

На правах рукописи



Илалетдинов Ленар Фаритович

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТЕЛА С ВИНТОВОЙ
СИММЕТРИЕЙ И ВНУТРЕННИМИ РОТОРАМИ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации
(в науке и технике)»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ижевск, 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор **Тененев Валентин Алексеевич**, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, профессор кафедры «Высшая математика»

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **Копысов Сергей Петрович**, ИМ УрО РАН, главный научный сотрудник;

доктор технических наук, доцент **Андреев Вячеслав Викторович**, ИГТУ имени Р. Е. Алексеева, заведующий кафедрой «Ядерные реакторы и энергетические установки»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится «12» апреля 2018 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, корпус 5.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан « » 2018 года

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д.7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.065.06
кандидат технических наук, доцент



В.Н. Сяктерев

Общая характеристика работы

Актуальность. На современном этапе развития автоматизированной техники значительное внимание уделяется разработке самоходных систем, подвижных роботов, мобильных устройств, способных выполнять широкий спектр промышленных и природоохранных задач. Различного рода беспилотные летательные аппараты, подводные самодвижущиеся устройства, роботы различного назначения становятся мощным инструментом в решении важных технических задач. Одно из наиболее значимых требований к таким устройствам заключается в реализуемости движения по заранее заданной или дистанционно контролируемой траектории.

Традиционно для создания тяговой силы в автономных робототехнических системах используются гребные винты. При этом прогнозирование движения опирается на хорошо развитую теорию гребного винта. Однако возможно создание тяги и без использования элементов внешних по отношению к корпусу. Например, за счет передвижения внутри корпуса грузиков по определенному закону или за счет вращения роторов. Принцип действия инерциоидов заключается в том, что их целенаправленное движение обеспечивается различием силы трения при прямом и обратном перемещении внутренних масс. Принцип действия таких устройств основан, во-первых, на анизотропии присоединенных масс, во-вторых, на нелинейной зависимости вязкого сопротивления от скорости. В работах академика РАН В.В. Козлова в рамках модели идеальной жидкости рассматривалось движение тела управляемое изменением положения центра масс. Было показано, что различие в коэффициентах присоединенных масс является необходимым для реализации такого способа передвижения. Управление такими устройствами является задачей нетривиальной, поскольку отсутствует прямая связь между параметрами движения тела и реакцией жидкости.

В данном исследовании рассматривается движение винтового тела с тремя лопастями в вязкой жидкости за счет вращения внутренних роторов. Такая реализация принципа перемещения обеспечивает маневренность и малое влияние на окружающую среду. Алгоритмы управления такими устройствами являются неочевидными, а алгоритмы управления движения в вязкой жидкости полностью отсутствуют. При движении в жидкости в вязкой жидкости значительное влияние на динамику движения тела оказывают вязкие силы и моменты, вычисление которых возможно только численными методами, поэтому известные модели управления, построенные в рамках теории идеальной жидкости, не применимы.

Степень разработанности. Первые исследования в области внутренних движителей были направлены на изучение собственно возможности смещения центра массы тела.

В работах О. В. Воинова показано, что тело в виде корабельного винта способно перемещаться в идеальной жидкости.

В области управления инерциоидными роботами известны работы академика РАН Черноусько Ф.Л. и его учеников. Исследованы поступательные движения твердого тела в предположении линейного и квадратичного по скорости закона сопротивления движению, описаны эксперименты, подтверждающие реализуемость такого вида передвижения тел.

В исследованиях Л. Ю. Волкова, С. Ф. Яцуна рассмотрен плавающий по сложной траектории по поверхности воды робот с двумя подвижными массами.

В работах В. А. Тененева, Е. В. Ветчанина, И. С. Мамаева изучалось управляемое движение тел различной формы с внутренними массами в постановках идеальной и вязкой жидкости. С помощью гибридных генетических алгоритмов решена задача выбора управлений, обеспечивающая движение вблизи заданной траектории.

В работах Джеймса Биггса и Вильяма Холдербаума описано устройство с видеокамерой для исследования подводных сооружений в агрессивных средах. Данный робот представляет сферу с внутренними эксцентрическими массами, благодаря которым осуществляется поворот для наведения камеры в нужную область.

В своих исследованиях Йо Цай и Цян Чжань рассматривают сферический робот, приводимый в прямолинейное движение по твердой поверхности внутренними подвижными массами. Алгоритм управления основан на применении нейронных сетей.

Анализ литературы показал, что задача об управлении движением винтового тела за счет роторов с учетом сил вязкости ранее не рассматривалась.

Объектом исследования является управление устройствами, движущимися за счет внутреннего перемещения массы.

Предмет исследования является математическая модель управления инерциоидом, движущимся в вязкой жидкости по заданной траектории.

Гипотеза. В ходе диссертационного исследования разработана модель управления движением в вязкой жидкости устройства с винтовой симметрией и внутренними вращающимися роторами.

Цель исследования и постановка задач. Целью исследования является построение модели и алгоритма управления движением в вязкой жидкости тела с винтовой симметрией за счет вращения внутренних роторов путем развития известной модели управления движением тела в идеальной жидкости с учетом нестационарности гидродинамических параметров.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Проведение серии численных экспериментов для получения гидродинамических характеристик подвижного устройства при различных видах движения.

2. Обоснование результатов численного моделирования и построение аппроксимирующих зависимостей сил и моментов, действующих на тело, от кинематических и динамических показателей с применением искусственных нейронных сетей.

3. Проведение исследования устойчивости движения тел с винтовой симметрией в вязкой и идеальной жидкостях.

4. Разработка алгоритма управления движением по заданной траектории в вязкой жидкости устройства за счет изменения скорости вращения внутренних роторов на основе модели оптимального управления.

Научная новизна.

1. На основе численного эксперимента по исследованию движения винтового тела в вязкой жидкости с применением нейронных сетей получены зависимости сил и моментов, действующих на тело со стороны жидкости, от кинематических и динамических характеристик движения.

2. Построены карты режимов устойчивости движения винтообразного тела в поле сил тяжести в идеальной и вязкой жидкости.

3. Разработан алгоритм управления движением тела с винтовой симметрией в вязкой жидкости с помощью вращения 3-х внутренних роторов.

4. С применением генетического алгоритма решена задача оптимального управления движением трехлопастного винтового тела в окрестности заданной траектории.

5. Методика построения модели управления движением инерциоидов в вязкой среде.

Теоретическая и практическая значимость работы. Автором предложена методика построения модели управления движением инерциоидов в вязкой жидкости. Известная модель для движения в идеальной жидкости переработана с учетом вязких составляющих сил и моментов, представляющих собой аппроксимирующую зависимость для многочисленных вариантов движения. Гидродинамические параметры движения тела в вязкой жидкости при различных углах Эйлера, угловых и поступательных скоростях получены численным решением уравнений Навье-Стокса.

Теоретические результаты работы могут быть использованы для разработки алгоритмов управления движением устройств с внутренними движителями и исследования их эффективности.

Результаты исследования могут лечь в основу технических решений по управлению движением устройств с подвижными внутренними массами и роторами, обеспечив этим их практическое внедрение. Предложенная модель инерциоида в виде трехлопастного гребного винта, вращающегося за счет внутренних роторов и движущегося поступательно за счет силы тяги винта, позволяет повысить его бесшумность и скрытность.

Методология и методы исследования. Модель управления движением инерциоида в вязкой жидкости получена путем развития известной модели для идеальной жидкости с учетом вязких сил и моментов. Значения сил и моментов, действующих на тело, получены численно и аппроксимированы искусственными нейронными сетями.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости гидродинамических характеристик движения тела в виде трехлопастного гребного винта (вязкие силы и моменты) от кинематических и динамических характеристик движения.

2. Режимы устойчивого движения винтообразного тела в жидкости при действии силы тяжести.

3. Алгоритм управления движением тела с винтовой симметрией в вязкой жидкости с помощью вращения 3-х внутренних роторов.

4. Модель управления движением тела в виде трехлопастного гребного винта с подвижными внутренними роторами в вязкой жидкости по заданной траектории.

5. Методика построения модели управления движением инерциоидов в вязкой среде.

Личный вклад состоит в участии в постановке и реализации целей и задач на всех этапах исследования, подготовке основных публикаций по выполненной работе, планировании и проведении численных экспериментов, в обработке и анализе полученных данных, разработке алгоритма управления. Вклад руководителя заключается в выборе направления исследования и применении методов оптимального управления.

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)» по отраслям: 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации».

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская научно-практическая конференция ИННОВАЦИИ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ (г. Ижевск, 28-30 апреля 2014 г.).

2. III Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика – 2014» (г. Ижевск, 2014 г.).

3. III Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием (г. Ижевск, 2015 г.).

4. Международная научно-практическая конференция «Научные перспективы XXI века», ООО «Наука и образование» (г. Нефтекамск, 2015 г.).

По материалам диссертации опубликовано 6 работ в изданиях, рекомендованных ВАК.

Работа выполнена в рамках Гранта РФФИ 15-08-09093-а «Исследование закономерностей движения подводных механических и робототехнических систем».

Основное содержание работы

Во введении изложена актуальность диссертационного исследования, поставлены цели и задачи, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена устройствам, движущимся за счет внутренних подвижных масс и вращения внутренних роторов. Здесь приводится история их создания и классификация по характеру движения, раскрыта практическая значимость и востребованность инерциоидов в различных сферах жизни человека. Исследуемое подвижное тело имеет форму трехлопастного винта (рисунок 1) и несет внутри корпуса три ротора (рисунок 2).

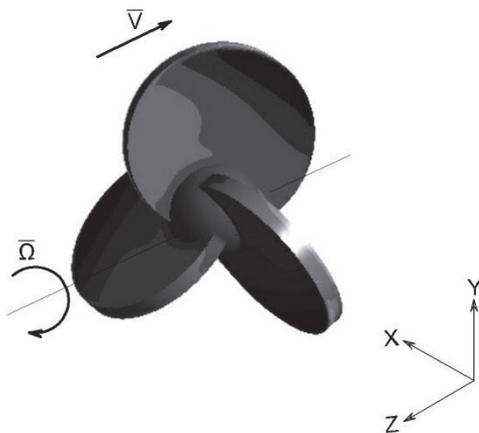


Рисунок 1 – Внешний вид подвижного тела

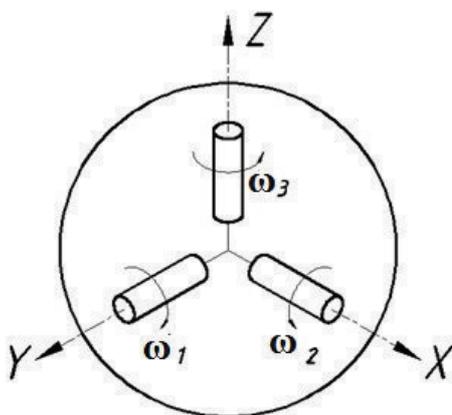


Рисунок 2 – Схема расположения вращающихся роторов внутри винта

Известные разработанные модели управления различными инерциоидами не применимы к трехмерному движению в вязкой жидкости тела в виде трехлопастного винта. Исследования для движения инерциоидов по твердым поверхностям также не могут быть использованы для жидкости с вязким трением. Однако модель управления в идеальной жидкости может быть дополнена вязкими силами и моментами, но совместное решение уравнений движения Кирхгофа и системы уравнений Навье-Стокса для трехмерной постановки весьма трудоемко. Таким образом, для управления телом в вязкой жидкости необходим расчет гидродинамических параметров его движения.

Глава 2 описывает математическую модель движения тела с внутренними подвижными роторами в вязкой жидкости. Приводится обзор популярных программных комплексов в области вычислительной гидродинамики, описываются используемые математические модели.

Матрица коэффициентов присоединенных масс определяется геометрией движущегося в жидкости тела:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_{12} \\ \Lambda_{12}^T & \Lambda_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где Λ_1 – тензор присоединенных масс;

- Λ_2 – тензор присоединённых моментов инерции;

- Λ_{12} – тензор винтовой симметрии.

Кинетическая энергия тела имеет вид:

$$T_s = \frac{1}{2} m_s (\mathbf{V}\mathbf{V}) + \frac{1}{2} (\mathbf{I}_s \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}), \quad (2)$$

где m_s – масса оболочки тела;

- $\mathbf{V} = (v_1, v_2, v_3)^T$ - вектор скорости;

- $\boldsymbol{\Omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ - вектор угловой скорости;

- \mathbf{I}_s - тензор инерции тела.

Кинетическая энергия жидкости:

$$T_f = \frac{1}{2} (\Lambda_1 \mathbf{V}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2} (\Lambda_2 \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}) + (\Lambda_{12}^T \mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}) \quad (3)$$

Суммарная кинетическая энергия системы «винт-жидкость»:

$$T = T_f + T_s = \frac{1}{2} (\mathbf{I} \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}) + (\mathbf{B} \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2} (\mathbf{C} \mathbf{V}, \mathbf{V}),$$

где \mathbf{I} - тензор инерции всей системы.

$$\mathbf{I} = \Lambda_2 + \mathbf{I}_s, \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = m\mathbf{E} + \Lambda_1, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \Lambda_{12} + m \begin{pmatrix} 0 & z_c & -y_c \\ -z_c & 0 & x_c \\ y_c & -x_c & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где x_c, y_c, z_c - компоненты радиус-вектора \mathbf{r}_c центра масс системы.

Уравнения движения системы имеют вид уравнений Кирхгофа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{v}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{v}} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{V} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{v}} = 0 \quad (11)$$

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\Omega}} = (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega} \quad (12)$$

$$\mathbf{B}^T \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\Omega}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega} + (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{V} = \mathbf{0} \quad (13)$$

Дополним эти уравнения переменными \mathbf{r} и \mathbf{Q} , описываемыми уравнениями Пуассона:

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\beta}} = \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega} \quad (14)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}^T \mathbf{V} \quad (15)$$

Векторы $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$ направлены вдоль осей неподвижной системы координат Охуз.

В гамильтоновой форме уравнения движения примут вид:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{M}} = \mathbf{M} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V}, \quad (17)$$

где $\mathbf{P} = \mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}$ - импульс;

- $\mathbf{M} = \mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}$ - кинетический момент.

При движении в вязкой жидкости появляются стационарные силы и моменты:

$$\mathbf{F}_s = (F_1; F_2; F_3) \quad (18)$$

$$\mathbf{M}_s = (M_1; M_2; M_3) \quad (19)$$

Для точного расчета параметров вязкого воздействия жидкости на произвольное тело необходимо решение полной системы уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot ((\mathbf{V} - \mathbf{W})\mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\mathbf{t}}}) + \rho \mathbf{g}, \quad (21)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{U} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}, \quad (22)$$

где $\bar{\bar{\mathbf{t}}}$ - тензор напряжений;

- \mathbf{W} - вектор переносной скорости;

- \mathbf{U} - вектор поступательной скорости тела;

- \mathbf{V} - вектор абсолютной скорости жидкости;

- \mathbf{r} - радиус-вектор точки жидкости;

- p - давление;

- ρ – плотность жидкости.

Вязкие силы и моменты вычисляются в виде следующих интегралов по поверхности тела:

$$\mathbf{F} = \int_S [-p\mathbf{E} + \mu(\nabla\mathbf{u} + {}^T\nabla\mathbf{u})] \cdot \mathbf{n} ds, \quad (23)$$

$$\mathbf{G} = \int_S \mathbf{r}_s \times [-p\mathbf{E} + \mu(\nabla\mathbf{u} + {}^T\nabla\mathbf{u})] \cdot \mathbf{n} ds, \quad (24)$$

где \mathbf{u} - вектор абсолютной скорости жидкости;

- μ - динамический коэффициент вязкости;

- S - поверхность тела.

Таким образом, уравнения движения тела в идеальной жидкости дополняются вязкими составляющими в правой части и принимают вид:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{F}_S \quad (25)$$

$$\dot{\mathbf{M}} = \mathbf{M} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V} + \mathbf{M}_S \quad (26)$$

Уравнения динамики тела в подвижной системе координат имеют вид:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{P} = \mathbf{F}_S, \quad (27)$$

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{K} + \mathbf{U} \times \mathbf{P} = \mathbf{G}_S, \quad (28)$$

$$\mathbf{P} = (\boldsymbol{\Lambda}_1 + \mathbf{M}\mathbf{E})\mathbf{U}, \quad (29)$$

$$\mathbf{K} = (\boldsymbol{\Lambda}_2 + \mathbf{I})\boldsymbol{\Omega}, \quad (30)$$

где - \mathbf{K} – кинетический момент тела;

- $\mathbf{F}_{QS}(t)$ – сила, действующая на тело со стороны жидкости;

- $\mathbf{G}_{QS}(t)$ – момент силы, действующей на тело со стороны жидкости.

Совместное решение уравнений Навье-Стокса (20, 21) и уравнений движения тела (27, 28) в трехмерной постановке является трудоемким, поэтому в данной работе предлагается отдельный расчет стационарных составляющих сил и моментов, действующих на тело со стороны жидкости при поступательном и вращательном движении, и нестационарных - через коэффициенты присоединенных масс.

Проведение серии трехмерных расчетов стационарных вязких сил и моментов при различных угловых и поступательных скоростях под разными углами между вектором поступательной скорости и осью винтовой симметрии позволит построить явную феноменологическую модель.

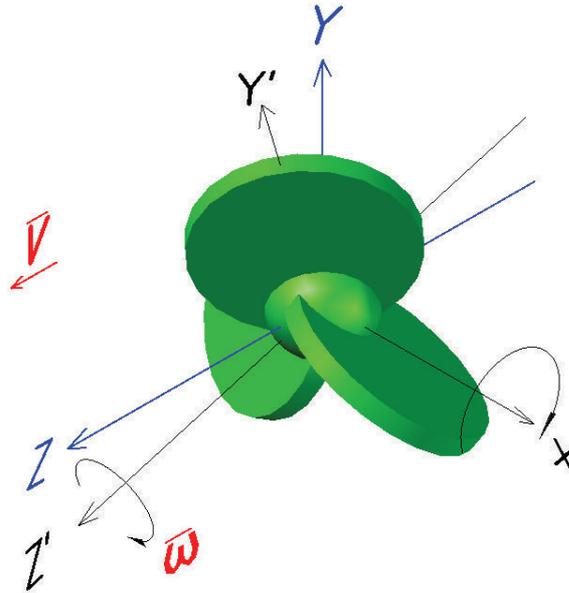


Рисунок 3 – Схема комбинируемых параметров (V , ω , углы тангажа и рыскания) для проведения серии расчетов

Проведена верификация выбранной математической модели сравнением численных результатов с известными экспериментальными данными гидродинамических параметров движения тел.

В Главе 3 приводится аппроксимация вязких сил и моментов, действующих на тело, от кинематических и динамических характеристик с применением искусственных нейронных сетей.

Изначально предварительные численные эксперименты были проведены по центральному симметричному ортогональному композиционному плану второго порядка для определения характера зависимостей вязких сил и моментов от кинематических параметров движения тела в виде трехлопастного винта в вязкой жидкости, а также формулирования диапазонов скоростей для дальнейших расчетов.

В случае движения тела в вязкой жидкости силы и моменты необходимо аппроксимировать в зависимости минимум от трех переменных: поступательная и угловая скорость, угол между вектором скорости и осью винтовой симметрии, или, по-другому, угол тангажа или рыскания (в случае симметричного тела это одно и то же). В этом случае более точную аппроксимацию способны обеспечить искусственные нейронные сети. Параметры нейронной сети приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры нейронной сети

№	Параметр	Значение
1	Количество скрытых слоев	1
2	Количество входных переменных:	4
	- угол тангажа	X_1
	- угол рыскания	X_2
	- поступательная скорость	X_3
3	- угловая скорость	X_4
	Количество нейронов	8
4	Количество сетей:	6
	- вязкие силы	F_z, F_y, F_x
	- вязкие моменты	M_z, M_y, M_x

На рисунке 4 приведена схема работы нейронной сети.

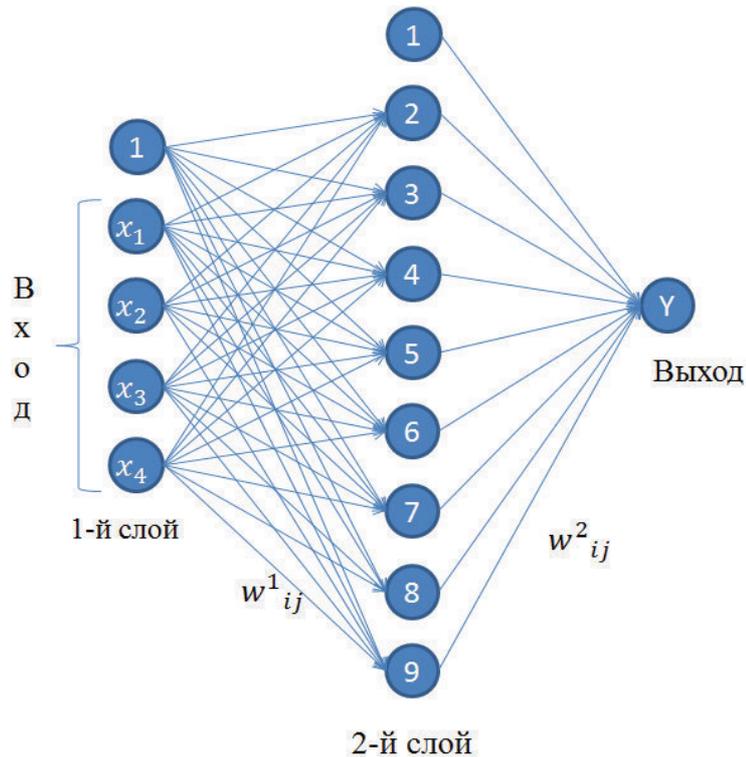


Рисунок 4 – Схема нейронной сети

Исходными данными для построения сети являются результаты численного моделирования движения тела в виде трехлопастного винта. Фрагмент программной реализации нейронной сети приведен на рисунке 5.

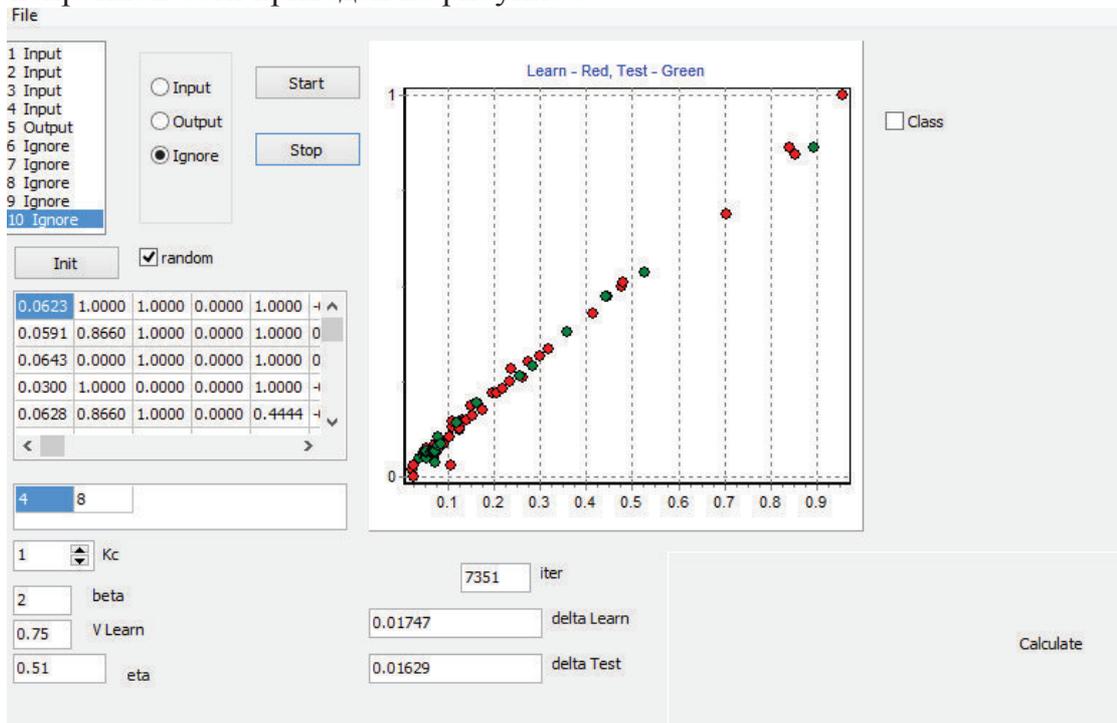


Рисунок 5 – Фрагмент программной реализации нейронной сети (сравнение аппроксимированных и экспериментальных значений)

Таким образом, аппроксимированные нейронной сетью значения вязких сил и моментов могут быть использованы для построения модели управления.

Глава 4 содержит модель управления движением трехлопастного винта в вязкой жидкости. В ее основу легли известная модель управления для идеальной жидкости и аппроксимирующие зависимости, полученные в Главе 3.

Движение тела как в идеальной, так и в вязкой жидкости носит сложный характер. Исследования показали, что под действием силы тяжести в рамках модели идеальной жидкости винт устойчиво падает, при выведении из равновесия стремится вернуться к устойчивому положению. В вязкой жидкости численные расчеты показали неустойчивость падения и возможность перехода к хаотическому режиму, что свидетельствует о потенциальных сложностях управления движением тела в вязкой жидкости.

На рисунке 6 представлена карта динамических показателей Ляпунова. Тонам красного обозначена хаотическая область: наиболее темный цвет соответствует максимальному значению старшего ляпуновского показателя, наиболее яркий красный – минимальному. Тонам серого обозначена область регулярного движения: белый цвет соответствует наибольшему значению первого отрицательного показателя, черный – наименьшему.

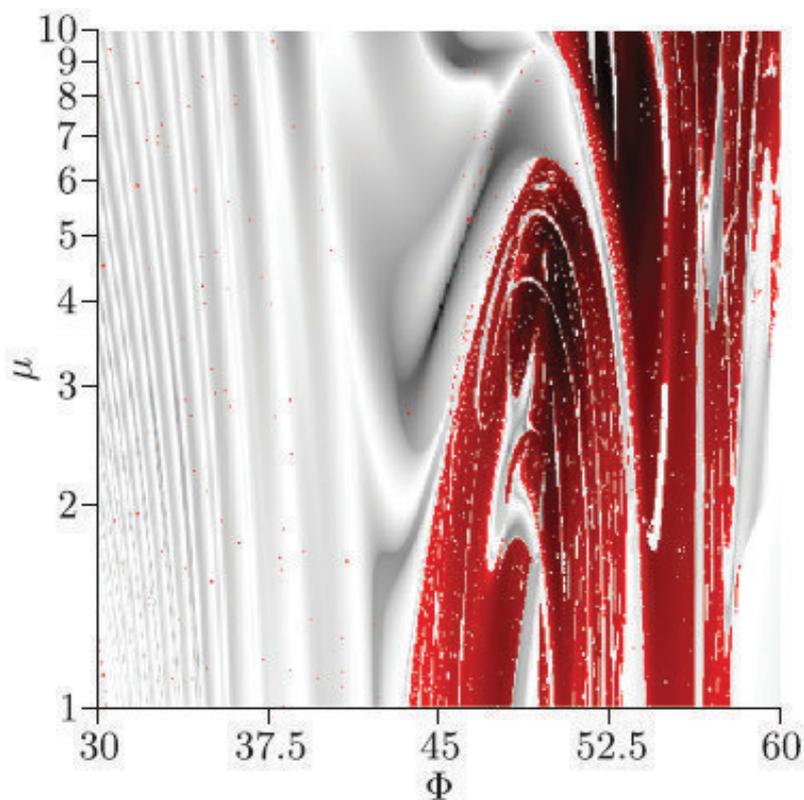


Рисунок 6 – Зависимость скорости v_1 от времени t

Уравнения движения тела с винтовой симметрией с тремя роторами внутри, за счет которых происходит управление, получаются из уравнений (2) и (3). Для этого кинетическая энергия систему «жидкость+винт» дополнена составляющими для внутренних роторов.

Кинетическая энергия ротора:

$$T_k = \frac{1}{2} m_R (\mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_k, \mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_k) + \frac{1}{2} (\mathbf{I}_k (\boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\omega}_k \mathbf{n}_k), \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\omega}_k \mathbf{n}_k) \quad (31)$$

Суммарная кинетическая энергия всей системы:

$$T = T_f + T_s + \sum_{k=1}^3 T_k = \frac{1}{2} (\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}) + (\mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2} (\mathbf{C}\mathbf{V}, \mathbf{V}) + (\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{K}(t)) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 i\boldsymbol{\omega}_k^2(t), \quad (32)$$

где $\mathbf{K}(t)$ – вектор гиросtatического момента.

$$\mathbf{K}(t) = \sum_{k=1}^3 i\boldsymbol{\omega}_k(t) \mathbf{n}_k \quad (33)$$

Уравнения движения системы приобретают вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{V} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0 \quad (35)$$

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\Omega}} = (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega} \quad (36)$$

$$\mathbf{B}^T \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \dot{\mathbf{K}}(t) = (\mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{K}(t)) \times \boldsymbol{\Omega} + (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{V} \quad (37)$$

Для \mathbf{V} и $\boldsymbol{\Omega}$ справедливы следующие уравнения:

$$\mathbf{P} = \mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{K}(t)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{P} - \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}), \quad \boldsymbol{\Omega} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{M} - \mathbf{K}(t) - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{P} \quad (38)$$

Уравнения (14) имеют шесть интегралов движения:

$$\boldsymbol{\alpha}^2 = \boldsymbol{\beta}^2 = \boldsymbol{\gamma}^2 = 1, \quad (\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = (\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\gamma}) = (\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}) = 0 \quad (39)$$

Уравнения (16, 17) допускают еще шесть интегралов:

$$(\mathbf{P}, \boldsymbol{\alpha}), (\mathbf{P}, \boldsymbol{\beta}), (\mathbf{P}, \boldsymbol{\gamma}), (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \boldsymbol{\alpha}), (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \boldsymbol{\beta}), (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \boldsymbol{\gamma}) \quad (40)$$

При движении тела в идеальной жидкости векторы \mathbf{P} и $\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}$ неизменны, при движении из состояния покоя равны нулю.

Уравнения для скоростей примут вид:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{C}^{-1} \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega} \quad (41)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = -(\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{K}(t) \quad (42)$$

Окончательная система уравнения имеет вид:

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = (\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\Omega}_0) f(t),$$

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\Omega}_0) f(t),$$

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}} = (\boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}_0) f(t),$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_0 f(t) \quad (43)$$

$$d\tau = f(t) dt \quad (44)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\tau} = (\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\Omega}_0),$$

$$\frac{d\boldsymbol{\beta}}{d\tau} = (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\Omega}_0),$$

$$\frac{d\boldsymbol{\gamma}}{d\tau} = (\boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}_0),$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_0 \quad (45)$$

Для рассмотрения задачи управления будет задана конечная точка \mathbf{R}^0 за время T_0 . Время выразим как $\tau = \frac{T_0}{\pi} (1 - \cos(\pi \frac{t}{T_0}))$.

$$\mathbf{R}^0 = \frac{v \cdot \boldsymbol{\Omega}}{\Omega^2} \boldsymbol{\Omega} \tau_0 + \frac{\boldsymbol{\Omega} \times v}{\Omega^2} (1 - \cos \Omega \tau_0) + \frac{\boldsymbol{\Omega} \times (v \times \boldsymbol{\Omega})}{\Omega^3} \sin \Omega \tau_0, \quad (46)$$

где $\tau_0 = \tau(T_0) = \frac{2T_0}{\pi}$.

В результате получаем систему из 18 уравнений, которую решаем численно при известных векторах гиростатического момента $\mathbf{K}(t)$, определяемых скоростью роторов.

Среди возможных решений уравнения (23) необходимо найти те, которые дают минимальное отклонение траектории движения от прямой линии.

$$F(\boldsymbol{\Omega}) = \int_0^{T_0} \left| r(t) - \mathbf{R}^0 \frac{t}{T_0} \right| dt \rightarrow \min \quad (47)$$

Для решения поставленной задачи применен генетический алгоритм.

Алгоритм управления формулируется следующим образом:

1. Траектория аппроксимируется линией с узлами $\mathbf{R}_k^0, k = \overline{0, N_{step}}, |\mathbf{R}_{k+1} - \mathbf{R}_k| = \Delta S_0$.

2. Полагается $\mathbf{R}_0^0 = 0, \Delta r_0 = \mathbf{R}_1^0$. Формируется матрица направляющих косинусов и положение конечной точки траектории при аппроксимированном управлении:

$$\omega(\Delta r_0) \rightarrow Q_1, r_1$$

Пусть \mathbf{D}_k – матрица текущей ориентации подвижной системы координат.

3. Для последующих точек рассчитываем следующее.

Направление движения из текущей точки \mathbf{R}_k в заданную точку \mathbf{R}_{k+1}^0 :

$$\Delta r_k = D_k^T (\mathbf{R}_{k+1}^0 - \mathbf{R}_k)$$

Конечная точка траектории и матрица направляющих косинусов:

$$\omega(\Delta r_k) \rightarrow Q_{k+1}, r_{k+1}$$

Конечное положение на отрезке $\mathbf{R}_k, \mathbf{R}_{k+1}$:

$$\mathbf{R}_{k+1} = \mathbf{D}_k r_{k+1} + \mathbf{R}_k$$

Матрица текущей ориентации подвижной системы координат:

$$\mathbf{D}_{k+1} = \mathbf{D}_k \mathbf{Q}_{k+1}$$

Наглядно последовательность управления представлена на рисунке 7.

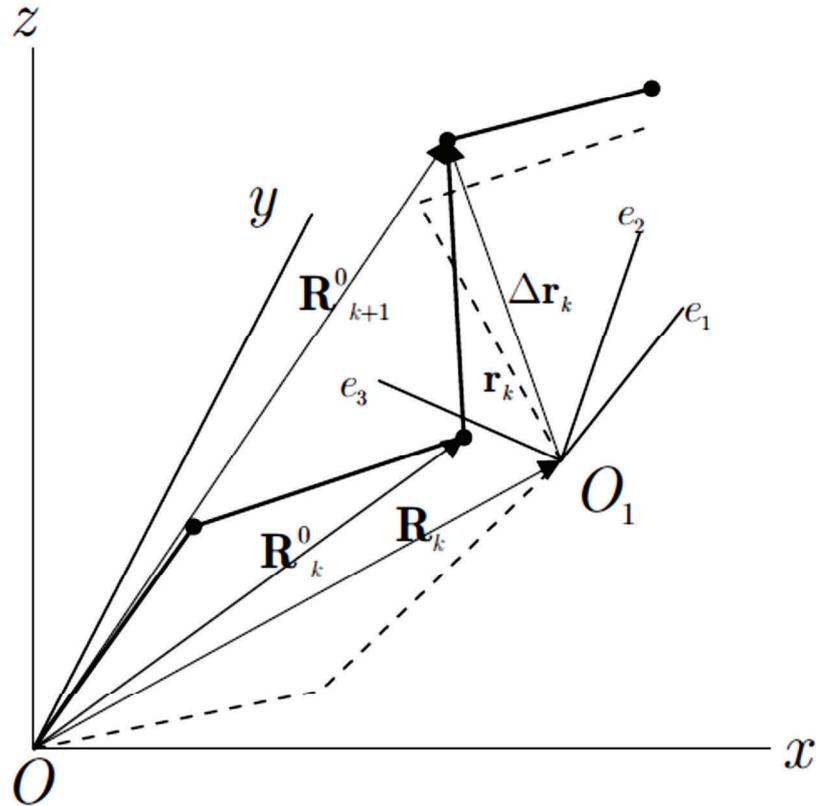


Рисунок 7 – Схема управления движением по траектории

Сплошная линия – заданная траектория, пунктирная – полученная при аппроксимированном управлении. Заданная траектория и расчетная не совпадают из-за наличия погрешности аппроксимации управлений на каждом отрезке. Погрешности в задании скоростей вращения роторов приводят к отклонению точки \mathbf{R}_k от \mathbf{R}_k^0 на величину $k = |\mathbf{R}_k^0 - \mathbf{R}_k|$.

При начальных условиях $\mathbf{P}(0)=0$, $\mathbf{M}(0)=0$ импульс и кинетический момент для всего времени остаются равными нулю $\mathbf{P}(t)=0$, $\mathbf{M}(t)=0$ и скорости движения тела выражаются через скорости вращения роторов:

$$\boldsymbol{\Omega} = -(\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{K}(t) \quad (48)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B} \boldsymbol{\omega} \quad (49)$$

Вращение внутренних роторов приводит к вращению тела любой формы, как это следует из (48). Поступательное движение возможно только при ненулевой матрице \mathbf{B} (49). В случае вязкой жидкости условие $\mathbf{P}(t)=0$, $\mathbf{M}(t)=0$ не выполняется, и тело будет двигаться и при остановке роторов.

Преобразуем уравнения (38, 39), при неизменных матрицах \mathbf{C} , \mathbf{B} , \mathbf{I} получим:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{C} \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{B} \dot{\boldsymbol{\omega}}$$

$$\dot{\mathbf{M}} = \mathbf{B}^T \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \dot{\mathbf{K}}(t)$$

Разрешив эту систему уравнений относительно производных скоростей $\dot{\mathbf{V}}$, $\dot{\boldsymbol{\omega}}$, получим систему дифференциальных уравнений для вектора скоростей $\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \mathbf{V} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}$:

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{Q}, \quad (50)$$

где $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{I} \end{pmatrix}$ – блочная матрица;

$$\text{вектор } Q = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{P}} \\ \dot{\mathbf{M}} - \dot{\mathbf{K}}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{P} \times \boldsymbol{\omega} + \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \times \boldsymbol{\omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V} - \dot{\mathbf{K}}(t) + \mathbf{G} \end{pmatrix}$$

Для определения траектории тела при его движении в неподвижной системе координат OXYZ система дифференциальных уравнений (50) дополняется следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{\alpha}}{dt} &= \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\omega} \\ \frac{d\boldsymbol{\beta}}{dt} &= \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\omega} \\ \frac{d\boldsymbol{\gamma}}{dt} &= \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\omega} \\ \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= (\mathbf{V}, \boldsymbol{\alpha}) \\ \frac{d\mathbf{Y}}{dt} &= (\mathbf{V}, \boldsymbol{\beta}) \\ \frac{d\mathbf{Z}}{dt} &= (\mathbf{V}, \boldsymbol{\gamma}) \end{aligned} \quad (51)$$

и начальными условиями:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}^0, \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}^0, \boldsymbol{\alpha}(0) = \boldsymbol{\alpha}^0, \boldsymbol{\beta}(0) = \boldsymbol{\beta}^0, \boldsymbol{\gamma}(0) = \boldsymbol{\gamma}^0, \mathbf{R}(0) = \begin{pmatrix} X(0) \\ Y(0) \\ Z(0) \end{pmatrix} = \mathbf{R}^0$$

Где $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$ - направляющие косинусы, образующие матрицу перехода от неподвижной системы координат Oxyz к подвижной $O_1x_1y_1z_1$: $\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\alpha} \\ \boldsymbol{\beta} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{pmatrix}$.

Задача (4.57, 4.58) о расчете движения винтообразного тела в вязкой жидкости, индуцируемого вращением внутренних роторов, становится замкнутой. Управление таким движением является нетривиальной проблемой. Заданную траекторию можно аппроксимировать кусочно-непрерывными прямыми отрезками. Рассмотрим задачу нахождения управления движением из начала прямого отрезка \mathbf{R}^0 в конечную точку отрезка \mathbf{R}^k за заданное время T_k . Потребуем минимального отклонения δ центра масс тела (точка O_1) от заданного прямолинейного отрезка:

$$\delta(t) = \frac{|(\mathbf{R}^k - \mathbf{R}^0) \times (\mathbf{R}(t) - \mathbf{R}^0)|}{|\mathbf{R}^k - \mathbf{R}^0|} \quad (52)$$

Минимизируемый функционал имеет следующий вид:

$$\Phi(\boldsymbol{\Omega}) = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} \delta(t, \boldsymbol{\Omega}) dt \rightarrow \min \quad (53)$$

при условии попадания в конечную точку

$$|\mathbf{R}(T_k) - \mathbf{R}^k| = 0 \quad (54)$$

Функционал (53), ограничение (54) и уравнения движения представляют собой задачу оптимального управления типа Лагранжа. Дифференциальные уравнения движения решаются численно с применением метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

Оператор численного нахождения траектории тела при заданном законе скоростей вращения роторов $\boldsymbol{\Omega}(t)$:

$$\mathbf{R}(t_n) = L(\boldsymbol{\Omega}) \quad (55)$$

где t_n - узлы конечно-разностной сетки по времени.

Законы изменения скоростей вращения роторов во времени имеют вид:

$$\Omega_i(t) = \begin{cases} \Theta_i \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{\Delta T_i}\right) & | t \leq \Delta T_i \\ \Theta_i & | \Delta T_i \leq t \leq T_k - \Delta T_i \\ \Theta_i \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{t - T_k + \Delta T_i}{\Delta T_i}\right) & | T_k - \Delta T_i \leq t \leq T_k \end{cases} \quad (56)$$

В этом случае вектор управляющих воздействий \mathbf{W} будут определяться параметрами $\Theta_i, \Delta T_i, i = 1, 2, 3$ и $\mathbf{W} = (\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3)^T$.

Задача оптимального управления редуцируется к конечномерной задаче математического программирования с целевой функцией:

$$\Phi(\mathbf{W}) \rightarrow \min \quad (57)$$

и ограничениями:

$$\begin{aligned} |L(\mathbf{\Omega}(\mathbf{W}))|_{t=T_k} - \mathbf{R}^k| &= 0 \\ |\Theta_i| &\leq \Theta^{\max} \end{aligned} \quad (58)$$

$$0 < \Delta T_i \leq 0.5T_k, i = 1, 2, 3.$$

Для численного решения задачи (30) с ограничениями (31) применен базовый генетический алгоритм.

Проекция траектории тела на плоскость OXY показана на рисунке 8.

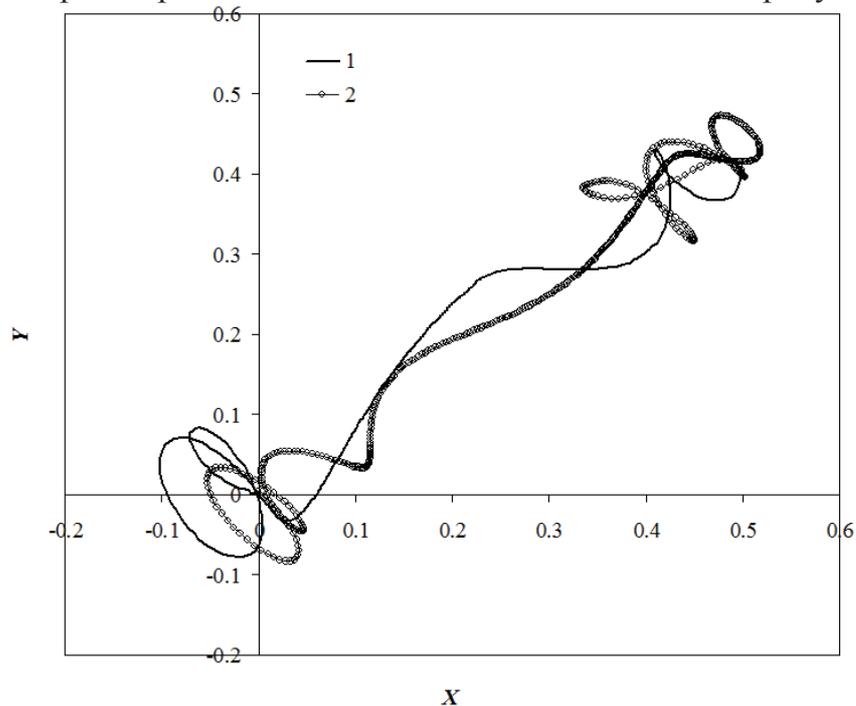


Рисунок 8 – Проекция траектории тела на плоскости OXY

Траектория под номером 1 соответствует движению от точки \mathbf{R}^0 до точки \mathbf{R}^k , под номером 2 - в обратном направлении. Особенностью траекторий является сложное перемещение тела в начале и в конце движения. Это связано с ориентацией тела в нача-

ле движения. В конце движения для достижения точки R^k с заданной точностью 0,005 также осуществляется маневрирование.

Разработанный алгоритм управления движением жесткого винтообразного тела в вязкой жидкости посредством изменения скоростей вращения внутренних роторов позволяет осуществлять перемещение тела в заданную точку с минимальным отклонением от прямолинейного отрезка.

Заключение

В ходе диссертационного исследования с помощью искусственных нейронных сетей на основе серии расчетов для различных режимов движения тела построена зависимость вязких сил и моментов, действующих на тело. С помощью найденных аппроксимаций сил и моментов построена модель управления движением тела в вязкой жидкости. Установлено, что рассчитанные численно гидродинамические параметры движения тела в вязкой жидкости с приемлемой точностью аппроксимируются нейронными сетями. Такой подход применим и для других прикладных задач, связанных с движением твердого тела в вязкой жидкости.

Впервые разработана модель управления движением тела с внутренними подвижными роторами в вязкой жидкости путем интеграции известной модели для идеальной жидкости с вязкими составляющими. Расчеты показали, что данный подход обеспечивает высокую точность движения вдоль заданной траектории. Тело совершает вращательное движение за счет роторов и поступательное за счет силы тяги. Возможность управления предложенной схемой движения имеет больше значения для проектирования и практического применения инерциоидов.

Выводы:

1. На основе обработки результатов численного эксперимента по движению винтового тела в вязкой жидкости с применением нейронных сетей получены аппроксимационные зависимости сил и моментов, действующих на тело со стороны жидкости, от кинематических и динамических характеристик движения. Разброс на проверочной выборке в пределах 0.1-0.2%.

2. Анализ карты режимов для углов поворота лопастей 30-60 градусов показал, что при свободном движении винта в поле силы тяжести реализуются либо асимптотически устойчивые регулярные режимы движения, либо хаотические.

3. Разработан алгоритм управления движением тела с винтовой симметрией в вязкой жидкости с помощью изменения скорости вращения 3-х внутренних роторов, установленных на главных осях.

4. С применением генетического алгоритма решена задача оптимального управления движением трехлопастного винтового тела в окрестности заданной траектории. Среднеквадратичное отклонение от заданной траектории от 2% до 5%.

5. Результаты исследования могут лечь в основу технических решений по управлению движением в жидкости винтообразных устройств, движущихся за счет вращения внутренних роторов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации
Перечень ВАК

1. Илалетдинов Л.Ф. Параметрическое моделирование сжигания древесного генераторного газа с помощью пакета прикладных программ FlowVision» / Научно-практический журнал «Интеллектуальные системы в производстве». – 2013. - №1.

2. Илалетдинов Л.Ф., Ветчанин Е.В. Расчет параметров движения инерциоидного робота в вязкой жидкости для построения модели управления / Интеллектуальные системы в производстве, 2014, №1.

3. Тененев В.А., Ветчанин Е.В., Илалетдинов Л. Ф. Аппроксимация управления движением в жидкости тела с винтовой симметрией с внутренними роторами / Интеллектуальные системы в производстве, 2014, №2.

4. Тененев В. А., Илалетдинов Л. Ф., Пономарев М. И. Планирование численного эксперимента для определения гидродинамических характеристик тела с винтовой симметрией / Интеллектуальные системы в производстве, 2014, №2.

5. Тененев В.А., Ветчанин Е.В., Илалетдинов Л.Ф. Хаотическая динамика в задаче о падении тела винтовой формы в жидкости / Нелинейная динамика. 2016. Т. 12. № 1. С. 99–120. SCOPUS.

6. Тененев В.А., Илалетдинов Л.Ф. Решение задачи управления движением тела с винтовой симметрией в вязкой жидкости / Интеллектуальные системы в производстве №2, 2016 г.

Прочие:

7. Valentin A. Tenenev, Evgenii V. Vetchanin, Lenar F. Ilaletdinov «Chaotic dynamics in the problem of free fall of a three-bladed screw in a fluid» // Sixth International Conference "Geometry, Dynamics, Integrable Systems - GDIS 2016": Book of abstracts. - P.62-63.

8. Илалетдинов Л.Ф. Определение движущей силы инерциоидного робота в виде гребного винта с подвижными внутренними массами / Сборник статей Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации в науке, технике и технологиях», 2014г.

9. Ветчанин Е.В., Тененев В.А., Илалетдинов Л.Ф., Кленов А.И. Решатель Kirchhoff Solver. Свидетельство о регистрации № 21342.Дата регистрации: 03 ноября 2015 г.