

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Илалетдинова Ленера Фаритовича

«Разработка модели управления движением тела с винтовой симметрией и внутренними роторами в вязкой жидкости», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации(в науке и технике)».

Актуальность темы диссертационного исследования

Представленная работа посвящена созданию новой математической модели управления инерциоидом, движущимся в вязкой жидкости по заданной траектории.

В диссертационном исследовании рассматривается вращательное движение внутренних роторов тела с винтовой симметрией, которое приводит к его перемещению в вязкой жидкости. Реализация принципа перемещения за счет внутренних подвижных масс обеспечивает маневренность и малое влияние на окружающую среду. В случае движения в вязкой жидкости значительное влияние на характер и траекторию движения тела оказывают вязкие силы и моменты, вычисление которых возможно только численными методами, поэтому известные модели управления для идеальной жидкости не применимы. Принципы управления подобными техническими устройствами являются неочевидными, а алгоритмы управления движения в вязкой жидкости неизвестны.

Для управления движением телом в вязкой жидкости необходимо вычисление гидродинамических параметров его движения, которые могут получены на основе решение сопряженной задачи гидродинамики и уравнений движения твердого тела. Получение решений подобных задач, относящихся к задачам FSI (Fluid Structure Interaction) имеет высокие вычислительные затраты в трехмерной постановке и для построения модели управления может оказаться неприемлим. В этом случае, независимое решения серии задач по определению гидродинамических параметров с последующим их представлением в виде модели намного упрощает определение сил вязкого сопротивления.

Таким образом, разработка новых принципов организации перемещений тел с внутренними массами, движущимися по замкнутым траекториям и управления их движением в вязкой жидкости является **актуальными направлениями исследований**.

Общая характеристика, содержание и основные результаты работы

Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертациям, и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения.

Во **введении** дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, определяются цели и задачи диссертации, представляются

имени М.Т. Калашникова
28 03 2018
3х.№ 07/1157

научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описываются методы исследования, формулируются основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора.

В **первой главе** представлен обзор устройств, движущиеся за счет подвижных внутренних масс, размещенных в корпусах (инерциоиды) и которые интегрируются в гидросистемы не нарушая ее внутренних процессов и не образуя волн. Как справедливо отмечено, автором большинстве своем известные исследования направлены лишь на изучение собственно возможности смещения центра массы тела, что конечно же недостаточно для практического применения устройств с внутренними подвижными массами. Практическое применение таких устройств в вязкой жидкости невозможно без управления их движением, сложность которого, в свою очередь, обусловлена отсутствием прямой связи между параметрами движения тела и реакцией жидкости. Модели управления подобными системами должны обеспечить движение в желаемом направлении и с необходимой скоростью и является главной проблемой практического применения инерциоидов в воде.

Во **второй главе** рассматриваются и сравниваются постановки задач моделирования гидродинамики вокруг тел с винтовой симметрией, численные алгоритмы и программные реализации. Во многом глава содержит вспомогательный материал.

В диссертационной работе в качестве базового обоснованно выбран программный продукт Ansys CFX. На нескольких тестах показана возможность обеспечения решения задач с турбулентными течениями для тел с винтовой симметрией с приемлимой точностью и скоростью сходимости на скользких неструктурированных сетках для получения модели вязких сил и моментов действующих на винтовое тело.

Третья глава посвящена анализу и численным экспериментам по обтеканию тел с винтовой симметрией в виде сферы и трех дисков в вязкой жидкости с различными угловыми и линейными скоростями, что позволило построить зависимости вязких сил и моментов от кинематических параметров движения тела, которые в дальнейшем использованы при разработке модели управления.

Для аппроксимации полученных численных данных для трехлопастного винта по вязким силам и моментам построена нейронная сеть. Двухслойная нейронная сеть обучена на ограниченной выборке данных, поскольку численные результаты параметров движения тела с винтовой симметрией в вязкой жидкости определены лишь для определенных режимов и сочетаний скоростей, углов наклона и т. д.

В третьем параграфе сформулирован критерий оптимальности управления движением — минимальное отклонение траектории движения от отрезка прямой между начальной и конечной точкой.

Четвертая глава посвящена непосредственно алгоритмам управлению движением тела с винтовой симметрией в жидкости. Гидродинамическое сопротивление винтового тела определяется поступательной и угловой скоростями, а для описания вязкого трения использована феноменологическая модель, включающая

коэффициенты сопротивления. Коэффициенты определялись на численных результатах решения уравнений Навье-Стокса при различных скоростях движения винта. Полученные зависимости представлены например на рис. 4.3. Вязкие силы и моменты зависят от формы тела и кинематики его движения, так винтовая форма создает дополнительное воздействие и при свободном движении такое тело не способно сохранять устойчивость. Для идеальной жидкости установлено, что винт падает равноускоренно и устойчиво. В случае вязкой жидкости винт под действием силы тяжести падает хаотично либо по сложной траектории. В работе представлены результаты численных экспериментов, показывающие что рассматриваемые тела в реальной жидкости неспособны перемещаться по необходимой траектории самостоятельно без управления.

Далее формулируется задача управления движением тела с винтовой симметрией и внутренними подвижными массами. Выводятся уравнения движения тела с винтовой симметрией с тремя роторами внутри, за счет которых происходит управление. В результате получена система из восемнадцати уравнений, решаемая численно при известных векторах, определяемых скоростью роторов. Дифференциальные уравнения движения интегрируются численно с применением метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

Рассматривается движения тела в заданную конечную точку за определенное время с переменными угловыми скоростями вращения роторов.

Задача оптимального управления в работе сводится к конечномерной задаче математического программирования с целевой функцией. Для решения поставленной задачи управления построен и реализован генетический алгоритм.

Приведены примеры расчета управления при движении винтообразного тела из начальной точки в конечную и обратно. Особенностью полученных траекторий движения является сложное перемещение винта в начале и в конце движения, что связано с маневрированием.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты выполненной работы, рекомендации по их использованию и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

В диссертации получены следующие **основные результаты**:

1. Впервые разработана модель управления движением винтового тела с внутренними подвижными массами с учетом сил сопротивления в вязкой жидкости.

2. Построены зависимости сил и моментов, воздействующих на тело со стороны жидкости, от кинематических и динамических характеристик движения на основе нейронных сетей.

3. Анализ сил вязкого сопротивления позволил выявить режимы устойчивого движения при различных углах поворота лопастей винта в поле сил тяжести.

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

установленных на главных осях и решена задача оптимального управления движением трехлопастного винтового тела в окрестности заданной траектории.

Научная новизна и достоверность положений, выводов и рекомендаций

На основе численного эксперимента по исследованию движения винтового тела в вязкой жидкости с применением нейронных сетей разработана модель сил и моментов, действующих на тело со стороны жидкости, от кинематических и динамических характеристик движения и позволяющие сократить вычислительные затраты на решение сопряженной задачи взаимодействия тела и вязкой жидкости.

Построен алгоритм управления движением тела с винтовой симметрией в вязкой жидкости с помощью вращения 3-х внутренних роторов и решена задача оптимального управления его движением в окрестности заданной траектории.

Теоретические результаты работы могут быть использованы для моделирования управления принципиально новыми устройствами, движущимися за счет подвижных внутренних масс в жидкости, для исследования их эффективности. Предложенная модель инерциоида в виде трехлопастного винта, вращающегося за счет внутренних роторов и движущегося поступательно за счет силы тяги винта, позволяет повысить его бесшумность и скрытность.

Результаты диссертации научно обоснованы и прошли достаточно полную апробацию на научных семинарах, всероссийских конференциях. Достоверность научных результатов подтверждается сравнением с известными теоретическими и экспериментальными данными, а также тем, предложенный в диссертации математический аппарат включает комбинации методов, с успехом применявшихся ранее в других приложениях. Подход верифицирован по известным из литературы данным. Разработанные алгоритмы и программные решения протестированы на широком круге модельных задач.

Замечания по работе

1. На стр. 64 непонятна фраза "число $Re=1000-5000$ ", что обеспечивает высокую скорость и точность расчета.
2. На стр. 86 на первом шаге алгоритма "Подбираем вручную весовые коэффициенты ..." требуется пояснение из каких соображений?
3. Рис. 3.23 сравнение значений каких переменных выполнено?
4. На стр. 96 в соотношениях (4.12)-(4.13) и расшифровке векторов используется Омега большое и Омега маленькое?
5. Общее замечание к главе 4 состоит в том, что не приведены основные параметры численного эксперимента: геометрия, массы винтового тела и роторов, начальное положение и ориентация, составляющие вычислительных затрат и т. д.
6. На рис. 4.3. представлены силы сопротивления поступательному и вращательному движению. Неясно как проводилась обработка численных экспериментов и для каких случаев движения.

7. На рис. 4.12 непонятна подпись к рисунку: представлена угловая скорость ротора или тела?

8. Оформление диссертационной работы: формулы, графики и их подписи выполнены небрежно и порой не дают полного представления о приводимых зависимостях (вектора и компонент вектора), во многих местах нет точек, запятых.

Перечисленные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационное исследование Иллалетдинова Л.Ф. представляет собой законченную работу, выполненную на высоком научном уровне. Результаты диссертации являются новыми, получены автором лично. Все основные положения диссертации опубликованы в печатных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ или в одну из баз данных и систем цитирования Web Of Science или Scopus. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Диссертационная работа Иллалетдинова Л.Ф. «Разработка модели управления движением тела с винтовой симметрией и внутренними роторами в вязкой жидкости» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук «Положением о порядке присуждения ученых степеней». Иллалетдинов Л.Ф. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике)».

Официальный оппонент
главный научный сотрудник
Института механики УдмФИЦ УрО РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор

Копысов Сергей Петрович

УдмФИЦ УрО РАН,
426067, Россия, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
Тел.: 8-3412-214583,
E-mail: s.kopysov@gmail.com
« » 2018 г.

Подпись С.П. Копысова удостоверяю.
Начальник отдела кадров
УдмФИЦ УрО РАН



Гуливер Виктория Викторовна