

**Автономная некоммерческая организация высшего образования  
«Университет Иннополис»**

**АННОТАЦИЯ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
(БАКАЛАВРСКУЮ РАБОТУ)  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ  
09.03.01 – «ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»**

**НАПРАВЛЕННОСТЬ (ПРОФИЛЬ) ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ  
«ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»**

**Тема**

**Улучшенное управление робототехническими системами в  
скользящих режимах на основе выпуклой оптимизации**

**Выполнил**

**Ярыева Динара Рифхатовна**

ПОДПИСЬ

Иннополис, Innopolis, 2024

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Обзор литературы</b>	<b>6</b>
2.1	Физические характеристики подводных аппаратов . . . . .	6
2.2	Математическое моделирование . . . . .	7
2.3	Система управления . . . . .	7
2.4	Заключение . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Моделирование и управление подводными аппаратами</b>	<b>9</b>
3.1	Математическое моделирование . . . . .	9
3.2	Проектирование систем управления . . . . .	12
3.2.1	Обратная динамика . . . . .	12
3.2.2	Управление в скользящем режиме . . . . .	13
3.2.3	Управление на основе оптимизации . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Результаты</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Заключение</b>	<b>19</b>
	<b>Список использованной литературы</b>	<b>21</b>

## **Аннотация**

Управление телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом (ТНПА) в подводной среде является сложной задачей из-за их нелинейности и непредсказуемости водной среды. В данной работе исследуется усовершенствование управления в скользящем режиме (SMC) для ТНПА с помощью выпуклой оптимизации для улучшения стабильности и производительности при уменьшении эффекта дребезга. Разработана комплексная математическая модель ТНПА, учитывающая динамические и кинематические свойства, а также неопределенность окружающей среды. Разработана оптимизированная схема SMC, включающая выпуклую оптимизацию для динамической настройки параметров управления, что позволяет минимизировать дребезжание и повысить устойчивость. Проверка с помощью моделирования демонстрирует значительные улучшения в отслеживании траектории и отклонении возмущений. Усовершенствованная схема SMC доказала свою эффективность при моделировании, что подтверждает ее практическую применимость. Данное исследование способствует развитию подводной робототехники, предоставляя надежную стратегию управления, которая повышает стабильность и эффективность ТНПА, обеспечивая выполнение сложных подводных задач, таких как инспекция трубопроводов и мониторинг окружающей среды.

# Глава 1

## Введение

Роботизированные системы, в частности подводные аппараты, такие как телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), привлекли значительное внимание в последние годы благодаря их широкому применению в промышленной, научной и военной сферах. ТНПА используются для различных целей, включая подводную разведку, инспекцию трубопроводов и мониторинг окружающей среды. Однако управление этими аппаратами является сложной задачей из-за нелинейной и непредсказуемой природы подводной среды. Поэтому эффективные стратегии управления необходимы для обеспечения стабильности и эффективности ТНПА в таких условиях.

Стратегии управления ТНПА эволюционировали, при этом надежные методы управления, такие как управление в скользящем режиме (SMC), получили широкое распространение благодаря своей эффективности в работе с нелинейностью и неопределенностью системы. Несмотря на эти достижения, существующие методы управления для ТНПА сталкиваются с рядом проблемами. Традиционный метод скользящего режима, хотя и является надежным, часто приводит к явлению известному как «дребезг», который может приве-

сти к износу механических компонентов и снижает общую эффективность системы управления. Кроме того, многие алгоритмы управления с трудом адаптируются к изменениям подводной среды в реальном времени, таким как переменная сила течения и непредвиденные препятствия. Эти ограничения подчеркивают необходимость в улучшенных стратегиях управления, которые могут обеспечить как устойчивость, так и адаптивность.

Основной целью данного исследования является улучшение управления телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА) путем разработки улучшенной схемы управления в скользящем режиме (SMC), использующей методы выпуклой оптимизации. Данная дипломная работа направлена на решение существующих проблем дребезга и адаптивности путем динамической настройки параметров управления с помощью выпуклой оптимизации.

## Глава 2

# Обзор литературы

### I Физические характеристики подводных аппаратов

Согласно [1], механическая структура ТНПА включает камеру наблюдения, датчики для сбора навигационных данных и актуаторы для управления направлением. Сравнительное исследование [2] показало, что на работу ТНПА влияют точность сенсорных систем и конструкция движителей. Непредсказуемость подводных течений, сопротивления и динамики плавучести также влияет на работу ТНПА, усложняя моделирование.

Исследования [3], [4] показали важную роль ТНПА в промышленных приложениях, морской разведке нефти и газа, патрулировании и наблюдении. Следовательно, система управления должна отслеживать положение и удерживать станцию в условиях неопределенности параметров и окружающей среды.

## II Математическое моделирование

Тор И. Фоссен [5] описал основы математического моделирования морских аппаратов. ТНПА моделировался как единое жесткое тело (SRB), упрощая моделирование и отражая динамику системы.

Кинематически ТНПА имеет шесть степеней свободы (DoFs). Ориентация, выраженная в углах поворота, может привести к сингулярности, что решается кватернионным представлением [6]. Динамика описывается Вторым законом Ньютона и уравнением Эйлера-Лагранжа, формируя набор нелинейных уравнений.

Некоторые аспекты динамики ТНПА требуют эмпирических оценок из-за их сложности [5], [7]. При движении через вязкую среду инерция окружающей жидкости и демпфирование воды играют важную роль. Также принимаются во внимание силы плавучести и гравитации. В исследовании [7] говорится, что создание точной модели подруливающего устройства сложно из-за различных факторов, таких как модели двигателей и гидродинамические эффекты.

При таких упрощениях система управления не может самостоятельно обеспечить эффективное управление такой неопределенной динамикой. В результате для точного отслеживания положения ТНПА необходима надежная система управления.

## III Система управления

Управление ТНПА включает стабилизацию аппарата и выполнение инструкций оператора. Система управления должна справляться с возмуще-

ниями, вызванными изменениями параметров и окружающей среды [4], [8].

Основные проблемы управления ТНПА:

1. Немоделируемые элементы, такие как дополнительная масса и гидродинамические коэффициенты.
2. Сильно нелинейная динамика подводной среды.

Подход обратной динамики [9] прост, но ограничен зависимостью от точных параметров модели и неспособностью справляться с возмущениями. Классическим подходом является управление в скользящем режиме (SMC), которое было представлено В. И. Уткиным [10]. Однако стандартное SMC вводит высокочастотные сигналы, которые могут вызвать переключение актуатора и, следовательно, сократить срок его службы [11], [12]. Выпуклая оптимизация позволяет достичь баланса между эффективностью управления и долговечностью привода, повышая надежность и устойчивость к возмущениям [13], [14].

## IV Заключение

Обзор литературы рассмотрел общие характеристики, математическое моделирование и решения по управлению подводными аппаратами. Обзор выявил пробел в надежном управлении ТНПА, особенно в условиях неопределенности параметров и окружающей среды. Первоначальная схема управления в скользящем режиме обеспечивала устойчивость, но страдала от высокочастотных колебаний. Решение предложено в комбинации выпуклой оптимизации и скользящего режима.



## Глава 3

# Моделирование и управление подводными аппаратами

Глава направлена на преодоление разрыва между теоретическими моделями и практической реализацией системы управления, обеспечивая устойчивость и надежность в различных подводных сценариях.

### I Математическое моделирование

ТНПА имеют шесть степеней свободы (DOF), в том числе три для перевода и три для вращения. Использование кватернионов для представления ориентации помогает избежать проблем с сингулярностью.

Движение морского транспортного средства без учета внешних сил,

выражается в терминах скоростей для двух координатных систем:

$$\dot{\bar{\mathbf{r}}}^N = \mathbf{J}(\bar{\mathbf{r}}^N) \bar{\mathbf{v}}^B$$

Подход Ньютона-Эйлера используется для описания динамики ТНПА, связывая приложенные силы и моменты с линейными и угловыми ускорениями:

$$\mathbf{M} \dot{\bar{\mathbf{v}}}^B + \mathbf{C}(\bar{\mathbf{v}}^B) \bar{\mathbf{v}}^B + \mathbf{D}(\bar{\mathbf{v}}^B) \bar{\mathbf{v}}^B + \mathbf{g}(\bar{\mathbf{r}}^N) = \bar{\mathbf{f}}^B$$

Дополнительные условия, такие как добавочная масса, центр плавучести и эффекты демпфирования, повышают точность модели.

Однако эмпирические корректировки модели необходимы из-за сложной, нелинейной и связанной природы динамики ТНПА. С учетом динамики, следующие параметры могут иметь некоторую неточность:

- **Параметры тела.** Матрица масс  $M_B$  и матрица Кориолисовых сил  $C_B$  могут быть неизвестны из-за неопределенных значений массы  $m$  и матрицы инерции  $I_0$ .
- **Коэффициенты вязкого демпфирования  $D$ .** Значения линейных и квадратичных членов определяются эмпирически.
- **Восстановительные силы  $g$ .** В частности, плотность воды  $\rho$  зависит от окружающей среды, а объем всего тела  $\nabla$  трудно рассчитать с надлежащей точностью.
- **Параметры добавленной массы  $M_A$  и  $C_A$ .** Они не могут быть вычислены напрямую и будут исключены в будущих расчетах.

Моделирование подруливающих устройств определяет желаемую тягу от каждого подруливающего устройства. Сложная взаимосвязь между силой тяги и переменными управления упрощается с помощью матрицы конфигурации тяги  $T$  и передаточной функции усиления постоянного тока функции  $\phi(u)$ :

$$\bar{f}^B = T\phi(u)$$

Предлагается использовать полином третьего порядка  $\phi_0(u)$  для моделирования приведенной выше передаточной функции. Этот подход считается подходящим из-за общей формы зависимости ШИМ от тяги. Приближенная передаточная функция выражается как:

$$\phi(u) = k\phi_0(u)$$

Дополнительно опишем внутренние и внешние силы, действующие на тела с помощью единственного нелинейного члена  $h(r, v)$ :

$$h(r, v) = C(v)v + D(v)v + g(r)$$

Наконец, приближенное уравнение динамики системы определяется как:

$$M\dot{v} + h(r, v) + \delta = kT\phi_0(u)$$

## II Проектирование систем управления

### A. Обратная динамика

Метод нелинейного управления, известный как обратная динамика, позволяет отслеживать траекторию движения, рассчитывая крутящие моменты приводов, необходимые для достижения определенной траектории. Этот подход основан на точном устранении нелинейностей в уравнении движения робота.

**Дизайн закона управления:** Учитывая приближенное уравнение динамики, мы можем разработать следующий закон управления для линеаризации системы:

$$\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\phi}_0(\mathbf{u}) = \hat{\mathbf{B}}^+(\hat{\mathbf{M}}\mathbf{a} + \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{r}, \mathbf{v}))$$

в то время как внешний контур управления  $\mathbf{a}$  разработан как пропорционально-дифференцирующий (ПД) регулятор:

$$\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}}_{des} - \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{r}} - \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{v}}$$

Метод обратной динамики, хотя и эффективен в теории, представляет собой ряд проблем в практическом применении:

- **Неопределенные или большие границы ошибок:** Границы ошибки могут быть большими или неопределенными, если  $\dot{\mathbf{v}}_{des}$  не ограничена должным образом.
- **Сложность настройки:** Параметры  $\mathbf{K}_p$  и  $\mathbf{K}_d$  требуют тщательной настройки для достижения желаемой производительности.

- **Недостаточная робастность:** Метод не устойчив к неопределенности параметров и внешним возмущениям.

В результате метод обратной динамики может оказаться не лучшим вариантом для эффективного управления подводными системами.

### *В. Управление в скользящем режиме*

Управление в скользящем режиме (SMC) обладает рядом преимуществ для управления подводными роботами в неопределенной и динамичной среде.

Ключевые компоненты SMC включают в себя:

- **Дизайн поверхности скольжения:** Поверхность скольжения определяется для обеспечения желаемого поведения системы, а закон управления разрабатывается для приведения траектории системы к этой поверхности.

$$s(r, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{r}$$

- **Условие скольжения:** Условие скольжения гарантирует, что траектория системы сходится к поверхности скольжения за конечное время.

$$s^T \dot{s} < -\eta \|s\| \quad \text{or} \quad \|s\| \|w\| - s^T K a_s \leq -\eta \|s\|$$

- **Дизайн закона управления:** Закон управления сочетает в себе номинальные  $a_n$  и робастные  $a_s$  компоненты для стабилизации системы и

обработки неопределенностей и возмущений.

$$\nu = \hat{B}^+(\hat{M}(a_n + a_s) + \hat{h}(r, v))$$

$$a_n = -K_p \tilde{r} - K_d \tilde{v}$$

$$a_s = \begin{cases} \rho_{\frac{s}{\|s\|}}, & \|s\| > \epsilon \\ \rho_{\frac{s}{\epsilon}}, & \|s\| \leq \epsilon \end{cases}$$

Используя скользящий режим управления, подводные роботы могут добиться повышенной стабильности, точности и скорости реакции даже в сложных условиях.

### *С. Управление на основе оптимизации*

Управление на основе оптимизации предлагает перспективное решение сложных проблем управления путем поиска оптимальных управляющих воздействий, которые удовлетворяют критериям эффективности, учитывая при этом ограничения системы.

**Задача оптимизации :** Квадратичное программирование (QP) - это тип выпуклой оптимизации, в которой целевая функция квадратична, а ограничения линейны. Стандартная форма задачи QP такова:

$$\begin{aligned} & \underset{x \in \mathbb{R}^n}{\text{minimize}} && \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \\ & \text{subject to} && A x \leq b, \\ & && E x = d \end{aligned}$$

**Дизайн закона управления:** Оптимизация скользящего управления

может быть сформулирована как QP-задача:

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{a}_s, \boldsymbol{\nu}} \quad & \mathbf{a}_s^T \mathbf{R}_a \mathbf{a}_s + \boldsymbol{\nu}^T \mathbf{R}_\nu \boldsymbol{\nu} + \gamma_0 d^2 + \gamma_1 \|\mathbf{a}_s - \mathbf{a}_{s(\text{prev})}\| \\
 \text{s.t.} \quad & \mathbf{s}^T \mathbf{K} \mathbf{a}_s \geq \eta \|\mathbf{s}\| + \|\mathbf{s}\| \|\mathbf{w}\| + d \\
 & \hat{\mathbf{M}} \mathbf{a}_s - \hat{\mathbf{B}} \boldsymbol{\nu} = -(\hat{\mathbf{M}} \mathbf{a}_n + \mathbf{h}(\mathbf{r}, \mathbf{v})) \\
 & \phi_0(\mathbf{u}_{\min}) \leq \boldsymbol{\nu} \leq \phi_0(\mathbf{u}_{\max})
 \end{aligned}$$

где для уменьшения дребезга вводится элемент неопределенности  $d$ , и добавляется слагаемое  $\|\mathbf{a}_s - \mathbf{a}_{s(\text{prev})}\|$  для сглаживания сигнала управления на выходе.

Таким образом, управление на основе оптимизации обеспечивает надежную основу для решения сложных проблем управления, используя методы оптимизации для получения законов управления, включающих динамику системы, ограничения и цели для достижения оптимальной производительности и адаптивности.

## Глава 4

# Результаты

В этой главе мы оцениваем эффективность различных стратегий управления для BlueROV Heavy, уделяя особое внимание отслеживанию положения, обработке возмущений, а также сравнивая точность и энергопотребление различных методов.

**Отслеживание положения:** имеет решающее значение для выполнения подводных задач, поскольку оно определяет, насколько хорошо ТНПА следует заданной траектории:

- Обратная динамика (ID): Проявляет значительные ошибки в направлении  $z$  и колебания стабилизации.
- Скользящий режим (SM): Демонстрирует устойчивое слежение и лучше справляется с нелинейностью и неопределенностью.
- Оптимизированный скользящий режим (QP): Повышает точность и эффективность за счет оптимизации управляющих воздействий.

**Влияние возмущений:** Подводная среда характеризуется такими возмущениями, как водные течения. В таких условиях системы управления



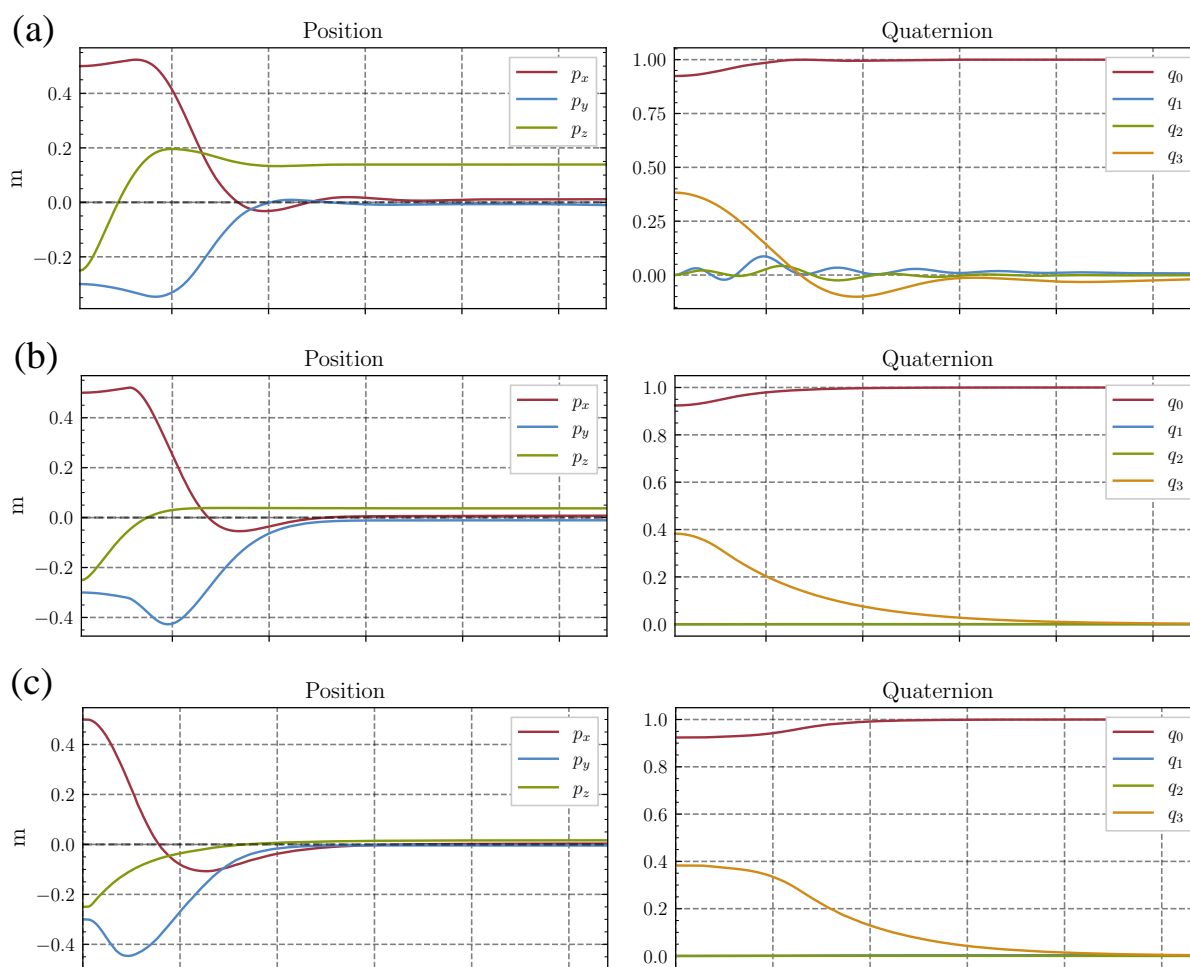


Рис. 1. Эффективность отслеживания положения BlueROV Heavy. Сверху вниз: обратная динамика (a), скользящий режим (b) и оптимизированный скользящий режим (c).

работают следующим образом:

- Обратная динамика (ID): Сохраняет стабильность, но имеет большие отклонения при возмущениях.
- Скользящий режим (SM): Демонстрирует повышенную устойчивость, снижая влияние возмущений.
- Оптимизированный скользящий режим (QR): Эффективно смягчает возмущения, сохраняя точность траектории.

**Сравнение методов управления.** Методы управления сравниваются по точности и энергопотреблению:

- Обратная динамика (ID): Хорошая точность при идеальных условиях, но чувствительна к помехам и неточностям. Более высокое потребление энергии из-за зависимости от точных моделей.
- Скользящий режим (SM): Повышенная точность при неопределенности и возмущениях. Повышение эффективности за счет адаптации к изменяющимся условиям.
- Оптимизированный скользящий режим (QR): Наивысшая точность благодаря оптимизированным входам управления и надежной обработке возмущений. Наилучшая энергоэффективность за счет оптимизации использования подруливающих устройств.

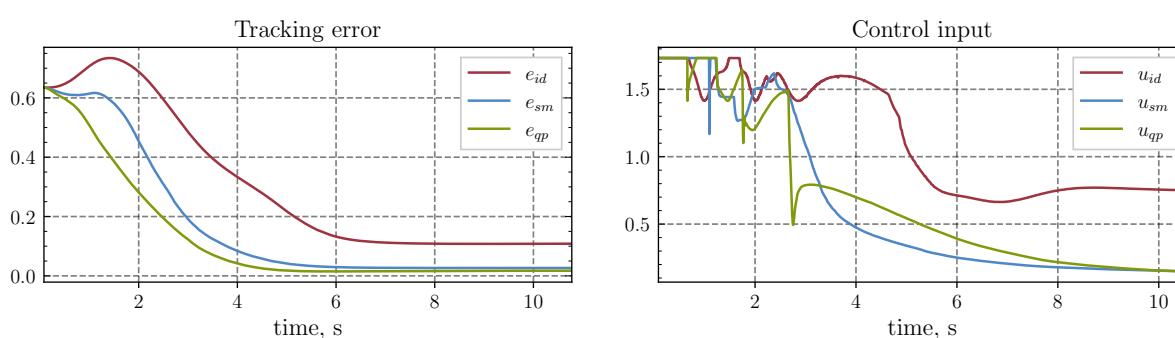


Рис. 2. Ошибка управления и показатели энергоэффективности систем управления: обратная динамика (id), скользящий режим (sm) и оптимизированный скользящий режим (qr)

Оптимизированная система управления со скользящим режимом (QR) оказалась лучшей в целом, обеспечив эффективный баланс между точностью, надежностью и энергоэффективностью.

## Глава 5

# Заключение

В данной диссертации рассматривается проблема управления телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА) в подводной среде с нелинейностью и неопределенностью. Она посвящена улучшению управления в скользящем режиме (SMC) с использованием методов выпуклой оптимизации для повышения стабильности, производительности и снижения эффекта дребезга.

Основной вклад в исследование заключается в разработке комплексной математической модели ТНПА и создании усовершенствованной схемы SMC с использованием выпуклой оптимизации. Предложенная схема управления была проверена с помощью моделирования и экспериментов, показав улучшенное отслеживание траектории и отклонение возмущений по сравнению с традиционными методами.

Полученные результаты свидетельствуют об улучшении стабильности и производительности усовершенствованной схемы SMC, обеспечивающей более высокую надежность и эффективность работы ТНПА. Уменьшение дребезга было достигнуто с помощью выпуклой оптимизации, что повысило

эффективность управления и снизило износ компонентов ТНПА.

Области для дальнейших исследований включают повышение вычислительной эффективности процесса выпуклой оптимизации и тестирование предложенной стратегии управления в различных подводных условиях. Кроме того, в будущем можно будет изучить возможности интеграции передовых сенсорных технологий для повышения адаптивности и интеллектуальности систем управления ТНПА.

Таким образом, данная диссертация вносит значительный вклад в область подводной робототехники, предлагая надежную и эффективную стратегию управления для ТНПА. Интеграция выпуклой оптимизации с управлением в скользящем режиме предлагает решение, которое обеспечивает баланс между производительностью, стабильностью и надежностью, поддерживая разработку более способных и надежных подводных роботизированных систем в сложных условиях.

# Список использованной литературы

- [1] Y. He, D. Wang и Z. Ali, «A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle,» *Measurement and Control*, т. 53, с. 1561—1570, сент. 2020. DOI: 10.1177/0020294020952483.
- [2] F. Abdul Azis, M. S. Mohd Aras, M. Rashid, M. N. Othman и S. Abdullah, «Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study,» *Procedia Engineering*, т. 41, с. 554—560, дек. 2012. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.211.
- [3] L. Gutierrez, C. Zuluaga, R. Vasquez, D. Florez, E. Taborda и R. Valencia, «Development of an Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV) for Surveillance and Inspection of Port Facilities,» т. 11, янв. 2010. DOI: 10.1115/IMECE2010-38217.
- [4] L. Govinda, S. Tomas, M. Bandala, L. Nava Balanzar, R. Hernandez-Alvarado и J. Antonio, «Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle,» *International Journal of Advanced Robotic Systems*, т. 11, с. 1, янв. 2014. DOI: 10.5772/56810.

- 
- [5] T. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. New York, NY: Wiley, 1995.
- [6] B. T. Lopez и J.-J. E. Slotine, «Sliding on Manifolds: Geometric Attitude Control with Quaternions,» в *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2021, с. 11 140—11 146. DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561867.
- [7] M. von Benzon, F. F. Sørensen, E. Uth, J. Jouffroy, J. Liniger и S. Pedersen, «An Open-Source Benchmark Simulator: Control of a BlueROV2 Underwater Robot,» *Journal of Marine Science and Engineering*, т. 10, с. 1898, дек. 2022. DOI: 10.3390/jmse10121898.
- [8] D. Smallwood и L. Whitcomb, «Model-Based Dynamic Positioning of Underwater Robotic Vehicles: Theory and Experiment,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, т. 29, № 1, с. 169—186, 2004, ISSN: 0364-9059. DOI: 10.1109/joe.2003.823312.
- [9] M. Spong, S. Hutchinson и M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005, ISBN: 9780471649908.
- [10] V. I. Utkin, «Variable Structure Systems with Sliding Modes,» *IEEE Transactions on Automatic Control*, т. 22, № 2, с. 212—222, 1977. DOI: 10.1109/TAC.1977.1101446.
- [11] D. Yoerger и J. Slotine, «Robust trajectory control of underwater vehicles,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, т. 10, № 4, с. 462—470, окт. 1985. DOI: 10.1109/JOE.1985.1145131.

- 
- [12] M. Spong, «On the robust control of robot manipulators,» *IEEE Transactions on Automatic Control*, т. 37, № 11, с. 1782—1786, 1992. DOI: 10.1109/9.173151.
- [13] V. Utkin и H.-C. Chang, «Sliding mode control on electro-mechanical systems,» *Mathematical Problems in Engineering*, т. 8, сент. 2002. DOI: 10.1080/10241230306724.
- [14] V. I. Utkin, *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer Berlin Heidelberg, 1992, ISBN: 9783642843792. DOI: 10.1007 / 978-3-642-84379-2.