исследования и моделирования полученных уравнений используются апробированные аналитические и численные методы решения. Достоверность подтверждается согласованностью математической модели с результатами натурных экспериментов. Для проведения экспериментальных исследований использовались современные измерительные комплексы, прошедшие поверку.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что:

1. Разработана методика динамического синтеза механизма, осуществляющего изменение распределения масс локомотивной мобильной платформы.
2. Синтезирован механизм, осуществляющий изменение распределения масс локомотивной мобильной платформы.
3. Синтезирована конструкция локомотивной мобильной платформы, перемещающейся в жидкости за счёт изменения распределения масс.
4. Проведена экспериментальная верификация разработанной математической модели, на основе которых сделана оценка возможности её использования для синтеза механизма и управления локомотивной мобильной платформой в жидкости с переменным распределением масс.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке методики динамического синтеза и анализа механизма, обеспечивающего движение водной локомотивной мобильной платформы за счёт изменения распределения масс.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для проектирования и модернизации мобильных устройств, перемещающихся в жидкости. Разработанные математические модели движения могут использоваться для определения оптимальных параметров механизмов подобных локомотивных мобильных платформ, перемещающихся в жидкости, и построения систем управления. Разработанная методика определения гидродинамических сил позволяет вычислять присоединённые массы и коэффициенты гидродинамического сопротивления тел, движущихся в жидкости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика динамического синтеза механизма, осуществляющего изменение распределения масс локомотивной мобильной платформы и реализующего её продвижение в жидкости. Данная методика основана на использовании универсальной структурной системы при структурном синтезе механизма и динамической математической модели движения мобильной платформы при кинематическом синтезе механизма.
2. Механизм реализующий продвижение локомотивной мобильной платформы в жидкости.
3. Разработанные лабораторные стенды и методики определения гидродинамических параметров тел методом их буксировки в жидкости и проверки разработанной методики динамического синтеза, совмещающей в себя систему определения траектории движения исследуемого объекта Vicon Motion Capture и систему определения поля скорости жидкости вокруг исследуемого объекта Particle Image Velocimetry LaVision.
4. Результаты экспериментальной проверки методики динамического синтеза механизма.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на семинарах «Института компьютерных исследований» ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», кафедры «Мехатронные системы» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» и международных семинарах по ТММ имени И.И. Артоболевского ИМАШ РАН.

Кроме того, результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на российских и международных конференциях:

- Всероссийская научная конференция «Дни регулярной и хаотической динамики» (Ижевск, 2015 г.)
- Шестая международная конференция «Geometry, Dynamics, Integrable Systems – GDIS 2016» (Ижевск, 2016 г.)
- Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017) (Москва, 2017 г.)

Публикации. Результаты диссертации отражены в четырёх научных публикациях, рекомендованных ВАК, одна из которых опубликована в журнале, входящем в Web of Science. Список опубликованных работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 127 страницах и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка используемых источников (96 наименования).

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор надводных и подводных транспортных средств, применяемых в робототехнике. Приведена их классификация по способу передвижения в жидкости. Описаны их конструктивные особенности и проведен структурный анализ их кинематических схем. Выявлены объективные преимущества локомотионных мобильных платформ, а именно:

1. Отсутствие приводных элементов, взаимодействующих непосредственно с жидкостью или воздухом над её поверхностью.
2. Возможность сделать корпус полностью герметичным.
3. Отсутствие гидродинамических шумов.

4. Повышенная маневренность.

Перемещение таких систем в жидкости можно обеспечить за счёт действия внутреннего механизма, который реализует:

1. Изменение гиросtatического момента системы.
2. Изменение распределения масс.

В качестве механизма передвижения выбран метод изменения положения центра масс, потому что данный метод позволяет перемещать тело даже в рамках модели идеальной жидкости. Данный способ передвижения впервые исследовался в работах^{1,2} В. В. Козлова и С. М. Рамоданова. Авторами выявлено, что необходимыми условиями для управляемости твёрдого тела за счёт движения внутренних масс является анизотропия инерционных сил (присоединённых масс), действующих на тело со стороны жидкости, и движение центра масс устройства по самопересекающейся траектории типа гладкой восьмёрки.

В работе³ доказана теоретическая возможность передвижения механической системы, состоящей из твёрдого тела эллиптической формы и двух материальных точек, которые движутся по круговым траекториям по заранее заданному закону. Этот теоретический результат положен в основу синтеза механизма, обеспечивающего продвижение локомотивной мобильной платформы в жидкости за счёт изменения распределения масс системы. Движение двух внутренних масс по круговым траекториям реализуется на основе зубчатого механизма с закрепленными массами на ведомых зубчатых колесах. Корпус проектируемой локомотивной мобильной платформы выполнен в форме эллиптического цилиндра с килем, расположенным вдоль большей оси. Такая форма имеет две оси симметрии, а, значит, обладает одинаковыми величинами гидродинамического сопротивления при движении вперед и назад и соответствует требованию об анизотропии присоединённых масс, выдвинутому в работе¹, а наличие килля лишь увеличивает эту разницу.

Также в данной главе определены критерии синтеза механизма, которые накладываются на локомотивную мобильную платформу: управляемость системы и максимальная скорость передвижения.

Во второй главе представлена динамическая математическая модель движения локомотивной мобильной платформы. Для исследования зависимости требуемых критериев от параметров механизма в качестве первого приближения рассмотрена конструкция локомотивной мобильной платформы с двумя вращающимися массами в рамках известной модели, предложенной В.В. Козловым и С.М. Рамодановым и представленной в работах^{1,2}. Для этого рассмотрена математическая модель плоскопараллельного движения твёрдого гидродинамически несимметричного тела эллиптической формы массой M , несущего

¹ В.В. Козлов, С.М. Рамоданов. О движении изменяемого тела в идеальной жидкости. ПММ. - 2001. - Т. 65. Вып. 4. - С. 592 - 601.

² В.В. Козлов, С.М. Рамоданов. О движении в идеальной жидкости тела с жесткой оболочкой и меняющейся геометрией масс. Докл. РАН. - 2002. - Т. 382. Вып. 4. - С. 478 - 481.

³ А.А. Килин, Е.В. Ветчанин. Управление движением твёрдого тела в жидкости с помощью двух подвижных масс. Нелинейная динамика. - 2015. - Т. 11. Вып. 4. - С. 633 - 645.

внутри себя две подвижные сосредоточенные массы m , способные двигаться по окружностям радиусом l (см. рис. 1). Центры окружностей лежат на малой оси эллипса на расстоянии L от центра масс тела. Положения точечных масс на окружностях задаются известными функциями времени $\beta_1(t)$, $\beta_2(t)$, выполняющими функцию управления. Данные углы откладываются от оси $O_1\xi$ против часовой стрелки.

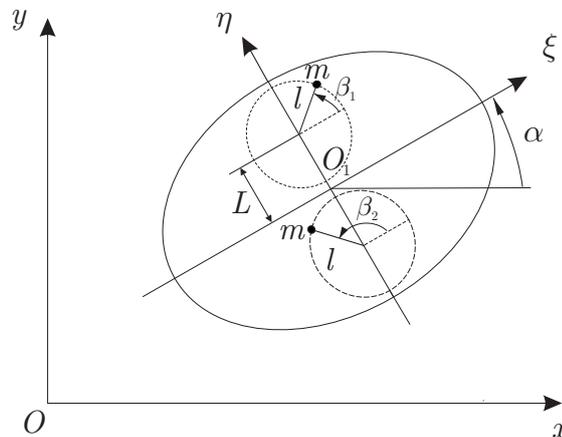


Рис. 1. Твёрдое тело с двумя материальными точками

Движение данной системы в неподвижной системе координат из состояния покоя записываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{mr}{G_1} \left((S\Phi_1 + \sin \beta_1)\Omega_1 + (S\Phi_2 + \sin \beta_2)\Omega_2 \right) \\ -\frac{mr}{G_2} \left((C\Phi_1 + \cos \beta_1)\Omega_1 + (C\Phi_2 + \cos \beta_2)\Omega_2 \right) \\ \Phi_1\Omega_1 + \Phi_2\Omega_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$G_i = a_i + 2m, \quad S = \sin \beta_1 + \sin \beta_2, \quad C = \cos \beta_1 + \cos \beta_2,$$

$$\Phi_i = \frac{-G_1G_2mr(l - (-1)^i L \cos \beta_i) + G_1m^2l^2C \cos \beta_i + G_2m^2l^2S \sin \beta_i}{G_1G_2 \left(b + 2m(l^2 + L^2) + 2mlL(\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \right) - G_2m^2l^2S^2 - G_1m^2l^2C^2},$$

где x и y – координаты начала подвижной системы координат относительно неподвижной, α – угол между осями Ox и $O\xi$, a_1 , a_2 – коэффициенты, учитывающие массу тела и присоединённые массы, b – коэффициент, учитывающий момент инерции тела и присоединённый момент инерции, m – масса подвижной материальной точки.

В результате исследования данной математической модели определены два закона движения выходных звеньев механизма с закрепленными на них массами, которые соответствуют двум элементарным маневрам системы: поступательное движение в каком-либо направлении и разворот на месте. Комбинируя данные элементарные траектории, можно построить управление для движения системы по произвольной траектории.

1. Прямолинейное движение (см. рис. 2).

Закон движения внутренних масс ($\beta_1 = -\pi/2 + 2\pi\omega t$; $\beta_2 = -\pi/2 - 2\pi\omega t$).

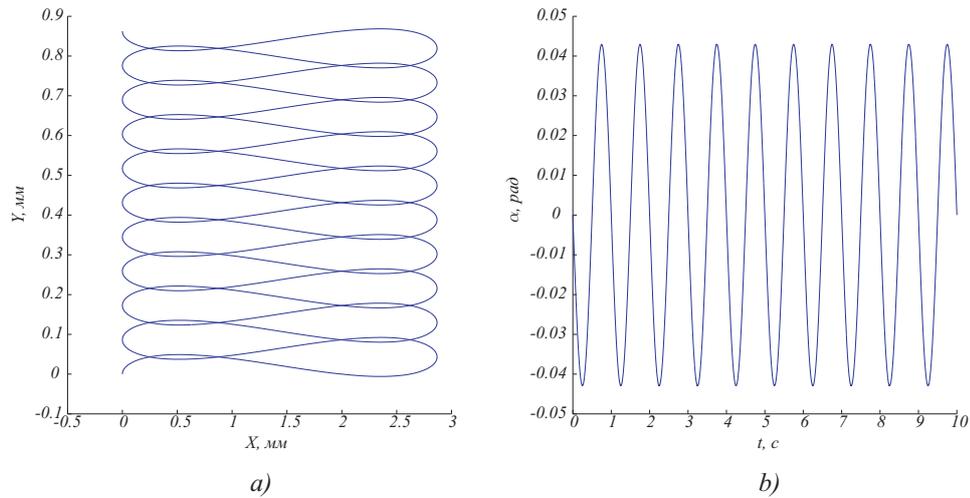


Рис. 2. Траектория движения центра тела (а) и зависимость $\alpha(t)$ (b) при заданном законе управления ($\beta_1 = -\pi/2 + 2\pi\omega t$; $\beta_2 = -\pi/2 - 2\pi\omega t$) и следующих параметрах системы $m = 0.05$ кг, $a_1 = 3$, $a_2 = 2$, $l = 0.03$ м, $L = 0.04$ м, $\Omega = 60$ об/мин

2. Поворот на месте (см. рис. 3)

Закон движения внутренних масс ($\beta_1 = 2\pi\omega t$; $\beta_2 = \pi + 2\pi\omega t$).

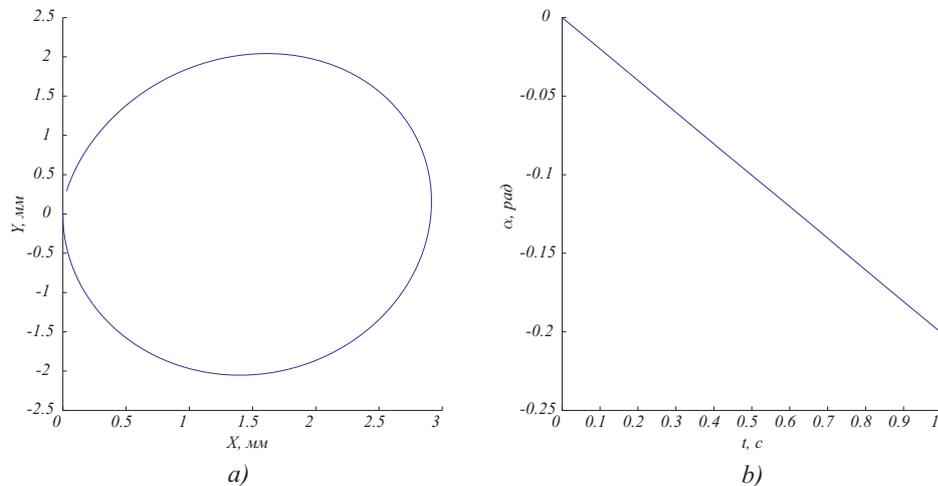


Рис. 3. Траектория движения центра масс (а) и зависимость $\alpha(t)$ (b) при заданном законе управления ($\beta_1 = 2\pi\omega t$; $\beta_2 = \pi + 2\pi\omega t$) и следующих параметрах системы $m = 0.05$ кг, $a_1 = 3$, $a_2 = 2$, $l = 0.03$ м, $L = 0.04$ м, $\Omega = 60$ об/мин

Данная математическая модель обеспечивает качественное совпадение характера движения тела с двумя вращающимися массами с движением натурального образца, как показано в главе 3. Но результаты численного моделирования количественно существенно отличаются от экспериментальных данных (показывают скорость передвижения в 50 раз меньше, чем в эксперименте). Поэтому данную модель нельзя использовать для определения параметров синтезируемого механизма.

Далее движение локомотионной мобильной платформы с двумя вращающимися массами рассмотрено в трёхмерной постановке с учётом внешних сил, действующих на тело со стороны жидкости (см. рис. 4).

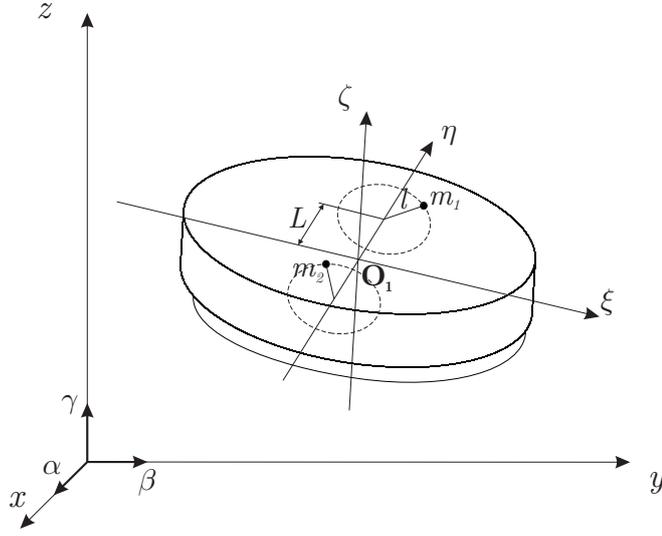


Рис. 4. Модель локомотионной мобильной платформы

Движение данной системы в жидкости с учётом внешних сил, действующих на тело, запишется следующей системой уравнений относительно неподвижной системы координат $Oxyz$:

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{Q}^T \mathbf{V}, \\
 \dot{\boldsymbol{\alpha}} &= \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\beta}} = \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}, \\
 \dot{\mathbf{P}} &= \mathbf{P} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{F}, \\
 \dot{\mathbf{M}} &= \mathbf{M} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V} + \mathbf{N}, \\
 \mathbf{P} &= \mathbf{C} \mathbf{V} + \mathbf{B} \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{K}_1, \\
 \mathbf{M} &= \mathbf{I} \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{K}_2, \\
 \mathbf{C} &= (m_s + 2m_k) \mathbf{E} + \boldsymbol{\Lambda}_V, \quad \mathbf{K}_1 = \sum_{k=1}^K m_k \dot{\mathbf{r}}_k, \quad \mathbf{B} = \sum_{k=1}^K m_k \mathbf{G}_k, \\
 \mathbf{I} &= \boldsymbol{\Lambda}_\Omega + \mathbf{I}_s + \sum_{k=1}^K m_k \mathbf{G}_k^T \mathbf{G}_k, \quad \mathbf{K}_2 = \sum_{k=1}^K m_k \dot{\mathbf{r}}_k \mathbf{G}_k, \\
 \mathbf{Q} &= \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{pmatrix} \quad \mathbf{G}_k = \begin{pmatrix} 0 & r_{\zeta k} & -r_{\eta k} \\ -r_{\zeta k} & 0 & r_{\xi k} \\ r_{\eta k} & -r_{\xi k} & 0 \end{pmatrix},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $\mathbf{R} = (x, y, z)^T$ – радиус-вектор положения точки O_1 относительно неподвижной системы координат; \mathbf{V} – вектор поступательной скорости тела; $\boldsymbol{\Omega}$ – вектор угловой скорости тела; \mathbf{Q} – матрица поворота, образованная единичными векторами $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$, направленными вдоль осей Ox, Oy, Oz ; \mathbf{P} – количество

движения системы; \mathbf{M} – момент количества движения; \mathbf{F} – сила, действующая на тело со стороны жидкости; \mathbf{N} – момент силы, действующей на тело со стороны жидкости; m_k – величина k -й внутренней массы; m_s – масса тела; $\mathbf{r}_k = (r_{\xi_k}, r_{\eta_k}, r_{\zeta_k})$ – радиус-вектор k -й внутренней массы; \mathbf{E} – единичная матрица; \mathbf{I}_s – главный центральный тензор инерции тела; $\mathbf{\Lambda}_V$ – тензор присоединённых масс; $\mathbf{\Lambda}_\Omega$ – тензор присоединённых моментов инерции.

В рамках данной трёхмерной математической модели исследована динамика рассматриваемой системы. Изучена зависимость характера движения от параметров механизма. Было выявлено, что существенный вклад в скорость передвижения локомотивной мобильной платформы V вносят величины подвижных масс m_k и радиус траектории их вращения l . На рисунке 5 представлен график зависимости скорости движения мобильной платформы от величины подвижной массы m_k и радиуса их вращения l при следующих параметрах системы $m_s = 0.8$ кг, $\mathbf{\Lambda}_V = \text{diag}(0.9 \ 1.46 \ 0.9)$ кг, $\mathbf{\Lambda}_\Omega = \text{diag}(0.001 \ 0.0044 \ 0.001)$ кг·м², $\mathbf{I}_s = \text{diag}(0.001851 \ 0.003785 \ 0.002948)$ кг·м², $\omega = 300$ об/мин. Были определены максимально возможные скорости при заданных параметрах системы в предельном случае, когда радиус вращения подвижной массы равен расстоянию смещения оси вращения этой массы от оси симметрии эллипса, то есть $L = l$. Для системы с заданными параметрами максимальная скорость передвижения $V_{max} = 86.93$ мм/с при $m_k = 80$ гр и $l = 75.8$ мм.

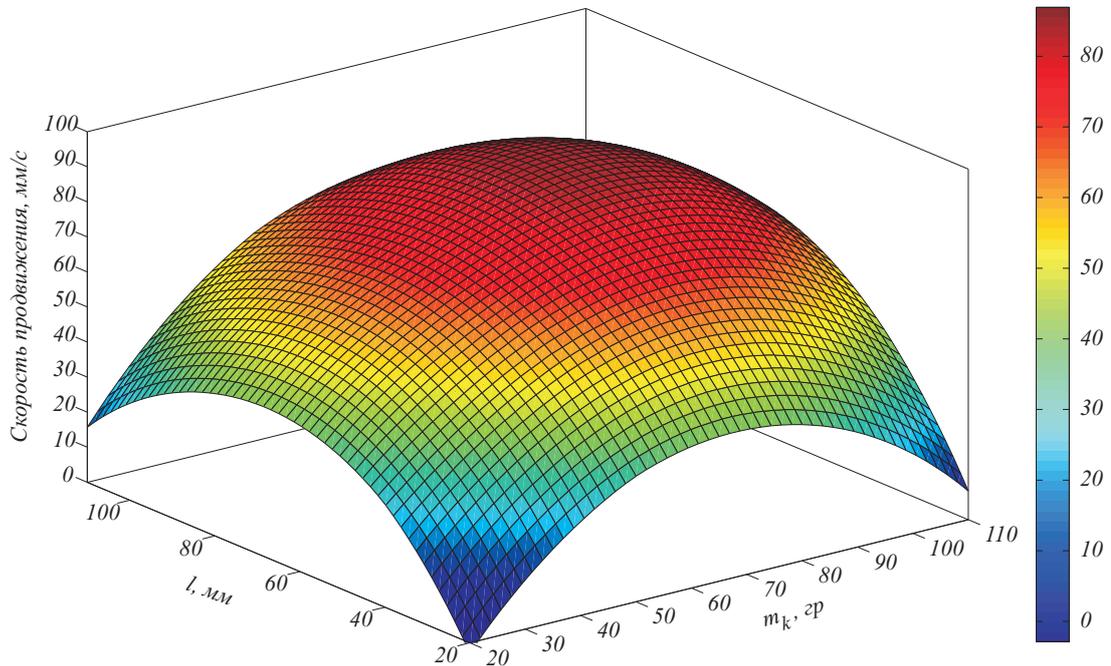


Рис. 5. Зависимость скорости движения локомотивного робота от величины подвижных масс m_k и радиуса траектории их вращения l

Для дальнейшего использования полученные данные были аппроксимированы квадратичной функцией. В результате чего была получена функция зависимости скорости передвижения мобильной платформы V в (мм/с) от ве-

личины подвижных масс m_k (гр) и радиуса окружности их вращения l (мм):

$$V = 84 + 7.003 \cdot m + 6.838 \cdot l - 10.73 \cdot m^2 + 1.524 \cdot m \cdot l - 10.77 \cdot l^2 \quad (3)$$

С использованием полученной зависимости можно варьировать и подбирать параметры выходных звеньев механизма и величины подвижных масс.

В третьей главе описан процесс синтеза зубчатого механизма с одной степенью свободы, который сообщает движение двум массам, закреплённым на двух ведомых зубчатых колесах. Синтезируемый механизм реализует заданное изменение положения центра масс механической системы в соответствии с зависимостями, полученными в Главе 2, и обеспечивает движение локомотивной мобильной платформы.

По результатам синтеза механизма, изменяющего распределение масс системы, сформулирована методика динамического синтеза, которая состоит из трёх этапов: структурный синтез, кинематический синтез и определение параметров натурального образа.

Первый этап - структурный синтез механизма. На данном этапе выполняется обоснованный и рациональный выбор структурной схемы механизма исходя из целей и задач, который должен решать механизм, и функции движения выходных звеньев. В качестве модели зубчатого механизма при структурном синтезе использовались плоские шарнирные механизмы с высшими парами, так как они имеют аналогичную структурную формулу. В них так же как и в зубчатых механизмах, звенья могут образовывать только кинематические пары IV и V классов.

Для решения задачи структурного синтеза механизма использован метод, основанный на применении универсальной структурной системы. С учетом особенностей строения плоских механизмов универсальная структурная система принимает вид:

$$\begin{cases} p = p_4 + p_5 = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1, \\ W = 3n - 2p_5 - p_4, \\ p_5 = n, \end{cases} \quad (4)$$

где p - общее число кинематических пар в цепи, p_k - число кинематических пар k -го класса, τ - сложность базисного звена, n - общее число подвижных звеньев в цепи, n_i - число звеньев, добавляющих i пар в цепь, W - подвижность кинематической цепи.

Структурный синтез осуществляется выполнением следующей последовательности действий:

1. Определение параметров механизма, необходимых для формирования структуры зубчатого механизма. Для этого необходимо:
 - а) Задаться подвижностью будущего зубчатого механизма W и опреде-

лечь минимальное количество подвижных звеньев n_{min} . Для обеспечения заданного движения выходных звеньев, полученного в разделе 2.1, подходит рядовой зубчатый механизм, обладающий подвижностью $W = 1$, с $n_{min} = 4$ подвижными звеньями.

- в) Определить сложность базисного звена τ . Максимальное значение τ_{max} при заданном $n = 4$ можно определить исходя из предположения, что кроме τ -угольника в цепь будут входить звенья, добавляющие только одну кинематическую пару.

$$\begin{cases} \tau_{max} = n - W + 1 = 4, \\ \tau_{min} = 3 \text{ при } n \geq 3 \end{cases} \quad (5)$$

- г) С использованием универсальной структурной системы (4) определить параметры для нескольких наборов значений n ; построить древа параметров структуры механизма и выбрать наиболее подходящий набор параметров. В таблице 1 приведены численные решения системы (4) при $\tau = 3$.

Таблица 1. Решение универсальной структурной системы при $\tau = 3$

n	n_2	n_1	p_4	p_5
4	1	2	4	4
5	2	2	4	5
6	3	2	5	6

На рисунке 6 представлено древо параметров структуры механизма полученное на основе решения универсальной структурной системы.

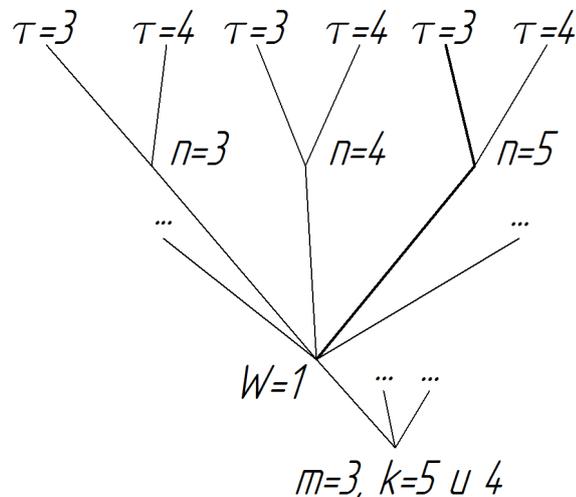


Рис. 6. Древо параметров структуры механизма

Исходя из необходимости обеспечения законов движения выходных

звеньев, полученных второй главе, наиболее подходящий набор параметров для синтеза механизма: $W = 1$, $\tau = 3$, $n = 6$, $n_2 = 3$, $n_1 = 2$, $p_4 = 5$, $p_5 = 6$.

2. На основе найденных значений параметров структуры синтезируем структурную схему плоского шарнирного механизма с кинематическими парами IV и V классов (см. рис. 7).

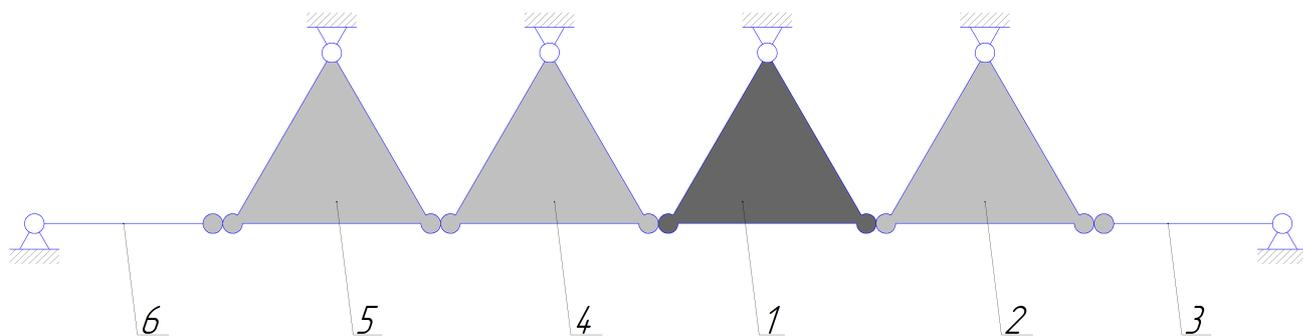


Рис. 7. Схема шестизвенного плоского шарнирного механизма

На данной схеме звено 1 является приводным звеном. Приводное звено с помощью промежуточных звеньев 2, 4, 5 передает вращательное движение двум выходным звеньям 3 и 6.

3. Полученную структурную схему зубчатого механизма в виде плоских стержневых цепей с высшими парами (см. рис. 7) конвертируем в общепринятое графическое изображение зубчатого механизма 8.

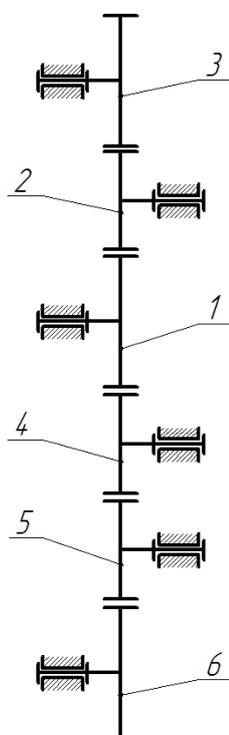


Рис. 8. Схема шестизвенного зубчатого механизма

Второй этап синтеза механизма — кинематический синтез механизма. В

результате выполнения структурного синтеза сформирована структурная схема механизма (рис. 8). Используя результаты динамической модели, представленной в Главе 2, и зависимость (3), определяем параметры выходных звеньев механизма и величину подвижных масс. С использованием программного комплекса САПР SolidWorks было спроектировано выходное звено механизма с закрепленной подвижной массой (рис. 9) и определены инерционно-массовые характеристики: смещение центра масс звена от оси вращения $l = 33$ мм, общая масса звена $m_k = 50$ гр, момент инерции относительно оси вращения звена $J = 0.00007345$ кг · м².

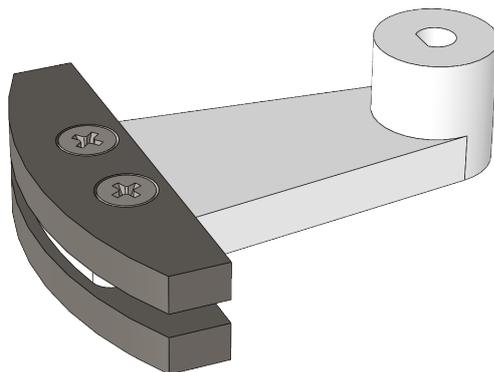


Рис. 9. Модель выходного звена механизма

Исходя из свойств выходных звеньев определен требуемый момент двигателя, необходимый для преодоления момента инерции двух выходных звеньев с закрепленными массами, $M_{min} = 0.154$ Н · м при частотах вращения $\omega = [100...1000]$ об/мин. В качестве мотора выбираем двигатель постоянного тока фирмы Polulu со встроенным датчиком положения. Данный мотор имеет максимальную скорость 10000 об/мин и максимальный момент 0.035 Н · м при 6V и 6.6A в обмотке. Для снижения частоты вращения и повышения механического момента между двигателем и приводным звеном зубчатого механизма установим редуктор, при этом общее передаточное отношение механизма должно составлять $U_{\text{механизма}} = 10$.

Преобразованная схема зубчатого механизма с установленным редуктором представлена на рисунке 10. Данный механизм состоит из двухступенчатого редуктора (звено 1, 2, 3) и двух зубчатых рядов (звенья 3, 4, 5 и звенья 3, 6, 7, 8), которые обеспечивают синхронное вращение двух выходных звеньев (5 и 8) и их жесткое позиционирования друг относительно друга.

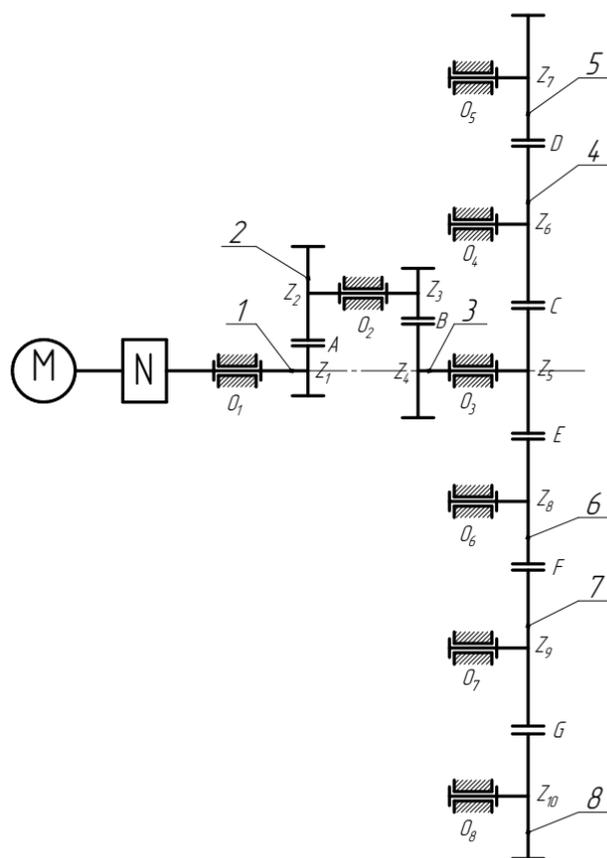


Рис. 10. Структурная схема многоступенчатого зубчатого механизма

С использованием результатов динамического моделирования, представленных во второй главе, и зависимости скорости движения локомотивной мобильной платформы от величины подвижных масс m_k и радиуса их вращения l , записанных в выражении (3), определено расположение осей вращения внутренних масс, размеры зубчатых колес и их компоновка. На рисунке 11 изображены геометрические размеры локомотивной мобильной платформы.

Геометрические размеры корпуса проектируемого мобильной платформы (эллиптического цилиндра с килем) определены оборудованием, доступным для изготовления и испытания макетного образца. Для изготовления макета мобильной платформы использовался 3D принтер STRATASYS Dimension SST1200 с рабочей зоной печати $254 \times 254 \times 305$ мм. Для исследования динамики движения тел в жидкости использовался бассейн $3 \times 1.5 \times 1.8$ м с установленной системой захвата движения Motion capture. В результате были приняты параметры корпуса - эллиптического цилиндра $250 \times 180 \times 50$ мм и толщиной стенки 4 мм. Высота цилиндра и толщина стенки уточнялась на этапе 3D моделирования в среде SolidWorks и этапе эскизного проектирования для обеспечения необходимой плавучести.

На рисунке 11 изображены геометрические размеры локомотивной мобильной платформы, расположение осей и делительные диаметры зубчатых колес внутреннего механизма.

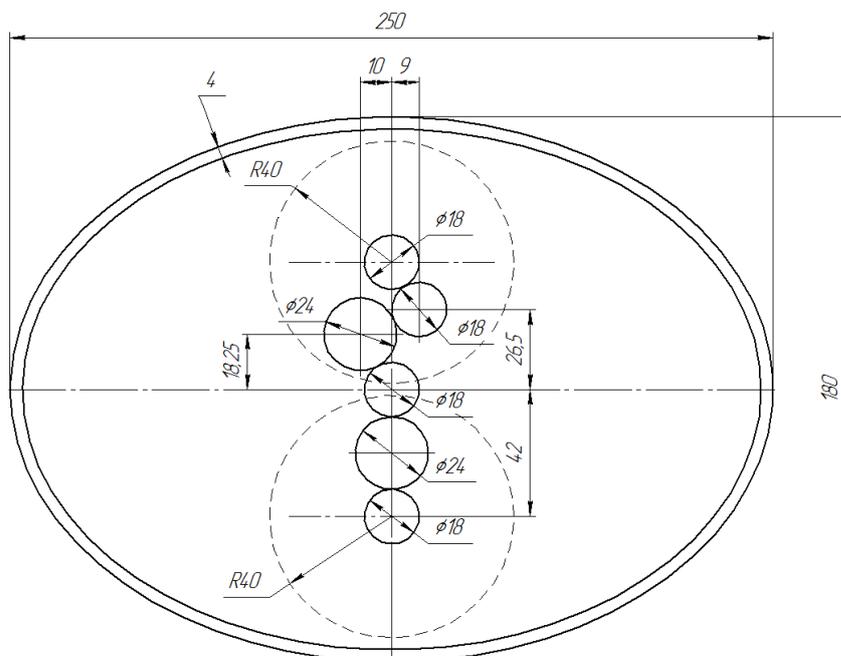


Рис. 11. Геометрические характеристики внутреннего механизма

В соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 10, и схемой компоновки зубчатых колес (рис. 11) изготовлен макет внутреннего механизма локомотивной мобильной платформы (рис. 12), на выходных звеньях которых закреплены массы $m_1 = m_2 = 50$ гр.

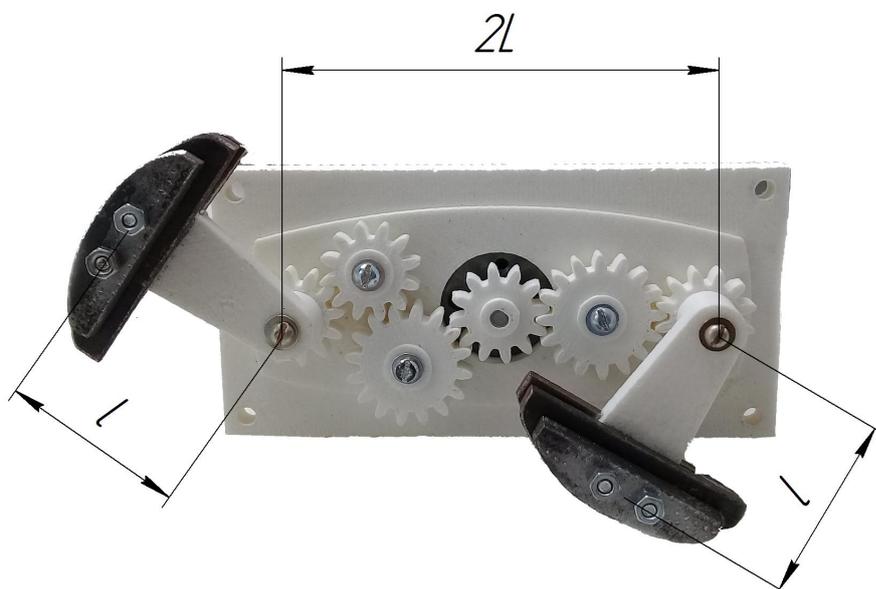


Рис. 12. Внутренний механизм, изменяющий распределение масс локомотивной мобильной платформы

Корпус и наружные зубчатые колеса выполнены из ABS пластика методом 3D печати. Расстояние между осями выходных звеньев $2L = 84$ мм, длина выходного звена от оси вращения до его центра масс $l = 33$ мм. Величины подвижных масс $m_k = 0.05$ кг.

На рисунке 13 представлен макетный образец локомотионной мобильной платформы.



Рис. 13. Модель локомотионной мобильной платформы

На третьем этапе синтеза были определены параметры натурального образа. Все массовые и линейные характеристики измерены, инерционные характеристики вычислены на основе 3D модели, адаптированной к натурному образцу. Для измерения гидродинамических свойств макета разработан и создан экспериментальный стенд. Методика определения гидродинамических свойств объекта заключается в протягивании или вращении исследуемого тела в жидкости с известным усилием и фиксации его перемещения с использованием датчиков. Стенд состоит из буксируемой платформы, к которой жёстко крепится исследуемое тело, двух цилиндрических направляющих, по которым перемещается платформа, системы блоков и буксирующего груза (см. рис. 14).



Рис. 14. Стенд для определения гидродинамических свойств объекта

Экспериментальный стенд позволяет определять присоединённые массы и присоединённые моменты тел в жидкости, коэффициенты гидродинамического сопротивления. С использованием данного стенда определены гидродинамические характеристики созданного натурального образца локомотивной мобильной платформы.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния частоты вращения выходных звеньев механизма с закреплёнными на них массами на движение локомотивной мобильной платформы.

В процессе экспериментов локомотивной мобильной платформе задавалось управляющее воздействие. С использованием системы локального позиционирования Vicon Motion Capture определялась траектория движения исследуемого объекта, а с помощью системы PIV LaVision определялось поле скоростей жидкости за движущимся телом.

На рисунках 15 и 16 представлены пример экспериментальной траектории движения локомотивной мобильной платформы и поле скорости жидкости, образующееся в процессе её движения.

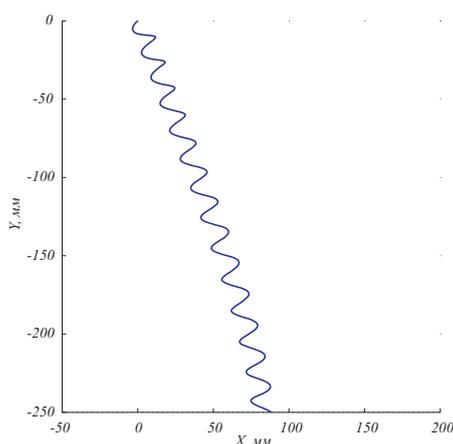


Рис. 15. Пример траектории движения локомотивной мобильной платформы при $\Omega = 300$ об/мин

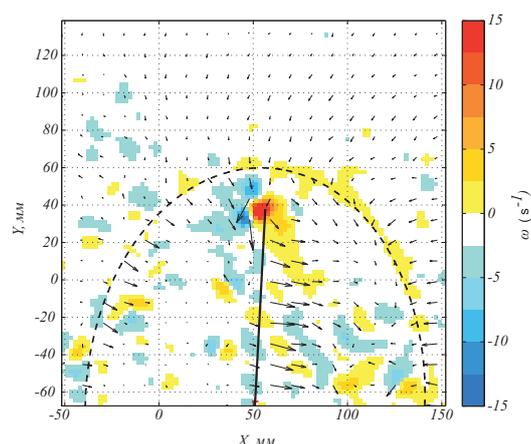


Рис. 16. Поле скорости жидкости при движении локомотивной мобильной платформы при $\Omega = 300$ об/мин

Произведено сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования движения локомотивной мобильной платформы. На рисунке 17 представлены зависимости экспериментальных и теоретических значений скорости продвижения мобильной платформы, перемещающейся за счёт вращения внутренних масс, от частоты вращения внутренних масс. Экспериментальный график нанесён с указанием интервала погрешности (среднего квадратичного отклонения измеренной величины).

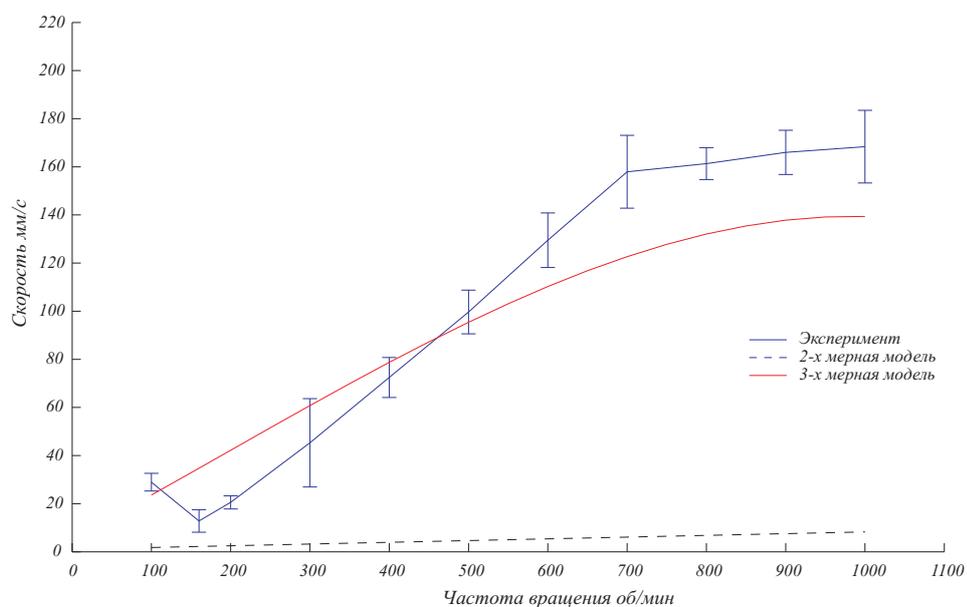


Рис. 17. Изменение средней скорости движения в зависимости от частоты вращения выходных звеньев механизма

Из графика видно, что с ростом частоты вращения внутренних масс расчётная средняя скорость продвижения устройства, полученная с использованием предложенной динамической модели движения (2), согласуется с результатами экспериментов и возрастает нелинейно. Для сравнения на рисунке 17 нанесена штриховая линия, соответствующая двумерной модели движения (величина скорости в 50 раз меньше полученных экспериментальных данных), предложенной В.В. Козловым и С.М. Рамодановым.

В результате сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования можно сделать вывод, что для исследования и качественного анализа движения локомотивной мобильной платформы, перемещающейся за счёт изменения распределения масс, можно использовать двумерную модель движения, а для количественного описания движения и построения систем управления такими устройствами можно использовать предложенную трёхмерную математическую модель.

Основные результаты работы и выводы

В работе получены следующие результаты:

1. Разработана динамическая математическая модель движения локомотивной мобильной платформы с переменным распределением масс в жидкости, учитывающая внешние силы, действующие на мобильную платформу со стороны жидкости, и позволяющая определять характер движения мобильной платформы в зависимости от параметров механизма.
2. Разработана методика динамического синтеза механизма, осуществляющего изменение распределения масс локомотивной мобильной платфор-

мы и реализующего её продвижение в жидкости. Данная методика основана на использовании универсальной структурной системы при структурном синтезе механизма и динамической математической модели движения мобильной платформы при кинематическом синтезе механизма.

3. Разработана методика структурного синтеза зубчатого механизма, осуществляющего изменение распределения масс локомотивной мобильной платформы, которая заключается в применении структурных моделей зубчатых механизмов в виде плоских стержневых механизмов с кинематическими парами IV и V классов и использовании универсальной структурной системы для формирования структурных параметров механизма. Проведены экспериментальные исследования
4. Разработана методика кинематического синтеза зубчатого механизма, осуществляющего изменение распределения масс локомотивной мобильной платформы, которая заключается в использовании структурных параметров механизма, полученных на этапе структурного синтеза и использовании динамической математической модели для определения параметров синтезируемого механизма.
5. Разработан лабораторный стенд и методика определения гидродинамических параметров тел методом их буксировки в жидкости, позволяющие определять присоединённые массы, присоединённые моменты тел в жидкости и коэффициенты гидродинамического сопротивления. Проведены эксперименты по определению гидродинамических параметров локомотивной мобильной платформы.
6. Разработан лабораторный стенд и методика исследования движения локомотивной мобильной платформы в жидкости, совмещающий в себя систему определения траектории движения исследуемого объекта Vicon Motion Capture и систему определения поля скорости жидкости вокруг исследуемого объекта Particle Image Velocimetry LaVision. Проведены экспериментальные исследования движения локомотивной мобильной платформы
7. По разработанной конструкции получен патент на полезную модель. Для разработанных программных продуктов получены свидетельства о регистрации программ ЭВМ.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Локомотивная мобильная платформа в форме эллиптического цилиндра с килем, установленным вдоль большей диагонали эллипса, и внутренним механизмом, изменяющим распределение масс системы, способна передвигаться в жидкости и полностью управляема. При начальном угле ориентации выходных звеньев механизма в крайние правое или левое положение $\beta_0 = (-\pi/2$ или $\pi/2)$ платформа может двигаться вперед или назад (при изменении направления вращения) вдоль киля. При изменении начального угла положения выходных звеньев β_0 , платформа может двигать-

ся под углом. Например, при начальной ориентации выходных звеньев ($-\pi/3$) направление движения платформы составляет ($\pi/6$).

2. Разработанная методика динамического синтеза механизма, состоящая из структурного и кинематического синтеза, может использоваться для синтеза подобных механизмов.
3. Представленные математические модели позволяют исследовать характер движения локомотивной мобильной платформы в зависимости от параметров внутреннего механизма и управляющих воздействий и определять оптимальные параметры системы. Так при анализе было выявлено, что основными параметрами механизма, влияющими на скорость продвижения платформы являются длина выходного звена, на котором закреплена подвижная масса, величина самой подвижной массы и начальное положение выходных звеньев.
4. Разработанные лабораторные стенды и методики позволяют получать достоверные результаты и пригодны для выполнения исследовательских задач.
5. Проведенные экспериментальные исследования движения локомотивной мобильной платформы показали адекватность разработанных в диссертационной работе математических моделей.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертации, опубликованные в журналах входящих в Web of Science:

1. A.I. Klenov, A.A. Kilin. Influence of vortex structures on the controlled motion of an above-water screwless robot. Regular and Chaotic Dynamics. 2016. Т. 21. № 7-8. С. 927-938.

в журналах из перечня ВАК:

2. А.И. Кленов, Е.В. Ветчанин, А.А. Килин. Экспериментальное определение присоединенных масс тела методом буксировки. Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2015. Т. 25. № 4. с. 568-582.
3. А.И. Кленов, А.А. Килин. Экспериментальное исследование динамики безвинтового надводного робота. Машиностроение и инженерное образование. 2018. № 1 (54). С. 2-7.
4. А.А. Килин, А.И. Кленов, В.А. Тененев. Управление движением тела с помощью внутренних масс в вязкой жидкости. Компьютерные исследования и моделирование. 2018 Том 10 № 4 с. 445 - 460.

По результатам диссертационного исследования получены авторские права на следующие результаты интеллектуальной деятельности:

1. Патент на полезную модель. А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, Ю.Л. Караваев, Е.В. Ветчанин, А.И. Кленов. Безвинтовой надводный робот. Патент на полезную модель №153711 (03 июля 2015г.)
2. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. Е.В. Ветчанин, В.А. Тененев, Л.Ф. Илалетдинов, А.И. Кленов. Решатель “KirchhoffSolver”. Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2015. № 11 (78). С. 32.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, Ю.Л. Караваев, Е.В. Ветчанин, А.И. Кленов. Программа для управления безвинтовым надводным роботом. № 2015615728 22 мая 2015г.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, Ю.Л. Караваев, Е.В. Ветчанин, А.И. Кленов. Программа для получения и обработки данных, определяющих положение и ориентацию мобильного робота. № 2015615732 от 22 мая 2015г.

Научное издание

КЛЕНОВ АНАТОЛИЙ ИГОРЕВИЧ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

Динамический синтез и анализ механизма, реализующего движение
локомоционной мобильной платформы в жидкости