

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ISSN 2073-7173 (print)

ISSN 2588-0233 (on line)

№ 4 Том 4 2024

№ 4 Part 4 2024



Morskie intelektual'nye tehnologii



Труды конференции

Перспективы развития роботизированных комплексов
(систем) морского базирования



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 часть 4 2024 Сквозной номер 66

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

На страницах журнала публикуются **новые** научные разработки, результаты исследований, методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления (в названии журнала заявлено «морские», т. е. все статьи, в том числе и с интеллектуальной компонентой, должны так или иначе относиться к кораблестроению или, по крайней мере, к исследованиям по морской тематике, что должно быть отражено в статье, аннотации, названии).

Год основания – 2008. Периодичность издания - 4 номера в год. Форма выпуска: печатный, электронный. Язык текстов: русский, английский. Язык метаданных: русский, английский. Статьям присваивается уникальный идентификатор DOI.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в международную реферативную базу данных Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase.

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации 19500 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал распространяется посредством подписки и в редакции, а также на выставках, конференциях и симпозиумах.

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

- 2.5.18 Проектирование и конструкция судов;
- 2.5.17 Теория корабля и строительная механика;
- 2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;
- 2.5.20 Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);
- 2.2.11 Информационно-измерительные и управляющие системы;
- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации;
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
- 2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- 1.2.2 Математическое моделирование и численные методы.

Рукописи и документы к статье представляются в редакцию в электронном виде (e-mail: mit-journal@mail.ru)

Учредитель-издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»).

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 от 19.09.2008 выданы Роскомнадзором.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей. Адрес: 190121 г.Санкт-Петербург, ул Лоцманская д.3. Тел./факс +7 (812) 513-04-51, бесплатный звонок по России 8 800 201 3897, e-mail: mit-journal@mail.ru

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели.

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций.

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций, а также на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.

<http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ». Тираж 100 экз.

Стоимость номера журнала без доставки 3500 рублей.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2024



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 4 2024 www.morintex.ru
Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

New scientific developments, research results, methods, procedures and technologies in the area of ship building, information science, computer engineering and control are published in the magazine.

The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database (Emerging Sources Citation Index ESCI), Ulrich's Knowledgebase.

Frequency of publication - 4 issues per year.

In the journal the articles shall be reviewed by leading specialists in the field of the article.

The journal is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, postgraduate students and students of higher educational institutions.

The journal is circulated in Russia and abroad by subscription in Interregional Subscription Agency and in editorial office, as well as in exhibitions, conferences and symposiums.

Journal headings:

- Design and Construction of Ships,
- Theory of Ship and Structural Mechanics,
- Technology of Ship Building. Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- System Analysis, Information Management and Processing,
- Information-Measuring and Control Systems,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Computer Modeling and Design Automation,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures.

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index u and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (E-mail: mit-journal@mail.ru)

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies".

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 of 19.09.2008 issued by Roskomnadzor.

Member of Association of science editors and publishers.

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies". Circulation of 100 copies.

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

<http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2024



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
С.Н. Рюмин, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Члены Редколлегии

В.Г. Бугаев, д.т.н., профессор, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
Е.П. Бураковский, д.т.н., профессор, филиал Военно-морской академии, Калининград
Ю.А. Власов, к.ф.-м.н., преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США
М.В. Войлошников, д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток
В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург
И.И. Костылев, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург
В.В. Родионов, к.т.н., Си Проект, Санкт-Петербург
В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский морской государственный университет, Санкт-Петербург
Н.А. Тарануха, д.т.н., профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре
Ю.С. Федосенко, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

Редакционный Совет

Председатель

Г.А. Туричин, д.т.н., Ректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. генеральный директор, "ЦКБ "Лазурит", Нижний Новгород
И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
Г.Н. Муру, к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, Санкт-Петербург
С.А. Огай, д.т.н., Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток
Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия
Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия
В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, научный руководитель предприятия, Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург
К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

N.V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor

Editorial Staff Deputy Chief Editors

D.A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Solomenko Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

A.I. Frumen, PhD (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

S.N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

V.G. Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of Naval Academy, Kaliningrad, Russia

Yu.A. Vlasov, PhD (Phys & Math), Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

M.V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

I.I. Kostylev, professor, Dr.Sci. (Eng), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

V.V. Rodionov, PhD (Eng.), Senior Research Scientist, Sea Project, St. Petersburg, Russia

V.Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

N.A. Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Yu.S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.

Editorial Board chairmen

G.A. Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Council Members

E.M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Nizhny Novgorod, Russia

I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), CEO, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Science principal, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

K.V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
ВЫРАЖАЕТ ИСКРЕННЮЮ БЛАГОДАРНОСТЬ
РЕЦЕНЗЕНТАМ ЭТОГО НОМЕРА:**

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Юрьевич Яковлев**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” В.И. Ульянова (Ленина)
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Кирилл Дмитриевич Овчинников**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Анатолий Владимирович Алексеев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Витальевич Галышев**, доктор технических наук, профессор, Высшая школа энергетического машиностроения Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Малыгин Игорь Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко
- **Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, professor, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Виктор Михайлович Козин**, доктор технических наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Юрий Евгеньевич Ежов**, кандидат технических наук, доцент, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Егор Юрьевич Чебан**, доктор технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Владимир Николаевич Стаценко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Михаил Вячеславович Хачумов**, кандидат физико-математических наук, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
EXPRESSES SINCERE GRATITUDE
TO THE REVIEWERS OF THIS ISSUE:**

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Aleksej YU. Yakovlev**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine technical university
- **Alexander A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Kirill D. Ovchinnikov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine *technical* University
- **Anatolii V. Alekseev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical Universit
- **Iurii V. Galyshev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor,) Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Ivan B. Druz**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Igor G. Malygin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr. Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexey L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Viktor M. Kozin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **IUrii E. Ezhov**, Ph.D. (Eng), associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Egor Yu. Cheban**, Dr. Sci. (Eng), assistant professor, Volga State University of Water Transport
- **Vladimir N. Statsenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Far Eastern Federal University
- **Mikhail V. Khachumov**, Ph.D. (Phys & Math), Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences
- **Stepan Y. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi



Труды конференции

**Перспективы развития
роботизированных комплексов
(систем) морского базирования**

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Городников О.А., Карсаков К.Б. Модернизация элементов подводного судового устройства для проведения диагностических работ.....	10
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Система управления испытательным стендом для исследования переходных процессов в вакуумных присосках в водной среде.....	18
Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Экспериментальные исследования сцепления с поверхностью вакуумных захватных устройств в различных средах.....	25
Губанков А.С., Горностаев И.В. Метод формирования программной скорости движения группы БПЛА.....	33
Кабанов А.А., Зуев А.В., Проценко А.А. Идентификация возмущений в электроприводах робототехнических систем на основе оптимального астатического наблюдателя.....	42
Горин В.А., Губанков А.С., Юхимец Д.А. Подход к построению информационно-управляющей системы для посадки беспилотного воздушного судна.....	51
Юхимец Д.А. Метод синтеза системы траекторного управления движением АНПА, учитывающего особенности кинематической модели их движительных комплексов.....	61
Родионов А.Ю., Власов А.А., Кузин Д.А., Бобров В.В., Кирьянов А.А., Гребенюк И.В. Нейросетевое распознавание сигнальных созвездий M-QAM типа в магнитно-индукционном подводном канале связи.....	69
Родионов А.Ю., Кирьянов А.В., Гребенюк И.В., Пестов Д.А. Результаты оценки погрешности гидроакустической навигационной системы с короткой базой в прибрежной зоне.....	77
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А. Адаптивное управление электроприводами подводных манипуляторов.....	83
Ляшко А.Д. Использование визуального управления для динамического позиционирования торпедообразных автономных необитаемых подводных аппаратов.....	91
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ	
Князьков Д.Ю. Моделирование влияния неоднородности стратификации на поле внутренних волн в океане.....	99
Городников О.А., Петрашев С.В. Вывод дифференциального уравнения для определения сопротивлений шланга при эксплуатации подводного оборудования.....	107

CONTENTS	page
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Oleg A. Gorodnikov, Kirill B. Karsakov Modernization of elements of an underwater ship device for diagnostic work.....	10
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Philipp M. Belchenko, Maxim M. Knyazkov, Pavel P. Ostricov, Eugeny A. Semenov, Artem N. Sukhanov Design of test bench control system for studying transient processes in vacuum suction cups under water.....	18
Philipp M. Belchenko, Maxim M. Knyazkov, Pavel P. Ostricov, Eugeny A. Semenov, Artem N. Sukhanov Experimental studies of adhesion to the surface of vacuum gripping devices in various environments.....	25
Anton S. Gubankov, Igor V. Gornostaev Method of generating a reference movement speed of a group of UAVs.....	33
Aleksey A. Kabanov, Alexander V. Zuev, Alexander A. Protsenko Identification of disturbances in electric drives of robotic systems based on an optimal astatic observer.....	42
Vladislav A. Gorin, Anton S. Gubankov, Dmitry A. Yukhimets Approach to development of an information-control system for landing an unmanned aerial vehicle.....	51
Dmitry A. Yukhimets The synthesis method of AUV tracking control system with considering of kinematic model of their thruster system.....	61
Alexander Yu. Rodionov., Aleksandr A. Vlasov, Denis A. Kuzin., Vladislav V. Bobrov, Aleksey V. Kiryanov, Igor V. Grebenyuk Neural Network Recognition of M-QAM Signal Constellations in Magnetic Inductive Underwater Communication Channel.....	69
Alexander Yu. Rodionov, Alexei V. Kiryanov, Igor V. Grebenyuk, Daniil A. Pestov Results of error assessment of a hydroacoustic navigation system with a short base in the coastal zone.....	77
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Vladimir F. Filaretov, Aleksandr V. Zuev, Aleksandr A. Timoshenko Adaptive control of electric drives of underwater manipulators.....	83
Aleksandr D. Liashko Use visual control for dynamic positioning of torpedo-shaped autonomous uninhabited underwater vehicles.....	91
MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES	
Dmitrii IU. Knyazkov Modelling the effect of the heterogeneity of stratification on the field of internal waves in the ocean.....	99
Oleg A. Gorodnikov, Sergey V. Petrashev Derivation of a differential equation for determining hose resistance when operating subsea equipment.....	107

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 62-82

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.074>

Модернизация элементов подводного судового устройства для проведения диагностических работ

Городников О.А.¹ Gorodnikov.O@vvsu.ru, Карсаков К.Б.¹ KB.Karsakov@vvsu.ru

¹Владивостокский Государственный университет

Аннотация. Эксплуатация судов, трубопроводов и гидротехнических сооружений, находящихся в толще воды и имеющие постоянный контакт с морской водой, подвергаются электрохимическому воздействию при непосредственном контакте с жидкостью и подвергаются коррозионным процессам. Своевременное обнаружение и предотвращение коррозионных процессов позволит снизить вероятность критичного разрушения конструкций и возникновения чрезвычайных ситуаций, при этом не маловажным фактором является время проведения диагностики объектов и скорость устранения повреждений.

В настоящее время основную часть работ по диагностике и обнаружению повреждений конструкций выполняют водолазы, процесс является достаточно затратным по временному интервалу и трудоемким. Для снижения времени и облучения данного процесса предлагается использование подводного аппарата на дистанционном управлении, оснащённого камерой для обследования поверхности объектов и определения повреждений в толще воды. Использование специального программного обеспечения с обучаемым искусственным интеллектом позволит минимизировать участие человека в данном процессе и уменьшить время проведения работ данного типа, при этом даст возможность проводить диагностические работы на сложно доступных и глубоководных объектах с минимальным количеством используемого оборудования.

Ключевые слова: коррозия, диагностика, подводные аппараты, искусственный интеллект, трубопроводы, гидротехнические сооружения, гидравлика, подводные объекты.

Для цитирования: Городников О.А., Карсаков К.Б. Модернизация элементов подводного судового устройства для проведения диагностических работ. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 10—17. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.074

Research article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.074>

Modernization of elements of an underwater ship device for diagnostic work

Oleg A. Gorodnikov¹ Gorodnikov.O@vvsu.ru, Kirill B. Karsakov¹ KB.Karsakov@vvsu.ru

¹Vladivostok State University

Abstract. The operation of ships, pipelines and hydraulic structures located in the water column and having constant contact with seawater are subjected to electrochemical effects in direct contact with liquid and are subject to corrosion processes. Timely detection and prevention of corrosion processes can reduce the likelihood of critical structural failure and emergency situations, while the time of object diagnostics and the speed of damage elimination are not unimportant factors.

Currently, the bulk of the work on the diagnosis and detection of structural damage is performed by divers, the process is quite time-consuming and time-consuming. To reduce the time and facilitate this process, it is proposed to use a remote-controlled underwater vehicle equipped with a camera to inspect the surface of objects and determine damage in the water column. The use of special software with trained artificial intelligence will minimize human participation in this process and reduce the time of this type of work, while making it possible to carry out diagnostic work on difficult-to-access and deep-water facilities with a minimum amount of equipment used.

Key words: corrosion, diagnostics, underwater vehicles, artificial intelligence, pipelines, hydraulic structures, hydraulics, underwater objects.

For citation: Oleg A. Gorodnikov, Kirill B. Karsakov, Modernization of elements of an underwater ship device for diagnostic work. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 10—17. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.074

Введение

При разработке и эксплуатации морских месторождений одним из главных элементов системы доставки до суши является трубопроводный транспорт и различного рода судна. Так же нефтегазодобывающие платформы и портовые

гидротехнические сооружения имеют непосредственный контакт и частично погружены в морскую воду. Контакт металлических элементов вышеперечисленных объектов с морской водой сопровождается рядом различных химических процессов, оказывающих негативное влияние на

целостность конструкций и вызывающий процессы коррозии.

Для обследования объектов и судов используется различного рода оборудования и привлекаются специалисты для проведения водолазных работ. Предлагается использование более быстрого способа проведения диагностики и обнаружения повреждений подводных объектов путем модернизации подводного устройства для ликвидации аварийных разливов нефти и установки на него дополнительного оборудования [1]. Подводный аппарат выступает в роли средства доставки наблюдательного оборудования и двигателя способного работать в толще воды, что позволит значительно снизить нагрузку на водолазов.

Цель исследования является разработка устройства способного работать в толще воды и способного проводить диагностику объектов с выявлением повреждений конструкций в кратчайшие сроки.

Основная задача, решаемая предлагаемой модернизацией подводного аппарата – это обеспечение процесса проведения работ беспилотным дистанционно управляемым аппаратом с цифровым контролем результатов и составлением карты состояния объектов.

Повреждения подводных объектов

Подводные объекты, такие как подводные магистральные трубопроводы, опоры мостов, части конструкции судов и гидротехнических сооружений, постоянно находящиеся под водой, подвергаются разного рода воздействиям и могут быть повреждены. Основные причины:

- вмятины, полученные в результате контакта с другими объектами (трубопроводы повреждаются, например, в результате контакта с якорями, гидротехнические сооружения при несоблюдении техники прохода и швартовки судов);
- просадка и усталость металлов конструкции – в результате длительного времени эксплуатации и воздействия нагрузок на объекты;
- коррозия металла конструкции – процесс неотвратимый, так как металлические конструкции имеют постоянный контакт с водой, чаще всего морской, которая наиболее химически активна. На практике основной проблемой является коррозия, которая наносит большой урон поверхностям металлических конструкций. Характер и интенсивность разрушения судов зависят от многих факторов:

- а) района плавания;
- б) скорости хода;
- в) длительности рейса;
- г) эффективности защиты от коррозии.

Электрохимическая коррозия приводит к разрушению сварных швов и металла около них из-за уже упомянутой разности потенциалов между материалом шва и основным материалом [2].

Для высокопрочных сплавов опасными видами коррозии являются:

- контактная;
- щелевая;
- расслаивающая;
- язвенная;
- коррозионное растрескивание.

Борьба с коррозией осуществляется различными методами, основными из которых являются:

- легирование;
- ингибиторная защита;
- электрохимическая защита;
- применение защитных покрытий.

Легирование не нашло широкого распространения в судостроении. Для повышения коррозионной стойкости сталей в качестве легирующих добавок применяют хром, никель, молибден, титан и другие металлы. Но достаточная эффективность их в морской воде обеспечивается только при содержании в стали легирующих элементов более 18%, что очень повышает ее стоимость. Поэтому из нержавеющей стали изготавливают только винты и подводные крылья.

Ингибиторную защиту применяют только в закрытых помещениях, например, на нефтеналивных судах для предупреждения коррозии внутренней поверхности грузовых танков. Ингибитор вводится как в нефтепродукты, так и в принимаемую балластную воду в количестве сотых долей процента.

Электрохимическая защита может быть протекторной анодной или катодной. Протекторная защита состоит в присоединении к защищаемой конструкции пластины металла с более низким электродным потенциалом. Эта пластина-протектор становится анодом, на котором искусственно сосредотачивается коррозия. При разрушении протектора или потере его контакта с защищаемым материалом его заменяют новым [3].

Главной проблемой является своевременное определение повреждений объектов и определения нахождения точного места проведения работ по устранению повреждений. Для определения состояния объектов проводят различного рода обследования и диагностические работы.

Методы проведения диагностических работ

Основным методом проведения работ по диагностике судов, элементов подводных конструкций, трубопроводов и различного рода гидротехнических сооружений являются водолазные работы. Проведение работ визуальным методом составляет от двух до четырех часов и покрывает площадь до 20 м², без использования специального оборудования и фиксации видимых нарушений целостности конструкций и повреждений. При проведении работ так же часто используется специальное оборудование, например, ультразвуковые приборы [4].

Ультразвуковая диагностика – установка оборудования на трубопроводах, причалах и опорах гидротехнических сооружений водолазами. Процесс позволяет более точно и досконально обследовать участки и получить более точные результаты. Участок в 20 м² для точечной проверки обследуется в течении двух часов.

Магнитная диагностика – использование магнитных дефектоскопов (датчики и сенсоры) позволяет определить повреждения даже под защитными покрытиями. Монтируется на поверхности водолазами или специальным подводным аппаратом. Обследование участка в 20 м² составляет затраты по времени около 3 часов.

Так же для проведения данного вида работ используются различного рода подводные дроны и аппарата.

Использование подводных дронов (ROV) – позволяет снизить риски и уменьшить вероятность риска для людей при работах в плохой видимости или при работе на больших глубинах. Основным недостатком применения данного способа является высокая стоимость оборудования и проведения работ, так же ограниченная возможность проведения работ в сложных климатических условиях. Обследование участков в 20 м² составляет около 90 минут.

Автономные подводные аппараты (AUV) – позволяют доставлять оборудование и работать дистанционно при этом имеют ряд ограничений, таких как, высокая стоимость оборудования, ограниченность по глубине проведения работ и маневренности в сложных климатических условиях. Проведение работ на участке составляет более одного часа.

Все представленные методы имеют ряд ограничений, высокую стоимость проведения работ и сложности с проведением работ в сложных условиях или при наличии льда на поверхности воды. Предлагаемый метод с использованием подводного аппарата, работающего от судовой энергетической установки, позволит значительно уменьшить количество используемого оборудования и ресурсов.

Подводный аппарат для проведения диагностических работ

Ключевым элементом является подводный аппарата, предназначенный для работы в толще воды и распыления сорбента. Это устройство должно обеспечить возможность распределения сорбирующего материала в водной среде, а также работать в любых климатических, температурных условиях с наличием ледяного покрова [5].

Подводный аппарат способен осуществлять движение в толще воды в установленном оператором направлении.

Данная система разработана с возможностью использования энергетической установки судна для обеспечения движения подводного устройства и введения сорбентов в толще воды. С борта судна будет осуществляться управление устройством и регулирование с постоянным контролем его местонахождения.

Главной составляющей предлагаемой системы выступает подводное устройство. Гибкий шланг является связующим звеном подводного устройства и судовой энергетической установки. Главной отличительной чертой системы является отсутствие большого количества дополнительного оборудования перед началом проведения работ, а также возможность подключения к пожарным насосам, находящимся на любом из судов или находящимся на причальной зоне в случаях необходимости проведения работ в месте швартовки судна. Элементы системы включают в себя подводное устройство, пожарный насос, распределительный узел.

Форма корпуса подводного устройства чечевицеобразная, позволяющая установить на него камеры для обследования объектов и фиксации данных. Реактивная сила, позволяющая устройству

осуществлять движение, будет создаваться при подаче воды по гибкому трубопроводу от пожарного насоса.

Направление движения через распределительное устройство задается путем включения или отключения сопел. Длина гибкого трубопровода, позволяющего двигаться подводному устройству, может достигать 150 метров. В случае необходимости остановки или изменения курса, подача воды может быть прекращена или осуществляться через одно сопло.

Работа системы для обслуживания происходит через подводное устройство, находящееся в толще воды и осуществляющее движение за счет гидрореактивной тяги (рисунок 1).

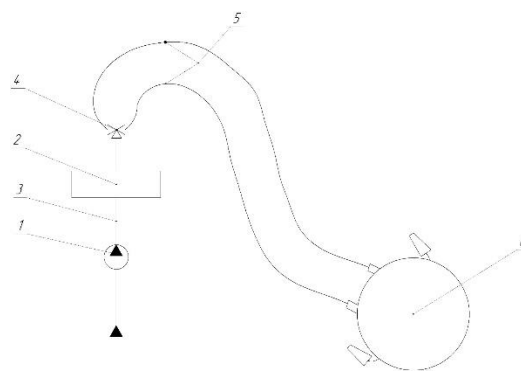


Рис. 1. Принципиальная схема установки
1 – насос, 2 – контролер, 3 – соединительный трубопровод, 4 – распределительное устройство, 5 – подающий шланг, 6 – подводный аппарат

По гибкому трубопроводу вода подается в управляющее оборудование, которое распределяет поток воды между соплами (в правое, левое или оба сопла одновременно, в зависимости от необходимой траектории движения), в результате возникает реактивная тяга, приводящая в движение подводное устройство, находящееся в толще воды [6].

Подача воды в сопла по очереди или одновременно в оба сопла осуществляется управляющим распределительным устройством. В случае подачи в противоположное из сопел (левое или правое) подводное устройство начинает двигаться в определенном направлении, если необходимо создать движение по прямой подача осуществляется в два сопла одновременно. В результате движения, когда аппарат находится на заданном местоположении (около обследуемого участка), включается камера, которая фиксирует состояние объекта и передает данные на компьютер. Траектория движения подводного аппарата при обследовании возможно движение в двух вариантах – «маятниковом» (а) и возвратно-поступательном (б) (рисунок 2).

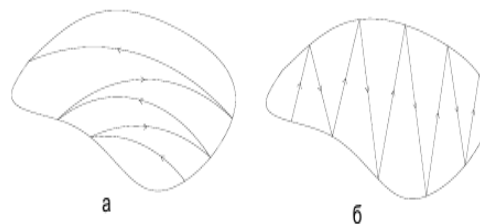


Рис. 2. Траектории движения подводного аппарата

Для выполнения разного вида работ в зависимости от задач в состав навесного оборудования могут входить:

- видеокамеры с повышенной светочувствительностью;
- гидролокатор кругового обзора, многолучевой эхолот;
- ультразвуковой толщиномер или дефектоскоп;
- датчик катодного потенциала;
- магнитометр;
- лазерная линейка;
- система обнаружения утечек нефти.

Позиционирование подводного аппарата при проведении работ

Основной задачей является маневрирование подводного аппарата в вертикальной плоскости. На данный момент глубина погружения подводного устройства обусловлена установленным в нем устройством постоянной плавучести, которое поддерживает его на глубине 1,5...2 метра от поверхности воды.

Для решения поставленной задачи предлагается установка гребного винта в корпус подводного устройства – одного по центру корпуса (рисунок 3).

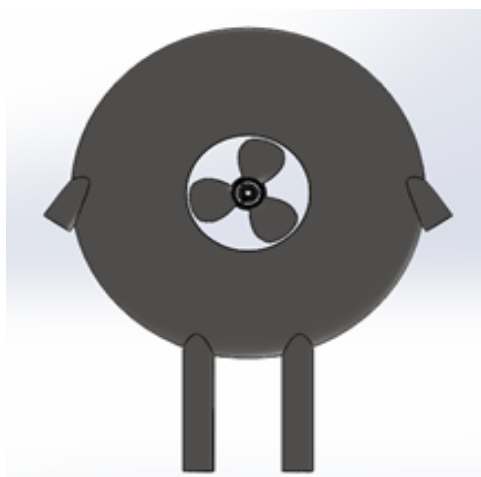


Рис. 3 Установка лопастей

Для этого были произведены расчет по определению необходимой мощности мотора, определению диаметра винта с учетом дискового отношения, предельный диаметр винта, шаговое отношение и число лопастей (таблица 1).

Таблица 1
Результаты расчетов параметров гребного винта

Параметры	Значение
Число лопастей, шт.	3
Предельный диаметр, м	0,15
Дисковые отношения	6,8
Шаговые отношения	0,6
Мощность, потребляемая мотором, кВт	0,35

При параметрах данного типа мотором для обеспечения движения гребного винта принимается электромотор М5308 KV45065. Максимальная мощность 0,57 кВт, что обеспечивает резервный запас.

Вес мотора 0,195 килограмма, что немало важно при расчетах и общем весе подводного устройства. Диаметр вала 4 миллиметра.

Данный гребной винт и электромотор будут установлены в центре корпуса подводного устройства, в специальном защитном корпусе, герметичный корпус исключает попадание воды на электромотор. Приводиться в движение он будет с управляющего устройства на судне, соединённого с электромотор по электрическому кабелю в защитном кожухе. При этом верхняя платформа подводного устройства будет нетронута и остается для установки дополнительного оборудования (в зависимости от проводимых диагностических работ).

Обеспечивая вертикальную маневренность подводному устройству, тем самым доводя использование данного способа до уникальных возможностей в сложных климатических условиях.

Определение основных параметров гребного винта.

Гребной винт предназначен для создания силы тяги и обеспечения поступательного движения подводного устройства, он состоит из ступицы и лопастей, установленных на ступице радиально на одинаковом расстоянии друг от друга и повернутых на одинаковый угол относительно плоскости вращения, и представляющих собой крылья среднего или малого удлинения.

При вращении гребного винта каждая лопасть захватывает массу воды и отбрасывает её назад, сообщая ей заданный момент импульса – сила реакции этой отбрасываемой воды приводит во движение подводное устройство.

Основные характеристики винта – диаметр, шаг, скольжение, дисковое отношение, коэффициент полезного действия.

Диаметр винта – это диаметр окружности, описываемый концами лопастей.

Шаг винта – путь, проходимый винтом за один оборот в твердом теле. Свой рабочий шаг с учетом потери части упорной силы на скольжение и другие сложные явления гребной винт развивает после того, как устройство начнет двигаться с нормальной скоростью при данной частоте его вращения.

Так как гребной винт вращается не в твердом теле, а в воде, то он не в состоянии сдвинуть судно за один оборот на полную величину своего шага по отношению к окружающей воде. Это явление объясняется скольжением лопастей о воду.

Проскальзывание – разница между реальным шагом и шагом винта (появляется из-за частичного стекания воды с лопастей).

Дисковое отношение – отношение площади лопастей к площади описываемого круга.

Гребные винты изготавливают в основном из стали или алюминия. Необходимо произвести подбор материала для изготовления, основываясь на предъявляемые требования к гребному винту.

Коэффициент попутного потока w определяется по формуле (1):

$$W = 0,5 \cdot \delta - 0,05, \quad (1)$$

где δ – коэффициент общей полноты корпуса.

Коэффициент общей полноты корпуса находится по формуле (2):

$$\delta = \frac{\Delta}{\rho \cdot L \cdot B \cdot d}, \quad (2)$$

где $\Delta = 3,4$ кг – массовое водоизмещение;

$\rho = 1025$ кг/м³ – массовая плотность воды;

$L = 0,4$ м – длина корпуса;

$B = 0,1$ м – высота корпуса;

$d = 0,2$ м – осадка корпуса.

Устанавливаем предельно допустимый диаметр $D_{пред}$ гребного винта, число его лопастей z и минимально допустимое значение дискового отношения Θ .

Предельно допустимый диаметр винта рассчитывается по формуле (3):

$$D_{пред} = 0,75 \cdot d, \quad (3)$$

где $d=0,2$ м – осадка устройства.

Число лопастей z гребного винта зависит от нагрузки на него, частоты вращения, возможности возникновения недопустимой вибрации. Принимаем $z = 3$, так как трёхлопастные винты:

- наиболее широко распространены;
- хорошие выходные характеристики;
- наивысшая максимальная скорость;
- слаженная работа в целом.

Минимально допустимое значение дискового отношения Θ_{min} устанавливается из условия обеспечения возможно высокого КПД винта при одновременном отсутствии кавитации [7].

Допустимое значение дискового отношения находится по формуле (4):

$$\Theta_{min} = 0,065 \cdot \sqrt[3]{P \cdot \left(\frac{z}{D_{пред}} \right)^2}, \quad (4)$$

где P – упор винта.

Упор винта находится (5):

$$P = \frac{R}{Z \cdot (1-t)^2}, \quad (5)$$

где R – сопротивление движению.

Сопротивление движению находится по формуле (6):

$$R = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega \cdot (\xi_F + \xi_N + \xi_A + \xi_T), \quad (6)$$

где $\rho=1025$ кг/м³ – плотность морской воды;

$v=0,1$ м/с – скорость устройства;

$\Omega=0,109$ – смоченная поверхность корпуса устройства;

$\xi_F=2,6 \cdot 10^3$ – коэффициент сопротивления трения эквивалентной, технически гладкой пластины, равновеликой с аппаратом по величине смоченной поверхности, в зависимости от числа Рейнольдса;

$\xi_N=0,3 \cdot 10^3$ – надбавка на шероховатость принимается в зависимости от длины устройства;

$\xi_A=0,45 \cdot 10^3$ – коэффициент сопротивления выступающих частей;

$\xi_T=1,22$ – коэффициент остаточного сопротивления.

Находим смоченную поверхность корпуса по формуле (7):

$$\Omega = L \cdot d \cdot \left[1,97 + 1,37 \cdot (\delta - 0,274) \cdot \frac{B}{d} \right]. \quad (7)$$

Площадь смоченной поверхности составляет 0,109 м².

Сопротивление движению получается равным 1,12 Н.

Упор винта равен 0,395 кг.

Дисковое отношение составит 0,68.

Находим оптимальные значения элементов винта:

- относительная поступь винта;
- КПД;
- шаговое отношение.

Значения снимаем с выбранной расчётной диаграммы, построенной в осях $K_2 = f(\lambda_p)$, в точках

пересечения отрезков кривых k_n^m , линией $D_{опт}$.

Так как заданной является скорость хода v_s , подсчитывается коэффициент упора – диаметра по формуле (8):

$$k_n^m = D_{пред} \cdot 0,514 \cdot (1-w) \cdot v_s \cdot \sqrt{\frac{\rho}{P}}, \quad (8)$$

где $P=0,395$ кг – упор, развиваемый винтом;

$v_s=0,196$ – скорость хода.

Коэффициент упора составит 0,24.

Находим относительную поступь винта, выбираем данную диаграмму исходя из следующих данных:

$Z = 3$ – число лопастей винта;

$\Theta = 0,68$ – дисковое отношение;

$v_p = 0,63$ – относительная поступь винта.

КПД винта в свободной воде принимает $\eta_p = 0,59$.

КПД винта, работающего за корпусом устройства находится по формуле (9):

$$\eta_g = \eta_p \cdot \frac{1-t}{1-w}. \quad (9)$$

КПД винта составит 0,66.

Шаговое отношение находим по формуле (10):

$$\frac{H}{D} = f(k_n^m). \quad (10)$$

Шаговое отношение составит 0,6.

Частоту вращения гребного винта находим по формуле (11):

$$n_c = \frac{v_p}{D \cdot \lambda_p}, \quad (11)$$

где $\eta_p=0,064$ м/с – скорость гребного винта;

$D=0,075$ м – диаметр гребного винта;

$\lambda_p=0,63$ – относительная поступь винта.

Скорость гребного винта находим по формуле (12):

$$v_p = 0,514 \cdot (1 - w) \cdot v_s. \quad (12)$$

Скорость гребного винта составит 0,064 м/с.

Частоту вращения гребного винта находим по формуле, и она составит 33,3 об/с.

Проверка гребного винта на кавитацию [8].

Упор гребного винта создается главным образом за счет разрежения – падения давления на выпуклой засасывающей стороне лопасти. Если площадь лопастей небольшая, то давление здесь понижается настолько, что вода, обтекающая лопасть, вскипает, выделяя пузырьки пара. Микроскопические пузырьки сливаются в более крупные – каверны, а при очень сильном разрежении – в сплошную полость, что нарушает непрерывность потока. Это явление и называется кавитацией.

Различают две стадии кавитации. На первой стадии каверны невелики и на работе винта практически не сказываются.

Однако пузырьки, лопаюсь, создают огромные местные давления, отчего поверхность лопасти выкрашивается. При длительной работе кавитирующего винта такие эрозийные разрушения могут быть настолько значительными, что эффективность винта снизится.

При дальнейшем повышении скорости наступает вторая стадия кавитации. Сплошная полость захватывает всю лопасть и даже может замыкаться за ее пределами. Развиваемый винтом упор падает из-за резкого увеличения лобового сопротивления и искажения формы лопастей [9].

Из-за такого явления, как кавитация, подводное устройство может выйти из строя, поэтому после определения элементов гребного винта необходимо рассчитать величину коэффициента запаса на кавитацию f по формуле (13):

$$f = \frac{(100500 + 8200 \cdot D) \cdot \theta}{1300 \cdot k_c \cdot (n_c \cdot D)^2}, \quad (13)$$

где $D=0,175$ – диаметр винта;

$\theta=0,68$ – дисковое отношение винта;

$k_c = 0,4$ – кавитационная характеристика, определяемая по графикам.

Коэффициент запаса составит 21,2. Минимальное значение коэффициента f , обеспечивающее отсутствие кавитации, равно примерно 1,3. Так как $f > 1,3$ расчёт гребного винта закончен.

Выбор гребного винта.

Основываясь на подсчитанные в предыдущем разделе параметры гребного винта выбираем его из стандартного ряда ГОСТа Гребные металлические винты.

Каждый из металлов имеет свои преимущества. Наиболее распространенным материалом, используемым сегодня для гребных винтов, является алюминий. Он прочен, легко ремонтируем и стоек к коррозии. Однако нержавеющая сталь примерно в 5 раз более прочная. Фактически, это самый прочный и долговечный из всех материалов, использующихся для гребных винтов. Это означает, что нержавеющей стали не грозят повреждения от трещин и ударов, которые обычно появляются на алюминиевых винтах.

Это также означает, что лопасти такого гребного винта могут быть тоньше, что придаст ему дополнительную эффективность. Нержавеющая сталь, по сравнению с алюминием, гораздо более устойчива к коррозии – хотя она также может стать причиной коррозии ближайших алюминиевых поверхностей в соленой воде в том случае, если не использовалась хорошая анодная защита. Кроме того, алюминиевые гребные винты не привязаны к типу судна, в то время как лопасти из нержавеющей стали определены для разных типов, позволяя так как мы учитываем ускорение, скорость и эффективность, то следует выбрать гребной винт из нержавеющей стали [10].

Винт для Suzuki 2.5 л.с. 7 3/8 X 5 3/8 имеет следующие характеристики:

- трехлопастной гребной винт;
- диаметр винта (дюймы): 7;
- шаг (дюймы): 5;
- материал: алюминий (рисунок 4).



Рис. 4. Трёхлопастной винт 7 3/8 X 5 3/8

Расчет параметров электромотора.

Для движения устройства по вертикали в толще воды со скоростью 10 см/с. необходимо подобрать электромотор. Подбор электромотора осуществляется по следующим параметрам:

- потребляемая мощность;
- частота вращения;
- КПД [11].

Для выбора электромотора необходимо задаться потребляемой мощностью мотора, находим по формуле (14):

$$N_{\text{в}} = \frac{1,2 \cdot N_{\text{б}}}{z_p \cdot \eta_g \cdot \eta_p}, \quad (14)$$

где $N_{\text{б}}$ – буксировочная мощность;

$z_p=1$ – число винтов;

$\eta_g=0,66$ – КПД винта, работающего за корпусом судна;

$\eta_p=0,59$ – КПД винта в свободной воде.

Потребляемая мощность мотором составит 0,35 кВт.

После расчетов и выбора дополнительных элементов для подводного аппарата,

обеспечивается его маневренность и возможность установки дополнительного оборудования для проведения диагностики.

Заключение

Исследование по изменению технологий маневренности подводного устройства позволит более точно контролировать его положение в толще воды, замедление движения в толще воды для проведения работ по диагностике.

Использование подводного аппарата для проведения диагностических работ

гидротехнических сооружений, подводных трубопроводов и судов, позволит в значительной мере уменьшить время проведения работ и исключить фактор риска для работников при проведении работ в сложных климатических условиях.

При этом использование данного устройства как носителя оборудования позволит подключать подводный аппарат и проводить работа с борта любого судна или объекта, имеющего пожарные насосы.

Литература

1. Городников О.А., Охоткина В.Э., Мельник А.П. Определение параметров совместного использования подводного аппарата и судовых насосов для нанесения сорбента // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. № 4-3 (62), С.15-22.
2. Коррозия и защита металлов: учебное пособие для вузов / О.В. Ярославцева [и др.]; под научной редакцией А.Б. Даринцевой. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 89 с.
3. Хижняков В.И. Сопротивление материалов. Коррозионное растрескивание: учебное пособие для вузов / В.И. Хижняков. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 262 с.
4. Аносов А.П. Теория и устройство судна: циклическая прочность судовых конструкций: учебное пособие для среднего профессионального образования / А.П. Аносов, А.В. Славгородская. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 202 с.
5. Пат. 144489 U1 Рос. Федерация, МПК E02B 15/04, E02B 15/10. Устройство для подводного введения сорбента / Городников О.А., Монинец С.Ю., Петрашев С.В. № 2013147318/13; заявл. 09.01.2014; опубл. 20.08.2014.
6. Городников О.А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О.А. Городников, С.В. Петрашев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2016. – № 3. – С. 15-17.
7. Емельянов Н.Ф. Расчёт ходкости и гребного винта морского транспорта судна / Н.Ф. Емельянов, С.А. Огай. Владивосток, 1984, 65 с.
8. Обоснование типа судовой энергетической установки / А.Г. Даниловский, Д.А. Андронов, М.А. Орлов, И.А. Боровикова. - СПб: СПбГУВК, 2009. – 149 с.
9. Мельников А.П. Теория и расчет лопастей винта / А.П. Мельников, В.В. Свечников. - Ленинград: Издание ЛКВВИА, 1947. - 153 с.
10. Зуев В.А., Калинина Н.В., Рабазов Ю.И. «Выбор основных характеристик транспортных судов на начальной стадии проектирования» Пособие, Нижний Новгород, 2007. – 225 с.
11. Жинкин В.Б. «Теория и устройство корабля» учебник. - 3-е издание, стереотип. - СПб: Судостроение, 2002. – 336 с., ил.

References

1. Gorodnikov O.A., Okhotkina V.E., Melnik A.P. Determination of parameters of joint use of an underwater vehicle and marine pumps for applying sorbent // Marine intelligent technologies. – 2023. No. 4-3 (62), pp.15-22.
2. Corrosion and protection of metals: a textbook for universities / O.V. Yaroslavtseva [et al.]; under the scientific editorship of A.B. Darintseva. — Moscow: Yurait Publishing House, 2024. — 89 p.
3. Khizhnyakov V.I. Resistance of materials. Corrosion cracking: a textbook for universities / V.I. Khizhnyakov. — Moscow: Yurait Publishing House, 2024. — 262 p.
4. Anosov A.P. Theory and structure of a ship: cyclic strength of ship structures: a textbook for secondary vocational education / A.P. Anosov, A.V. Slavgorodskaya. — 2nd ed., ispr. and add. — Moscow: Yurait Publishing House, 2024. — 202 p.
5. Patent 144489 U1 Grew. Federation, IPC E02B 15/04, E02B 15/10. Device for underwater introduction of sorbent / Gorodnikov O.A., Moninets S.Yu., Petrashev S.V. No. 2013147318/13; application 09.01.2014; publ. 08/20/2014.
6. Gorodnikov O.A. Method of spraying sorbents during the liquidation of emergency oil spills using an underwater vehicle / O.A. Gorodnikov, S.V. Petrashev // Environmental protection in the oil and gas complex. – 2016. – No. 3. – pp. 15-17.
7. Yemelyanov N.F. Calculation of the seaworthiness and propeller of a ship's marine transport / N.F. Yemelyanov, S.A. Ogai. Vladivostok, 1984, 65 p.
8. Substantiation of the type of ship power plant / A.G. Danilovsky, D.A. Andronov, M.A. Orlov, I.A. Borovikova. - St. Petersburg: SPbGUVK, 2009. – 149 p.
9. Melnikov A.P. Theory and calculation of propeller blades / A.P. Melnikov, V.V. Svechnikov. - Leningrad: LKVVIA Publishing House, 1947. - 153 p.
10. Zuev V.A., Kalinina N.V., Rabazov Yu.I. "Selection of the main characteristics of transport vessels at the initial stage of design" Manual, Nizhny Novgorod, 2007. – 225 p.
11. Zhinkin V.B. "Theory and structure of the ship" textbook. - 3rd edition, stereotype. - St. Petersburg: Shipbuilding, 2002. – 336 p., ill.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Городников Олег Александрович, старший преподаватель кафедры нефтегазового дела, Владивостокский государственный университет, Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: Gorodnikov.O@vvsu.ru.

Oleg A. Gorodnikov, Senior Lecturer of the Department of Oil and Gas Engineering, Vladivostok State University, Russian Federation, 690014, Vladivostok, Gogol str., 41, e-mail: Gorodnikov.O@vvsu.ru.

Карсаков Кирилл Борисович, ассистент кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет, Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: KB.Karsakov@vvsu.ru

Kirill B. Karsakov, Assistant at the Department of Transport Processes and Technologies, Vladivostok State University, 41 Gogol str., Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: KB.Karsakov@vvsu.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2024.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.075>

Система управления испытательным стендом для исследования переходных процессов в вакуумных присосках в водной среде

Бельченко Ф.М.¹ philepp@mail.ru, Князьков М.М.¹ ipm_labrobotics@mail.ru,
Остриков П.П.¹ ostricov93@yandex.ru, Семенов Е.А.¹ sim1165@mail.ru,
Суханов А.Н.¹ sukhanov-artyom@yandex.ru

¹Институт проблем механики РАН имени Ишлинского, ИПМ РАН им. Ишлинского.

Аннотация. Морские буровые платформы в Северном Ледовитом океане оснащены защитным коробом, который крепится к платформе как юбка, защищающая опоры, на которых стоит платформа, от плавающих льдин. После каждой зимы это защитное ограждение требует осмотра. В настоящее время осмотр проводится с помощью катера и водолазов, но из-за такого подхода приходится приостанавливать работы по разгрузке нефти на платформе, для решения этой проблемы и возможности работы в погодных условиях севера предлагается использовать вакуумного робота вертикального перемещения. Для обеспечения работы робота в подводных условиях и на границе сред необходимо понимать, какие процессы происходят под поверхностью вакуумных присосок робота, чтобы наладить работу автоматизированной системы создания вакуума на роботе. В статье описывается разработка системы управления испытательным стендом для получения данных о нестационарных режимах работы вакуумного присоса под водой. Приведено назначение рабочих органов и электронной схемы испытательного стенда. Система управления собрана на базе платы Arduino. Разработано программное обеспечение для считывания данных с датчиков. Описана процедура проведения эксперимента на разработанном аппаратно-программном комплексе. На основе результатов экспериментов получены графики, процессы перехода вакуума внутри присоски, усилия в пневмоцилиндре для отрыва присоски, электропитание эжектора и перемещение присоски.

Ключевые слова: Система управления, подводный робот, присоска, arduino, микроконтроллер, российская Арктика, пневматика, робототехника, подводные исследования.

Финансирование: Исследование поддержано грантом РФ № 23-11-00067.

Для цитирования: Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Система управления испытательным стендом для исследования переходных процессов в вакуумных присосках в водной среде. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 18—24. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.075

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.075>

Design of test bench control system for studying transient processes in vacuum suction cups under water

Philipp M. Belchenko¹ philepp@mail.ru, Maxim M. Knyazkov¹ ipm_labrobotics@mail.ru,
Pavel P. Ostricov¹ ostricov93@yandex.ru, Eugeny A. Semenov¹ sim1165@mail.ru,
Artem N. Sukhanov¹ sukhanov-artyom@yandex.ru

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. Marine drilling platforms in the Arctic ocean are equipped with a cofferdam that is attached to the platform like a skirt which protects the pylons on which the platform stands from floating ice floes. After each winter, this protective fence requires inspection. Currently, the inspection is carried out using a boat and divers, but due to this approach, oil unloading operations on the platform have to be suspended. To ensure the operation of the robot in underwater conditions and at the boundary of environments, it is necessary to understand which processes occur under the surface of the suction cup in order to adjust the operation of the automated vacuum generation system on the robot. The paper describes control system development for a test bench to obtain vacuum suction operating underwater transient data. It presents assignment of the test bench working parts and electronic circuit. The control system is assembled on the basis of the Arduino board. Software is developed for reading data from the sensors. The paper describes procedure for conducting an experiment on the developed hardware and software complex. Based on the experimental results, graphs, vacuum transition processes inside the suction cup, efforts in the pneumatic cylinder to tear off the suction cup, power supply to the ejector and movement of the suction cup are obtained.

Keywords: Control system, underwater robot, suction cup, arduino, microcontroller, Russian Arctic, pneumatics, robotics, underwater research.

Financial Support: The research is supported by the RSCF grant No. 23-11-00067.

For citation: Philipp M. Belchenko, Maxim M. Knyazkov, Pavel P. Ostricov, Eugeny A. Semenov, Artem N. Sukhanov, Design of test bench control system for studying transient processes in vacuum suction cups under water. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 18—24. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.075

Введение

В настоящее время идет активное освоение территорий российской Арктики. В частности, непосредственно в Северном Ледовитом океане появляются нефтегазодобывающие платформы. Буровые платформы в северном океане оборудованы защитным коробом, который крепится к платформе как юбка и защищает опоры, на которых стоит платформа, от плавающих льдин.

После каждой зимы эта защитная конструкция требует осмотра на предмет трещин и дефектов как над поверхностью воды, так и под. В настоящее время осмотр проводится с помощью катера и водолазов, но из-за такого подхода приходится приостанавливать работы по разгрузке нефти на платформе.

На данный момент предлагается использовать роботов вертикального перемещения для оценки состояния поверхности как над, так и под водой. Но из-за сильных течений воды и того, что защитная конструкция выполнена из немагнитного материала по типу эпоксидной смолы, было предложено использовать робота на вакуумных присосках.

Применение вакуумных присосок в воздухе является хорошо изученным процессом [1-2] и в воздухе генерация вакуума под поверхностью присоски происходит практически мгновенно. Однако под водой и на границе двух сред происходят длительные переходные процессы установления вакуума с низко- и высокочастотными шумами. Предположительно это вызвано турбулентными потоками смеси газа и жидкости в системе генерации вакуума. Для обеспечения работы робота в подводных условиях и на границе сред необходимо понимать, какие процессы происходят под поверхностью присоски, чтобы настраивать работу автоматизированной системы генерации вакуума на роботе [3].

В данной работе описывается создание системы управления подводным испытательным стендом, позволяющей в реальном времени считывать данные с датчиков вакуума в присоске, погруженной под воду. Испытательный стенд также позволяет управлять клапанами для автоматического включения создания вакуума в присоске и регулировать давление внутри пневмоцилиндра, для осуществления непрерывной серии экспериментов в автоматическом режиме. Система управления представляет собой аппаратно-программный комплекс, расположенный вне бассейна. Изделие обеспечивает взаимодействие электронных и пневматических компонентов испытательного оборудования и позволяет оперативно проводить большое количество испытаний в автоматизированном режиме[4].

1. Описание стенда

Рабочая часть стенда (рис. 1) состоит из корпуса с направляющими, пневмоцилиндра, к штоку которого прикреплена присоска, трубок для подвода и отвода воздуха и пневмоклапанов.

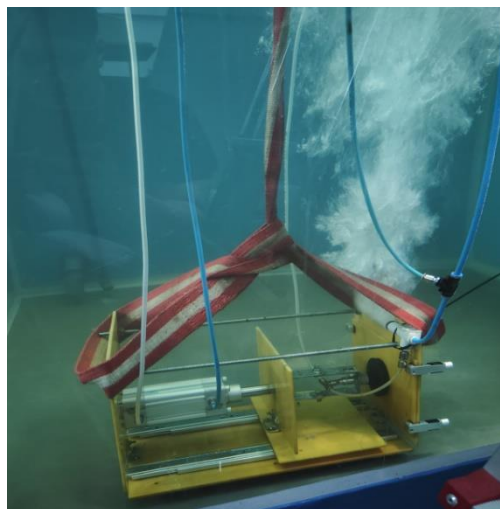


Рис. 1. Подводный испытательный стенд

Под водой находятся только элементы, создающие вакуум, прижимную силу и силу отрыва вакуумной присоски. Набор датчиков выведен наружу для обеспечения сохранности электронных компонентов во время эксперимента.

Пневмосистема стенда (рис. 2) состоит из: 1 - источника сжатого воздуха, 2 - ресивера, 3 - осушителя, 4 - фильтра, 5 - манометра, контролирующего входное давление, 6 - редуктора входного давления, 7 - электропневмоклапана, контролирующего перемещение пневмоцилиндра, создающего усилие отрыва, 8 - электропневмоклапана, контролирующего перемещение пневмоцилиндра, создающего усилие сдвига, 9 - электропневмоклапана для подачи питания на эжектор, 10 - датчика давления с манометром, контролирующего давление питания пневмоцилиндра, создающего усилие отрыва, 11 - редуктора давления питания пневмоцилиндра, создающего усилие отрыва, 12 - редуктора давления питания пневмоцилиндра, создающего усилие сдвига, 13 - редуктора давления питания эжектора, 14 - пневмоцилиндр, создающий усилие отрыва, 15 - датчика давления с манометром, контролирующего давление питания пневмоцилиндра, 16 - датчика давления с манометром, контролирующего давление питания эжектора, 17 - присоски, 18 - датчика вакуума с вакуумметром, контролирующего вакуум в присосках, 19 - пневмоцилиндр, создающий усилие отрыва, 20 - эжектор, создающий разрежение в присоске.

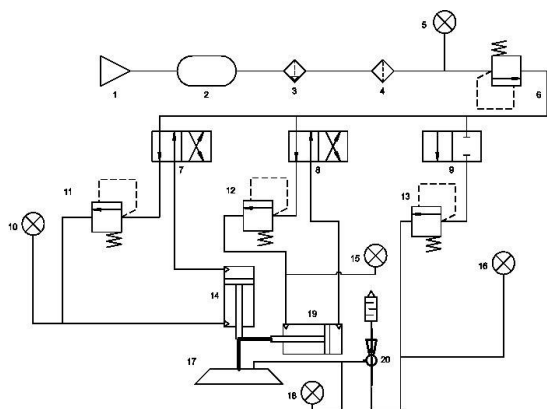


Рис. 2. Пневматическая схема

Соединительные элементы к датчикам выполнены в виде пневматических трубок длиной 3 метра [5]. Удлинение соединений к датчикам более этой величины может привести к потере значений давления. Для подачи информации на датчик перемещения, который был реализован в виде потенциометра, использована гидравлическая система на основе двух цилиндров (рис. 3) одинакового диаметра и объема. Один цилиндр жестко соединен с подвижной частью стенда.

Второй цилиндр соединен с потенциометром через реечную передачу. Два цилиндра соединены трубкой и, ввиду не сжимаемости воды. Мы предполагаем, что движения обоих цилиндров происходят одновременно.



Рис. 3. Датчик смещения присоски

2. Аппаратное обеспечение испытательного стенда

Разработана электронная схема системы управления (рис. 4).

Основой аппаратной части системы управления является плата Arduino UNO. Реле давления управляется подачей 5 В на силовые ключи с гальванической развязкой, которые подают 24 В на электрические клапаны давления [6]. Управление усилием отрыва присоски осуществляется путем точного регулирования давления в полости пневмоцилиндра. Такое регулирование осуществляется с помощью прецизионного регулятора давления Camozzi PXE104. Управляющий сигнал открытия и закрытия клапана варьируется в диапазоне 0-10 В.

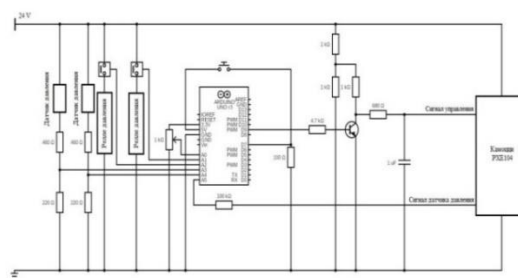


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема системы управления испытательным стендом

Для реализации такого управляющего сигнала используется порт ШИМ для управления транзистором в ключевом режиме на входе RC-фильтра. Электронные компоненты рассчитаны на соответствие полностью заполненному ШИМ-сигналу 10 В [7].

Данные с датчиков вакуумметрического давления и давления подачи эжектора снимаются с помощью токовой цепи, что подразумевает использование одного защитного резистора и резистора, с которого снимается падение напряжения. Номиналы элементов выбираются в соответствии с рекомендациями производителя датчика.

Данные о давлении внутри пневмоцилиндра снимаются с датчика давления, встроенного в регулятор давления Camozzi PXE104. Потенциометр, выполняющий функцию датчика перемещения присоски, питается от порта отладочной платы, напряжение питания составляет 3,3 В, поэтому сигнал с потенциометра можно напрямую подключить к входному порту.

По результатам проектирования система управления была собрана в герметичном пластиковом корпусе (рис. 5). Для электрического соединения всех датчиков использована витая пара, взятая из стандартного кабеля Ethernet и припаянная к герметичному разъему.

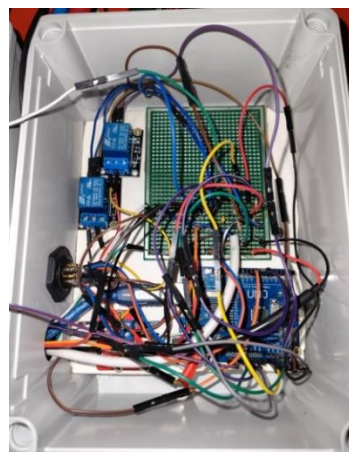


Рис. 5. Фотография собранной на испытательном стенде системы управления

Программа написана на языке C с использованием библиотеки Arduino [8]. Программа реализует инициализацию портов, считывающих значения с датчиков и сигналы, управляющие клапанами. Значения с датчиков передаются через порт протокола UART со скоростью 115200 бод. Реализован скрипт на python для приема данных через порт UART, генерации путей и папок для

сохранения данных в виде файлов в формате .txt [8-9].

3. Проведение эксперимента

Далее в рамках работы был проведен ряд экспериментов с присоской в воздухе и на различных глубинах (1 м и 2 м). Для погружения стенда использовалась кран-балка.

Работа стенда начинается с инициализации внутренних переменных, подачи давления воздуха в общую линию, инициализации UART [10-11] и запуска скрипта на Python для получения данных.

После выполнения всех подготовительных мероприятий на корпусе устанавливается двухпозиционная кнопка. Нажатие на нее запускает эксперимент (рис. 6). После нажатия на кнопку внутри пневмоцилиндра подается давление, прижимающее присоску к стенке стенда.

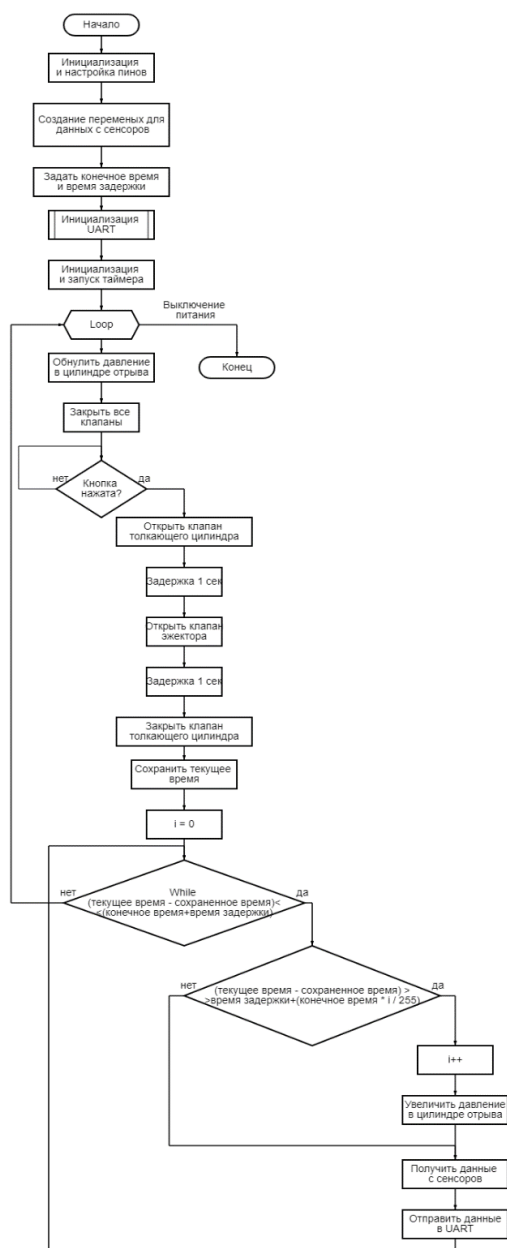


Рис. 6. Аппаратный алгоритм испытательного стенда

После нажатия происходит задержка, позволяющая произойти всем переходным процессам в пневмосистеме. Затем начинается опрос датчиков и открывается клапан, питающий эжектор, для создания давления и происходит задержка в 100 секунд для установления вакуума в полости присоски. Такая задержка необходима для управления переходными процессами при низких давлениях, питающих эжектор; переходные процессы установления вакуума под водой происходят достаточно медленно. После этого происходит линейное нарастание давления внутри пневмоцилиндра до тех пор, пока присоска не оторвется. После достижения максимального давления в цилиндре и отрыва присоски цикл завершается и процесс начинается снова.

По завершении работы алгоритмы сохраняют данные в текстовом файле (рис. 7). Данный алгоритм создает каталоги, необходимые для сохранения экспериментальных данных. И создает пути к файлам для каждого эксперимента планирования по образцу:

«.../имя_родительского_каталога/имя_эксперимента /глубина/поданное_давления/имя_файла.txt».

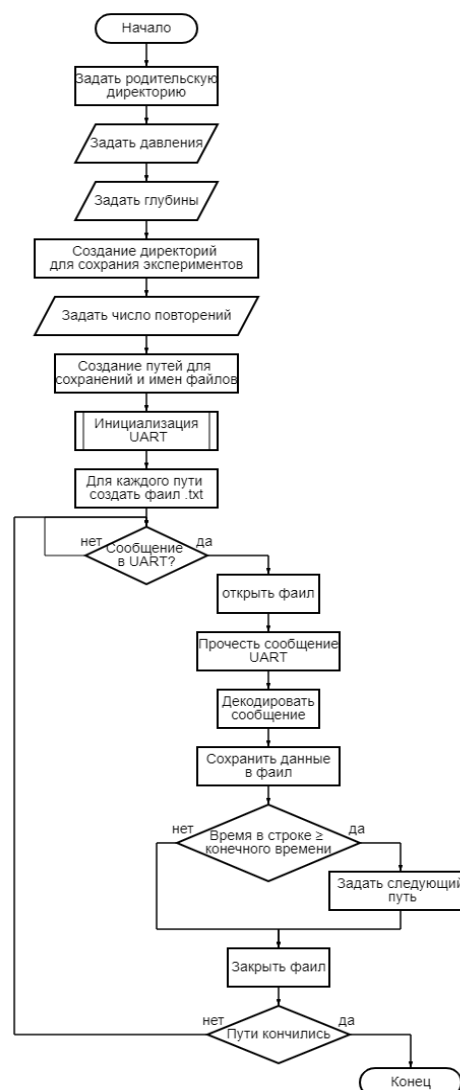


Рис. 7. Алгоритм сохранения данных

Имена файлов создаются с использованием образца «имя_эксперимента+глубина+подача_давления+номер_повторения.txt». Все пути к файлам сохраняются в одной переменной для удобства осей алгоритма визуализации данных.

Количество каталогов и имен файлов зависит от количества параметров. Параметры эксперимента необходимо вручную ввести в текстовый массив перед началом работы.

После чего файл с экспериментальными данными загружается в скрипт, который производит визуализацию данных. Для визуализации данных используется скрипт на языке python (рис. 8), написанный с использованием библиотеки Matplotlib [12].

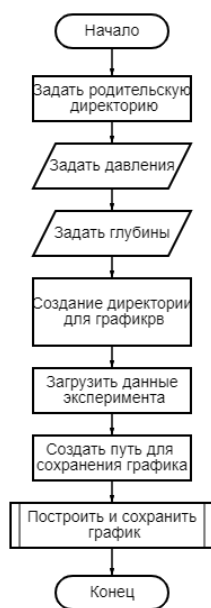


Рис. 8. Алгоритм визуализации

Из-за несовершенства датчиков, микропульсаций питания и микродефектов в собранной электронной схеме присутствуют высокочастотные шумы. Для фильтрации этих шумов в данной системе использован фильтр Калмана (рис. 9).

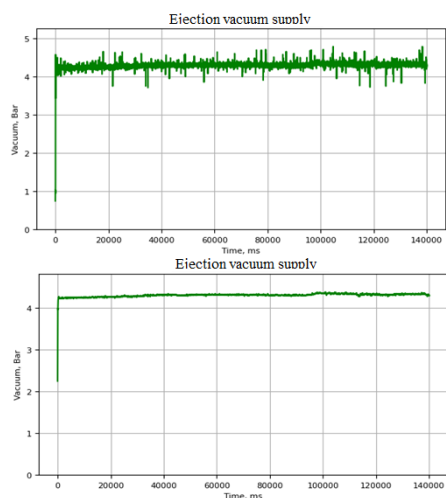


Рис. 9. Шумы и фильтрация Калмана

В качестве примера показана визуализация данных (рис. 10) для одинаковой глубины и изменяющегося давления подачи. На этом рисунке нанесены давление подачи эжектора, вакуум присоски, сила отрыва присоски и движение присоски.

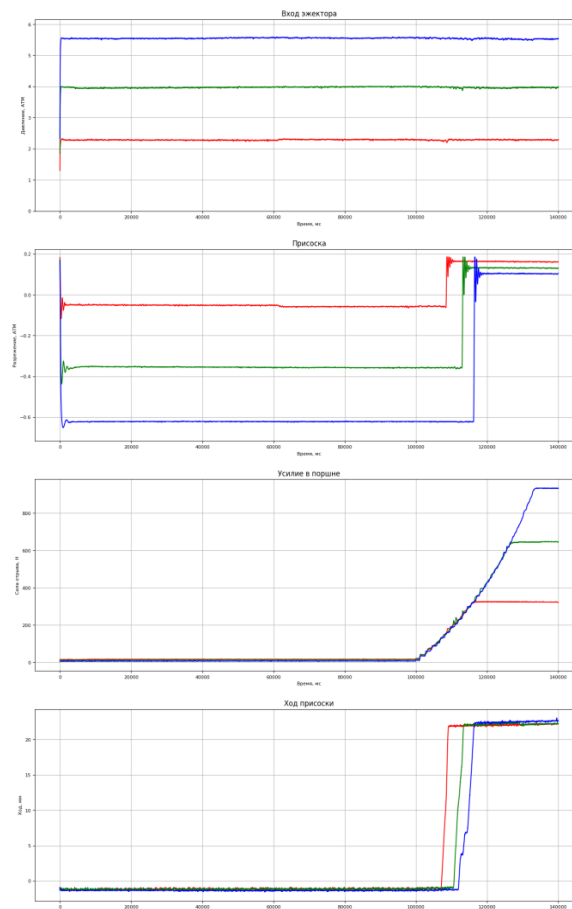


Рис. 10. Построение графика по данным на одной и той же глубине и изменяющемся давлении подачи

Заключение

Разработаны как аппаратная часть стенда для исследования вакуума в присосках, так и программное обеспечение. Проведен ряд успешных испытаний системы управления подводным стендом. В результате построены графики переходных процессов вакуума в присоске, давления подачи эжектора, перемещения присоски при всасывании и ее отрыва. В дальнейшем планируется реализовать данные разработки в рамках более сложных проектов, где система управления будет погружаться под воду вместе с рабочим оборудованием. В конструкцию планируется добавить два расходомера, один на входе давления эжектора и один на его выходе в атмосферу. Плата Arduino UNO будет заменена на Nucleo STM32, что позволит производить обработку данных с более высокой точностью.

Литература

1. Управление силовой коррекцией в пневмовакuumных контактных устройствах мобильных роботов / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, А. Н. Суханов и др. // Успехи кооперативной робототехники. Труды 20-й Международной конференции по лазанию и шагающим роботам. — Порту: 2017. — С. 11–13.
2. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Суханов А. Н., Семенов Е. А. Динамика вакуумных контактных устройств мобильных альпинистских роботов. Успехи кооперативной робототехники, стр. 278–286, 2017.
3. Болотник Николай Н., Князьков Максим М., Семенов Евгений А., Чашухин Владислав Г., Суханов Артем Н., Бельченко Филипп М., Остриков Павел П. Особенности применения пневматических роботов вертикального перемещения с вакуумными устройствами фиксации в водной среде. Экстремальная робототехника 2023, стр. 85–87
4. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Сравнительный анализ вакуумгенерирующих устройств для вакуумных присосок мобильных транспортных систем, предназначенных для работы под водой, Международная конференция по океаническим исследованиям (ICOS) 2023, 189–192
5. Филипп Михайлович Бельченко, Иван Леонидович Ермолов, Георгий Николаевич Нагайцев, Павел Павлович Остриков, Особенности передачи подводных изображений в морской робототехнике // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4. Часть 3. С. 62—67. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.066
6. Электроника, Чарльз Плат [O'Reilly Media / Make, 2009]
7. Дж. Клерк Максвелл, Трактат об электричестве и магнетизме, 3-е изд., т. 2. Оксфорд: Кларендон, 1892, стр. 68–73.
8. Морган Куигли, Эрик Бергер и Эндрю Й. Архитектура аппаратного и программного обеспечения. Факультет компьютерных наук Стэнфордского университета.
9. Хеннесси Дж. и Паттерсон Д., Архитектура компьютера: количественный подход, 4-е изд., Морган кауфман, 2006.
10. Начало работы с Arduino Массимо Банци [O'Reilly Media / Make, 2011]
11. «The Arduino Cookbook», 2-е издание, Майкл Марголис [O'Reilly Media / Make, 2011].
12. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Семенов Е.А., Остриков П.П., Суханов А.Н., Чашухин В.Г. Исследование газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств // Известия Волгоградского государственного технического университета, Издательство ВолгГТУ (Волгоград), №9, с. 15–21.

References

1. V. G. Gradetsky, M. M. Knyazkov, A. N. Sukhanov Force correction control in pneumatic vacuum contact devices of mobile robots. Advances in Cooperative Robotics., Proc. of the 20th Int. Conf. of Climbing and Walking Robots. — Porto: 2017. — P. 11–13.
2. V. G. Gradetsky, M. M. Knyazkov, A. N. Sukhanov, and E. A. Semenov. Dynamics of vacuum contact devices of mobile climbing robots. In ADVANCES IN COOPERATIVE ROBOTICS, pages 278–286, 2017
3. Bolotnik Nikolay N., Knyazkov Maxim M., Semenov Evgeny A., Chashchukhin Vladislav G., Sukhanov Artem N., Belchenko Filipp M., Ostrikov Pavel P. Features of the application of pneumatic vertical movement robots with vacuum fixation devices in the aquatic environment. Extreme Robotics 2023, pp. 85–87
4. Belchenko Ph M., Knyazkov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Sukhanov A.N. Comparative Analysis of Vacuum Generative Devices for Vacuum Suction Cups of Mobile Transport Systems Designed for Underwater Operation, 2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS), 189–192
5. Filipp M. Belchenko, Ivan L. Ermolov, Georgij N. Nagajcev, Pavel P. Ostrikov, Specifics of underwater images transmission in marine robotics. Marine intellectual technologies. 2023 № 4 part 3, P. 62—67.. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.066
6. Make: Electronics, by Charles Plat [O'Reilly Media / Make, 2009]
7. J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
8. Morgan Quigley, Eric Berger and Andrew Y. Ng. STAIR : Hardware and Software Architecture. Computer Science Department Stanford University.
9. Hennessy J., and Patterson D., Computer Architecture: A Quantitative Approach, 4th ed., Morgan Kaufmann, 2006.
10. Getting Started with Arduino by Massimo Banzi [O'Reilly Media / Make, 2011]
11. The Arduino Cookbook, 2nd Edition by Michael Margolis [O'Reilly Media / Make, 2011].
12. Belchenko F.M., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Ostrikov P.P., Sukhanov A.N., Chashchukhin V.G. Research of gas-dynamic and hydrodynamic processes in cavities and channels of vacuum gripper devices. News of the Volgograd State Technical University, VolgSTU Publishing House (Volgograd), No. 9, pp. 15–21

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бельченко Филипп Михайлович, младший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-7596-9970, e-mail: philepp@mail.ru

Князьков Максим Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-5863-4079, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Остриков Павел Павлович, ведущий программист, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0009-0000-7569-1246, e-mail: ostricov93@yandex.ru

Семенов Евгений Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-6196-1433, e-mail: sim1165@mail.ru

Суханов Артем Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-4122-492X, e-mail: suhanov-artyom@yandex.ru

Philepp M. Belchenko, Junior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7596-9970, e-mail: philepp@mail.ru

Maxim M. Knyazkov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-5863-4079, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Pavel P. Ostrikov, Lead programmer, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0009-0000-7569-1246, e-mail: ostricov93@yandex.ru

Evgeniy A. Semenov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-6196-1433, e-mail: sim1165@mail.ru

Artem N. Sukhanov, Ph.D. (Eng), Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4122-492X, e-mail: suhanov-artyom@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.10.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.10.2024.

Научная статья

УДК 531/534

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.076>**Экспериментальные исследования сцепления с поверхностью вакуумных захватных устройств в различных средах**Бельченко Ф.М.¹ philepp@mail.ru, Князьков М.М.¹ ipm_labrobotics@mail.ru,Остриков П.П.¹ ostricov93@yandex.ru, Семенов Е.А.¹ sim1165@mail.ru,Суханов А.Н.¹ sukhanov-artyom@yandex.ru¹Институт проблем механики РАН имени Ишлинского, ИГМ РАН им.Ишлинского.

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований, которые направлены на выявление критериев надёжности закрепления мобильных роботов с помощью вакуумных захватных устройств на произвольно ориентированных в пространстве поверхностях, находящихся под влиянием динамических возмущений в воздушной, водной и смешанной средах. Эксперименты проводились при разных параметрах входного давления эжектора в воздушной, водной и смешанной средах. Были получены характеристики переходных процессов, возникающих в полости вакуумирования, при этом на присоску осуществлялось направленное механическое воздействие с помощью пневматического цилиндра на сдвиг. Для проведения исследований был создан полноразмерный экспериментальный стенд, в состав которого входили контрольно-измерительные приборы, позволяющие отслеживать в реальном времени уровень разрежения в полости захватного устройства при воздействии на него пневматического цилиндра.

Ключевые слова: вакуумные захватные устройства, генератор вакуума, переходные процессы, мобильный робот вертикального перемещения, экспериментальный стенд, водная и воздушная среда, газодинамические и гидродинамические процессы, пневматический цилиндр.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-11-00067 (Вакуумные захватные устройства для роботов, эксплуатируемых в воздушной, жидкой и пограничной средах)

Для цитирования: Бельченко Ф.М., Князьков М.М. Экспериментальные исследования сцепления с поверхностью вакуумных захватных устройств в различных средах. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 25—32. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.076

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.076>**Experimental studies of adhesion to the surface of vacuum gripping devices in various environments**Philipp M. Belchenko¹ philepp@mail.ru, Maxim M. Knyazkov¹ ipm_labrobotics@mail.ru,Pavel P. Ostricov¹ ostricov93@yandex.ru, Eugeny A. Semenov¹ sim1165@mail.ru,Artem N. Sukhanov¹ sukhanov-artyom@yandex.ru¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of experimental studies aimed at identifying criteria for the reliability of fixing mobile robots using vacuum gripping devices on surfaces arbitrarily oriented in space under the influence of dynamic disturbances in air, water and mixed environment. The experiments were carried out at different parameters of the inlet pressure of the ejector in air, water and mixed environment. The characteristics of the transient processes occurring in the vacuum cavity were obtained, while the suction cup was subjected to a directed mechanical action using a pneumatic cylinder to move. To conduct research, a full-size experimental stand was created, which included control and measuring devices that allow real-time monitoring of the level of vacuum in the cavity of the gripper device when exposed to a pneumatic cylinder.

Key words: vacuum gripping devices, vacuum generator, transient processes, mobile climbing robot, experimental stand, water and air environment, gas dynamic and hydrodynamic processes, pneumatic cylinder.

Financial Support: The work was carried out with the support of the RSCF grant No. 23-11-00067 (Vacuum gripping devices for robots operated in air, liquid and mixed environment)

For citation: Philipp M. Belchenko, Maxim M. Knyazkov, Experimental studies of adhesion to the surface of vacuum gripping devices in various environments. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 25—32. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.076

Введение

С каждым годом прослеживается всё более ускоряющаяся тенденция по замене ручного и механизированного человеческого труда на использование робототехнических комплексов (РТК) для проведения регламентных операций по

техническому обслуживанию механизмов и сооружений. Наиболее остро проблема обслуживания стоит при эксплуатации этих сооружений и механизмов в неблагоприятных климатических условиях, условиях изменения сред работы (воздух – вода), при работе на произвольно ориентированных в пространстве поверхностях,

предназначенных для обслуживания и т.д. Помимо прочего при проведении регламентных работ возможны динамические воздействия природного характера, такие как ветер, волнение моря и течения в водной среде. Также необходимо учитывать то, что при эксплуатации робототехнических комплексов возникают дополнительные динамические нагрузки при использовании технологического оборудования, которые создают дополнительные силы и моменты, отрицательно влияющие на устойчивость положения робота на поверхности перемещения. Наиболее часто такие возмущающие воздействия происходят во время обслуживания робототехническими комплексами корпусов судов на рейде или в открытом море (см. Рис. 1).



Рис. 1. РТК, разработанный компанией Fleet Cleaner ([1])

Периодические регламентные операции по очистке корпусов судов от обрастаний являются необходимым условием эффективной эксплуатации морских и речных судов. Пресная и морская вода служит средой для развития на корпусах судов различных организмов растительного и животного мира, они обрастают ракушками и водорослями, и это существенно влияет на ходовые качества и расход топлива судна. Современные лакокрасочные покрытия не могут гарантировать надёжную защиту от обрастаний корпуса судна. Исходя из этого, необходимость проведения работ по своевременной очистке поверхностей судна (Рис. 2) становится актуальной задачей.

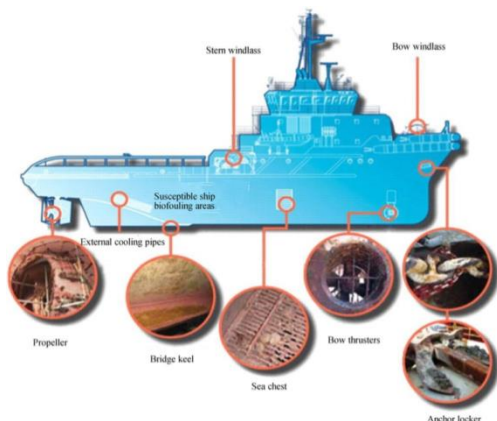


Рис. 2. Различные типы био обрастаний на корпусе судна. ([2])

Для закрепления на поверхности, РТК используют чаще всего или магнитные устройства фиксации на поверхности или, в особенности, когда поверхность не обладает выраженными ферромагнитными

свойствами, вакуумные захватные устройства [7-9]. В Институте проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского (ИПМех РАН) разработан многофункциональный инспекционный робот вертикального перемещения с измерительной технологической платформой, спроектированной по принципу модульной системы. На базе транспортного робота вертикального перемещения, использующего для закрепления на поверхности вакуумные захватные устройства эжекторного типа, формируются модули технологической оснастки, в состав которых входят измерительное и инспекционное оборудование, а также подсистемы управления движением и измерениями (Рис. 3).



Рис. 3. Мобильный робот вертикального перемещения на вертикальной поверхности

Для закрепления робота на поверхности используются присоски, в качестве генератора разрежения под присосками обычно используются воздушные эжекторы. Воздушные эжекторы, используемые в качестве устройств генерации разрежения в различных средах, были изучены ранее в работах [3-6, 10, 11].

Для надёжного закрепления на поверхности перемещения во время автоматического цикла движения РТК учитывается необходимый уровень вакуума в присоске и скорость формирования этого вакуума. При функционировании РТК в водной среде при его перемещении по поверхности в полость вакуумирования под присоской попадает вода, что сильно влияет на газодинамические процессы и приводит к замедлению образования в этой полости требуемого уровня вакуума. Использование воздушных эжекторов на РТК в устройствах закрепления на поверхности, произвольно ориентированной в пространстве, даёт возможность функционировать как в воздушной, так и в водной среде при воздействии на него различных динамических нагрузок. Периодические возмущения внешней среды, а также постоянная внешняя нагрузка, приходящаяся на робот и элементы его конструкции, не должны приводить к потере сцепления робота с поверхностью, а в долгосрочной перспективе – к повышению позиционной ошибки, приводящей к потере курса его движения, вследствие деформации и сдвига присосок в процессе их функционирования.

1. Подготовка эксперимента

Для проведения эксперимента был построен полноразмерный испытательный стенд, на котором были исследованы газодинамические и гидродинамические процессы, протекающие в вакуумных захватных устройствах, функционирующих в различных средах (воздух, вода). Для полноты получаемых данных на стенде были экспериментально исследованы особенности функционирования вакуумного захватного устройства в составе робота вертикального перемещения в различных средах и при различных входных параметрах подаваемого рабочего тела (сжатого воздуха).

Ранее проводился эксперимент на отрыв присоски. При этом существенных изменений пневматическая схема стенда не понесла. Пневматическая схема стенда, изображённого на рис.4, состоит из следующих компонентов: 1 – источник сжатого воздуха, 2 – ресивер, 3 – влагопоглотитель, 4 – фильтр, 5 – манометр, контролирующий входное давление, 6 – редуктор входного давления, 7 – электропневматический клапан управления движением пневмоцилиндра, формирующего усилие отрыва, 8 – электропневматический клапан управления движением пневмоцилиндра, формирующего усилие сдвига, 9 – электропневматический клапан подачи питания эжектора.

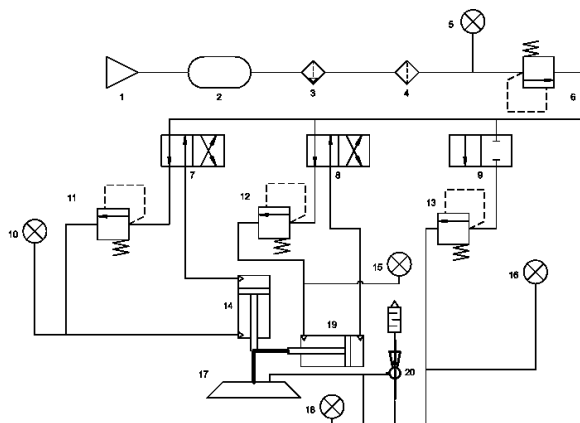


Рис. 4. Пневматическая схема испытательной установки

10 – датчик давления с манометром, контролирующий давление питания пневмоцилиндра, формирующего усилие отрыва, 11 – редуктор давления питания пневмоцилиндра, формирующего усилие отрыва, 12 – редуктор давления питания пневмоцилиндра, формирующего усилие сдвига, 13 – редуктор давления питания эжектора, 14 – пневмоцилиндр, формирующий усилие отрыва, 15 – датчик давления с манометром, контролирующий давление питания пневмоцилиндра, 16 – датчик давления с манометром, контролирующий давление питания эжектора, 17 – присоска, 18 – датчик вакуума с вакууметром, контролирующий вакуум в присоске, 19 – пневмоцилиндр, формирующий усилие сдвига, 20 – эжектор генерирующий вакуум в присоске. Рассмотрим схему экспериментального стенда, изображённого на рисунке 5.

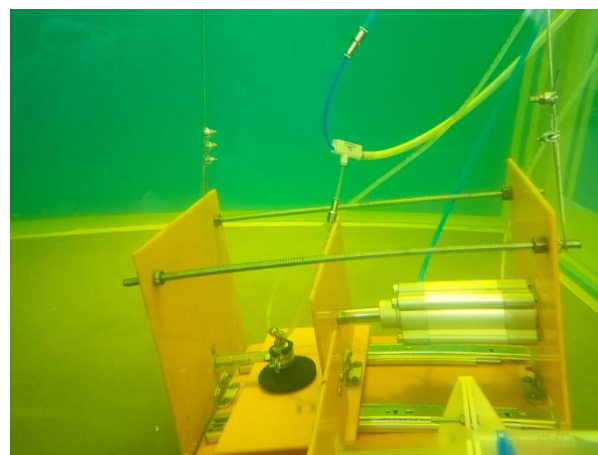
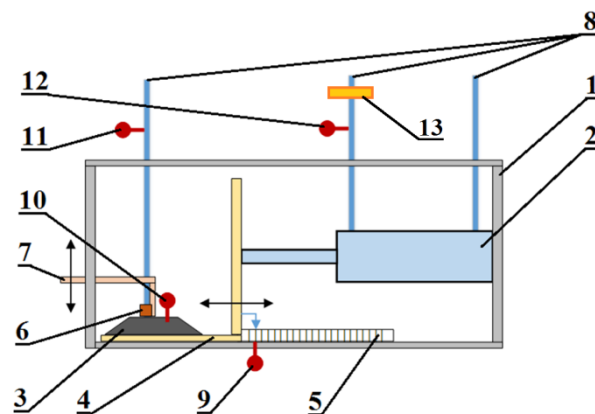


Рис. 5. Схема экспериментального стенда для исследования газодинамических процессов при сдвиге присоски (вверху), фотография экспериментального стенда погруженного в бассейн (внизу)

На этом стенде была проведена серия натурных испытаний по изучению особенностей изменения уровня вакуума в вакуумируемой полости присоски при имитации приложения сдвигающего усилия к самой присоске. При этом эксперименты проводились с учётом смены среды с воздушной на водную с воздействием внешнего давления на систему при погружении на 1 и 2 метра.

Физический экспериментальный стенд состоит из жёсткой рамы 1, в основании которой установлены направляющие для скользящей платформы 4. Эта платформа приводится в движение пневмоцилиндром 2, формирующим усилие сдвига присоски 3. Присоска 3 закреплена на штанге имеющей по вертикали свободу хода, что позволяет гофрированной части присоски свободно деформироваться при образовании вакуума в вакуумируемой области и при этом не отклонять центральную ось присоски относительно вертикальной оси, что позволяет избежать паразитных моментов при проведении эксперимента. Рейка 5, закреплённая на горизонтальной части рамы, используется для определения перемещения платформы 4 и имеет потенциометрический датчик 9 для измерения перемещений в реальном времени. Для генерации вакуума в присоске 3 используется воздушный эжектор 6, а уровень разрежения в камере контролируется датчиком вакуума 10. Эжектор питается сжатым воздухом из магистрали 8 (слева) и имеет выход в окружающую среду. Давление питания эжектора измеряется датчиком

давления 11. Магистрали 8 (справа) подключены к пневмоцилиндру 2, и на магистрали, питающей штоковую полость на втягивание пневмоцилиндра, установлен цифровой редуктор давления 13 с функцией программирования уровня давления, что даёт возможность реализовать переменное сдвигающее усилие на присоске. Давление в штоковой полости измеряется датчиком давления 12.

2. Проведение эксперимента

Серия экспериментов с присоской на сдвиг состояла из трёх этапов. Первый этап заключался в проведении эксперимента в воздушной среде с целью подтверждения заявленных производителем характеристик присоски и эжектора при эксплуатации в предназначенной для них рабочей среде. В начале эксперимента присоска была установлена в рабочее положение на экспериментальную текстолитовую пластину с известными характеристиками шероховатости (5 мкм). На вход эжектора подавалось давление от 2 до 6 ат с шагом в 2 ат (Рис. 6).

В области вакуумирования присоски создавалось разрежение, приводящее к фиксации присоски на поверхности образца текстолита. После срабатывания датчика давления, фиксирующего необходимый уровень вакуума в присоске, начиналась стадия эксперимента, в которой происходила подача давления в штоковую полость пневмоцилиндра. Давление в этой области пропорционально увеличивалось со временем так, чтобы привести в движение шток, создав втягивающую силу, достаточную для сдвига присоски по поверхности образца текстолита. При этом считывались показания потенциометрического датчика, фиксирующего положение подвижной платформы с образцом поверхности. Эти данные в реальном времени соотносились с текущим уровнем давления питания эжектора, уровнем разрежения в присоске и давлением, фиксируемым датчиком давления питания пневмопривода, переведённым для удобства в силу воздействия на присоску на сдвиг со стороны пневмопривода.

Результаты эксперимента при давлении питания эжектора 2 ат можно увидеть на рисунке 6 в виде графиков красного цвета. Как видно из графиков, разрежение в присоске в начале эксперимента было достигнуто на уровне -0,25 ат. Начало сдвига присоски в воздушной среде при 2 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 128 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 163 Н.

Результаты аналогичного эксперимента, но уже проведённого при давлении питания эжектора 4 ат, изображены на рисунке 6 зелёным цветом. Здесь разрежение в присоске в начале эксперимента было достигнуто на уровне -0,75 ат. Начало сдвига присоски в воздушной среде при 4 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 218 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 256 Н.

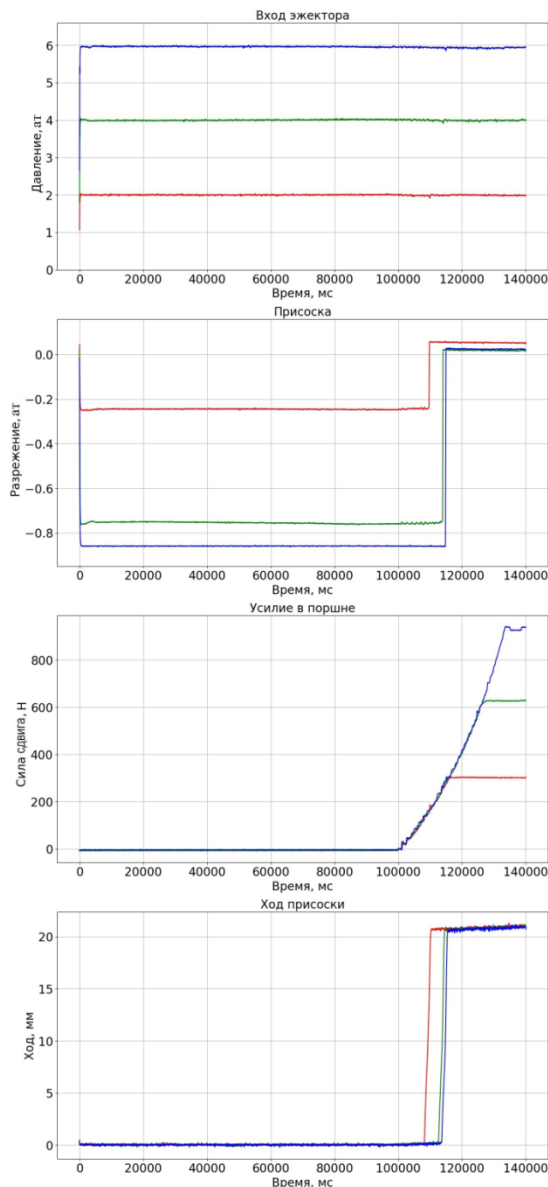


Рис. 6. Результаты экспериментов на воздухе

На рисунке 6 синим цветом изображены результаты продолжения эксперимента в воздушной среде. На этом этапе на вход эжектора подавалось давление воздуха 6 ат. Разрежение в присоске в начале эксперимента было достигнуто на уровне -0,87 ат. Начало сдвига присоски в воздушной среде при 6 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 241 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 302 Н. Полученные в воздушной среде результаты экспериментов на сдвиг присоски показывают соответствие заявленному производителем уровню вакуума.

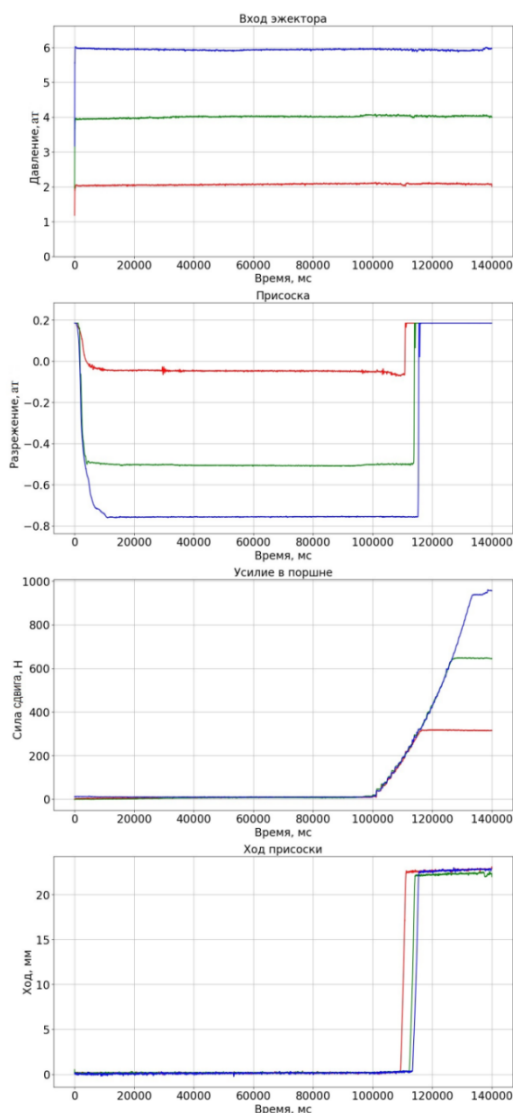


Рис. 7. Результаты экспериментов при погружении на 1 метр

В процессе испытаний были получены референсные значения усилий, превышение которых при определённом уровне питания эжектора приводит к потере фиксации. Эти данные можно использовать при проектировании роботов вертикального перемещения, у которых присоски выполняют функцию фиксации к поверхности перемещения. Следующий этап испытаний заключался в смене внешней среды с воздушной на водную при глубине погружения испытательного стенда на 1 метр.

Данные эксперименты должны были показать возможность применения типовой сборки (воздушный эжектор - присоска) под водой в составе устройства фиксации робота вертикального перемещения и возможности расширения его области применения. Помимо возможности применения были проанализированы особенности эксплуатации элементов стенда в водной среде. На рисунке 7 – результаты, полученные при погружении стенда на глубину 1 метр при температуре воды 20 градусов Цельсия.

На этом этапе на вход эжектора подавалось давление воздуха 2 ат. Исходя из того, что глубина

погружения составляла 1м, давление сопротивления воды на выходе эжектора составило 0,1 ат, что внесло изменения в параметры (давление и расход) в камере смешивания в эжекторе и повлияло на генерацию вакуума в камере вакуумирования присоски. Помимо этого в камеру вакуумирования до начала эксперимента попадала вода, которая снижала скорость истечения из эжектора водовоздушной смеси ввиду своей плотности. Это иллюстрируют графики красного цвета на рисунке 7. Так, например, видно, что разрежение в присоске в начале эксперимента было достигнуто на уровне -0,14 ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 2 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 200 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 241 Н. Увеличение давления питания эжектора до 4 ат даёт следующие результаты (Рис. 7, графики зелёного цвета). В данном эксперименте разрежение в присоске было достигнуто на уровне -0,59 ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 4 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 274 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 307 Н.

Дальнейшее повышение давления питания эжектора до 6 ат (Рис. 7, графики синего цвета) привело к уменьшению времени переходного процесса присасывания самой присоски, что видно на рисунке 7.

Разрежение в присоске было достигнуто на уровне -0,82 ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 6 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 298 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 344 Н.

Следующий этап исследования присоски на сдвиг производился при глубине погружения стенда на 2 м от поверхности. Рисунок 8 содержит результаты этого этапа при давлении питания эжектора 2 ат (отмечено красными графиками). Разрежение в присоске в начале эксперимента было достигнуто на уровне -0,08 ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 2 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 237 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 274 Н.

Дальнейшее увеличение давления питания эжектора до 4 ат привело к получению результатов, изображённых на рисунке 8 графиками зелёного цвета.

Разрежение в присоске было достигнуто на уровне -0,53 ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 4 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 296 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 341 Н.

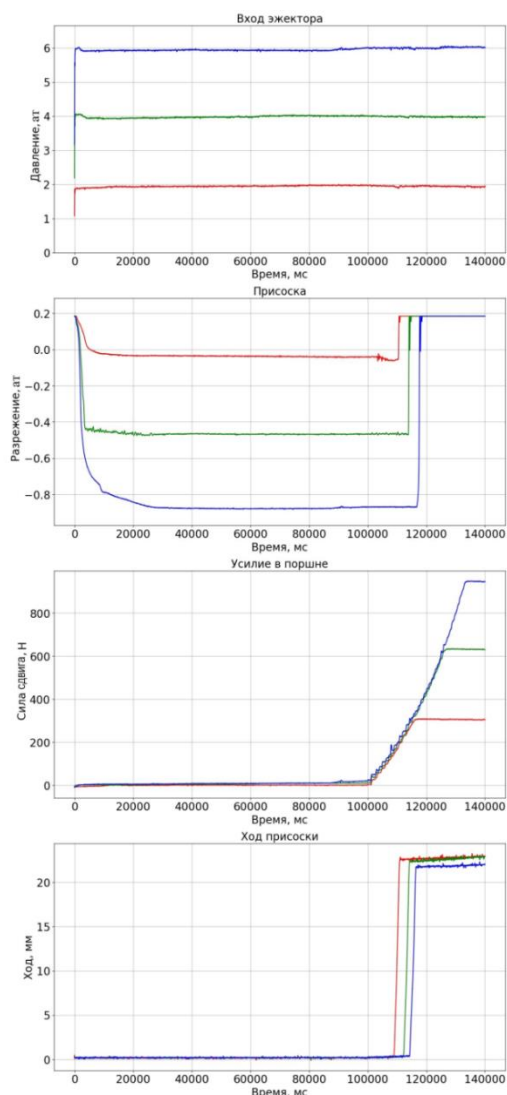


Рис. 8. Результаты экспериментов при погружении на 2 метра

Последний из этой серии испытаний эксперимент проходил в условиях подачи питания на эжектор в 6 ат (Рис 8, графики синего цвета). В этом случае разрежение в присоске было достигнуто на уровне - 0,8 ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 6 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 306 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 352 Н.

Заключение и выводы

Данное исследование позволило понять, как именно изменяется уровень вакуума в присосках в условиях смены среды функционирования робота, что дало важный технический результат, который можно использовать для проектирования систем управления подобными роботизированными платформами. Полученные критические значения параметров сцепления позволяют оценить надёжность крепления робота к поверхности и повысить эффективность его перемещения по этой поверхности с учётом сдвиговых динамических нагрузок со стороны недетерминированной среды. Таким образом, можно, например, предотвратить потерю курса движения робота вследствие случайного сдвига присосок из-за внезапного удара волны о корпус робота при его переходе из воздушной среды в водную (и обратно), перемещаясь по поверхности корпуса судна.

Литература

- Интернет ресурс URL: <https://www.fleetcleaner.com/technology/#FCROBOT>
- Bixler GD, Bhushan B (2012) Biofouling: lessons from nature. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci* 370(1967):2381–2417
- И. Л. Ермолов, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов Исследования надежности сцепления пневматического робота вертикального перемещения с вакуумными захватными устройствами на корпусе судна // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2023. — № 4. — С. 40–45.
- Градецкий В.Г., Князьков М.М., Семёнов Е.А., Суханов А.Н. Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными эжекторами // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17. — № 3 — С. 172-177. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau/17.172-177>.
- Градецкий В.Г., Князьков М.М., Кравчук Л.Н., Крюкова А.А., Семенов Е.А., Суханов А.Н., Чашухин В.Г. Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2017. — Т. 18. — № 7. — С. 447-452. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau/18.447-452>.
- Ф. М. Бельченко, М. М. Князьков, Е. А. Семенов и др. Исследования газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2023. — № 9. — С. 15–21.
- Man Hyung Lee, Yu Dark Park, Hyung Gyu Park, et. al. Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* — # 4, — p. 335-352, DOI:10.3744/JNAOE.2012.4.4.335, 2012.

8. Houssam Albitar, Kinan Dandan, Anani Ananiev and Ivan Kalaykov. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2016. <https://doi.org/10.5772/62060>.
9. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, 1998, London. DOI:https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
10. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2019. — Т. 20. — № 7 — С. 417-421. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau.20.417-421>.
11. Gradetsky V.G., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N., Chashchukhin V.G. Particularities of Wall Climbing Robot Motion on Underwater Environments // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2018. — Т. 19. — № 9. — С. 608-611. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau.19.608-611>.

References

1. Интернет ресурс URL: <https://www.fleetcleaner.com/technology/#FCROBOT>
2. Bixler GD, Bhushan B (2012) Biofouling: lessons from nature. Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci 370(1967):2381–2417
3. I. L. Ermolov, M. M. Knyazkov, E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, Issledovaniya nadezhnosti stsepleniya pnevmaticheskogo robota vertikal'nogo peremeshcheniya s vakuumnymi zakhvatnymi ustroystvami na korpuse sudna [Studies on the reliability of coupling of a pneumatic vertical movement robot with vacuum gripping devices on the hull of a vessel] *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2023. — № 4. — pp. 40–45.
4. Gradetskiy V.G., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. Adaptivnye zakhvatnye ustroystva mobil'nykh robotov s miniaturnymi ezhektorami [Adaptive gripping devices of mobile robots with miniature ejectors] *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. — 2016. — Т. 17. — № 3 — pp. 172-177. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau.17.172-177>.
5. Gradetskiy V.G., Knyaz'kov M.M., Kravchuk L.N., Kryukova A.A., Semenov E.A., Sukhanov A.N., Chashchukhin V.G. Upravlyаемое formirovanie vakuuma v ustroystvakh stsepleniya s poverkhnostyami pri dvizhenii mobil'nykh robotov s aerodinamicheskim prizhimom [Controlled vacuum formation in surface coupling devices when moving mobile robots with aerodynamic clamping] *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2017., Vol. 18., №7., pp. 447-452. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.18.447-452>.
6. F. M. Bel'chenko, M. M. Knyaz'kov, E. A. Semenov i dr. Issledovaniya gazodinamicheskikh i gidrodinamicheskikh protsessov v polostyakh i kanalakh vakuumnykh zakhvatnykh ustroystv [Studies of gas-dynamic and hydrodynamic processes in cavities and channels of vacuum gripping devices] *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2023. — № 9. — pp. 15–21.
7. Man Hyung Lee, Yu Dark Park, Hyung Gyu Park, et. al. Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* # 4, — p. 335-352, DOI:10.3744/JNAOE.2012.4.4.335, 2012.
8. Houssam Albitar, Kinan Dandan, Anani Ananiev and Ivan Kalaykov. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems, *International Journal of Advanced Robotic Systems*. — 2016. <https://doi.org/10.5772/62060>.
9. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, 1998, London. DOI:https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
10. Gradetskiy V.G., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. Dinamicheskie protsessy v vakuumnykh kontaktnykh ustroystvakh robotov vertikal'nogo peremeshcheniya v vodnoy srede [Dynamic processes in vacuum contact devices of vertical movement robots in an aqueous environment] *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. — 2019. — Vol. 20. — № 7 — pp. 417-421. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau.20.417-421>.
11. Gradetsky V.G., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N., Chashchukhin V.G. Particularities of Wall Climbing Robot Motion on Underwater Environments // *Mechatronics, automation, control*. — 2018. — Vol. 19. — № 9. — pp. 608-611. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau.19.608-611>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors state that they have no conflict of interest.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бельченко Филипп Михайлович, младший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-7596-9970, e-mail: philepp@mail.ru

Князьков Максим Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-5863-4079, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Остриков Павел Павлович, ведущий программист, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0009-0000-7569-1246, e-mail: ostricov93@yandex.ru

Семенов Евгений Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-6196-1433, e-mail: sim1165@mail.ru

Суханов Артем Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, ORCID: 0000-0002-4122-492X, e-mail: sukhانov-artyom@yandex.ru

Philepp M. Belchenko, Junior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7596-9970, e-mail: philepp@mail.ru

Maxim M. Knyazkov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-5863-4079, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Pavel P. Ostrikov, Lead programmer, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0009-0000-7569-1246, e-mail: ostricov93@yandex.ru

Evgeniy A. Semenov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-6196-1433, e-mail: sim1165@mail.ru

Artem N. Sukhanov, Ph.D. (Eng), Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4122-492X, e-mail: sukhанov-artyom@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2024.

Научная статья

УДК 681.518.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.077>

Метод формирования программной скорости движения группы БПЛА

Губанков А.С.^{1,2,3} gubankov@dvo.ru, Горностаев И.В.^{1,2,3} gornostaev_iv@mail.ru¹МГУ им. адм. Г.И. Невельского, ²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, ³Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Аннотация. В статье представлены результаты разработки метода автоматического формирования программных скоростей движения автономных беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа, выполняющих различные полетные задания (такие как, например, мониторинг морских и прибрежных территорий для отслеживания популяций редких и промысловых видов, оценка потенциальных объемов биологических ресурсов, аэрофотосъемка и т.д.) поодиночке или в составе группы (строя). При этом траектории движения этих летательных аппаратов задаются гладкими пространственными кривыми – параметрическими сплайнами третьего порядка, что позволяет легко их корректировать в процессе выполнения задания. Для поддержания высокой скорости движения аппаратов по траекториям при одновременном сохранении заданной точности перемещения (без нарушения строя) в работе предлагается непосредственно в процессе выполнения миссии корректировать указанную скорость таким образом, чтобы исполнительные устройства всех аппаратов успевали обеспечивать их требуемые перемещения с учетом ограничений на развиваемые движителями векторы тяги. При этом для расчета значений программных скоростей использовалась упрощенная модель динамики квадрокоптера, учитывающая влияние силы ветра, сопротивления среды, силы тяжести и суммарного вектора силы тяги движителей аппарата. Синтезируемые на основе этого метода системы могут быть реализованы даже на маломощных бортовых вычислительных устройствах беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультироторный тип, программная скорость, ограничения.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 24-29-00489).

Для цитирования: Губанков А.С., Горностаев И.В. Метод формирования программной скорости движения группы БПЛА. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 33–41. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.077

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.077>

Method of generating a reference movement speed of a group of UAVs

Anton S. Gubankov^{1,2,3} gubankov@dvo.ru, Igor V. Gornostaev^{1,2,3} gornostaev_iv@mail.ru¹Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, ²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS,³M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS

Abstract. The article presents the results of the development of a method for the automatic formation of reference speeds for autonomous unmanned aerial vehicles of multirotor type, performing specified missions (such as monitoring of the sea and coastal territory in order to track populations of rare and endangered species, as well as evaluating the potential volumes of biological resources) singly or as part of a group (in formation). At the same time, the trajectories of these aircraft are set by smooth spatial curves – parametric splines of the third order, which makes it easy to adjust the specified trajectories during the mission. In order to maintain a high speed of movement of vehicles along trajectories with high accuracy of movement and saving formation, it is proposed to adjust the specified speed directly during the mission in such a way that the thrusters can ensure their required movements, taking into account the restrictions on the thrust vectors. At the same time, a simplified model of the dynamics of a quadcopter was used to calculate the values of reference speeds, taking into account the influence of wind force, environmental resistance, gravity and the total thrust vector of the propellers. The systems synthesized on the basis of this method can be implemented even on low-power onboard computing devices of unmanned aerial vehicles.

Key words: unmanned aerial vehicle, group control, multirotor type, reference speed.

Financial Support: the research is supported by Russian Science Foundation (grant № 24-29-00489).

For citation: Anton S. Gubankov, Igor V. Gornostaev, Method of generating a reference movement speed of a group of UAVs, Marine intellectual technologies. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 33–41. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.077

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят всё более широкое применение в решении прикладных задач в различных областях человеческой деятельности (см.

обзорные статьи [1,2]). В морских и океанических условиях эти задачи связаны основным с выполнением осмотровых работ, таких как 1) мониторинг морских и прибрежных территорий для отслеживания популяций редких и промысловых видов [3]; 2) оценка потенциальных объемов биологических ресурсов (за счет анализа размеров

косяков рыб), аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование и т.д. Из-за необходимости по возможности быстрого осмотра значительных площадей, указанные работы целесообразно осуществлять группой БПЛА, выполняющих движение в общем построении на заданном расстоянии между собой. При этом для каждого БПЛА в построении требуется решать задачи планирования траектории и выбора режима движения (скорости).

Решение задачи планирования траекторий движения групп БПЛА подробно рассмотрено в ряде работ (см. обзорную статью [4]). С использованием известных методов удается синтезировать системы, позволяющие формировать программные траектории даже с учетом необходимости обхода БПЛА препятствий (элементов ландшафта). При этом обычно для задания траекторий используют параметрические сплайны [5–7], а для их расположения в пространстве применяют методы потенциальных полей [8], штрафных функций [9] и генетические алгоритмы [10]. Однако, как правило, в этих методах предполагается, что скорость движения БПЛА (отдельно взятого или действующего в группе) уже известна, например, постоянна и равна заданному оператором значению. При этом ограничения на величину развиваемого движителями БПЛА вектора тяг не учитываются, что может приводить к тому, что при изменении условий окружающей среды, например, силы ветра, как описано в работе [11], один или несколько беспилотников в группе не смогут поддерживать выбранный режим движения. Это может привести к нарушению построения и прерыванию текущей миссии. Возникновение таких аварийных ситуаций над морской поверхностью без наличия соответствующей системы управления может привести к полной потере дорогостоящего оборудования. Из-за этого задача формирования такой программной скорости движения группы БПЛА, при которой миссия будет выполнена как можно быстрее, а строй беспилотников не будет нарушен, становится актуальной.

Решению задачи формирования режимов движения БПЛА посвящен ряд работ [12–17].

Для задания программной скорости часто используются профили скорости [12,13], определяющие зависимость этой скорости от времени. При этом общий для всего профиля уровень скорости задают из расчета на наихудшие условия движения, заведомо снижая ее даже на участках, где возможно движение с большей скоростью. В работах [14–16] для задания программной траектории и скорости выполняется решение оптимизационных задач с целью выполнения миссии за минимальное время, а в работе [17] для решения этой задачи применен метод потенциальных полей, позволяющий не только избегать столкновения с препятствиями, но и одновременно корректировать программную скорость БПЛА при их обходе. Общим недостатком этих методов является то, что они либо не позволяют учесть ограничения на развиваемый движителями БПЛА вектор тяги, либо их затруднительно применить для управления группой БПЛА, траектория движения которой и условия окружающей

среды могут измениться уже после начала выполнения миссии.

Таким образом, задача автоматического формирования режимов движения группы БПЛА (или в частном случае отдельного БПЛА) по гладкими пространственными траекториям является актуальной, но для ее успешного решения необходимо учитывать параметры не только беспилотного аппарата, но и известные параметры окружающей среды, которые в процессе выполнения миссии могут существенно изменяться.

Постановка задачи

Целью работы является разработка метода автоматического формирования предельно высокой программной скорости движения группы БПЛА (или, в частном случае, отдельного аппарата) по заранее задаваемым параметрическими сплайнами третьего порядка траекториям. При движении с этой скоростью должна сохраняться требуемая динамическая точность управления с учетом ограничений на развиваемые векторы тяги всех БПЛА. Создаваемые на основе этого метода системы должны быть реализуемы на малоомощных бортовых вычислительных устройствах БПЛА.

Разработка метода формирования программной скорости движения группы БПЛА

Решение этой задачи предлагается начать с формирования программной скорости отдельного БПЛА, а затем расширить это решение для группы беспилотников. С целью уменьшения вычислительной сложности разрабатываемого метода расчет программной скорости движения БПЛА будет производиться по упрощенной модели беспилотника мультироторного типа. В этой модели БПЛА представлен в виде материальной точки, перемещающейся по траектории в неподвижной абсолютной системе координат (АСК), а его пространственная ориентация в процессе движения не учитывается. Это позволяет исключить из рассмотрения моменты действующих сил, а также влияние гироскопических эффектов со стороны движителей. Это упрощение допустимо при выполнении многих реальных полетных заданий, связанных с его перемещениями по протяженным траекториям (мониторинг окружающей среды, объектов инфраструктуры и пр.).

Таким образом, вектор равнодействующей всех сил F_{Σ} в АСК (см. рис. 1), приложенных к центру масс БПЛА можно записать как

$$F_{\Sigma} = ma = F_t + F_g + F_w + F_{res}, \quad (1)$$

где m – масса БПЛА; $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ – вектор ускорения центра масс БПЛА в АСК; F , F_g , F_w и F_{res} – векторы суммарной силы тяги движителей БПЛА, силы тяжести, силы воздействия ветра на БПЛА и силы сопротивления воздуха в АСК соответственно.

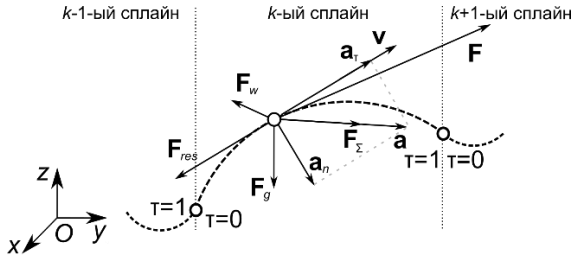


Рис. 1. Силы, действующие на БПЛА при его движении по k-му сплайну пространственной траектории в АСК

Для расчета искомой высокой программной скорости v^* , при движении с которой величина вектора тяги $|F|$ не будет превышать ее максимальное допустимое значение $|F_{max}|$, сначала перепишем уравнение (1) так, чтобы получить зависимость вектора тяги F от величины скорости v и ускорения dv/dt .

Для этого используем известный способ задания пространственных траекторий с помощью параметрических сплайнов третьего порядка, различные типы которых рассмотрены в работах [5–7]. Траектория в этом случае состоит из K соединенных кривых (сплайнов), а положение программной точки (x, y, z) в АСК $Oxyz$, за которой следует БПЛА, на каждом сплайне однозначно определяется величиной параметра $t \in [0, 1]$ (см. рис. 1). В результате, для записи векторов скорости v и ускорения a в АСК можно использовать полученные в работе [18] выражения:

$$v = Av = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{dt}{dt} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{v}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}, \quad (2)$$

$$a = \left(\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{B_x W_x + B_y W_y + B_z W_z}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \right) \times \frac{v^2}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{dv/dt}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}, \quad (3)$$

где A – единичный вектор, задающий направление вектора скорости v ; $B_x(t)$, $B_y(t)$, $B_z(t)$, $W_x(t)$, $W_y(t)$, $W_z(t)$ – соответственно первые и вторые производные координат $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ по параметру t . Первое слагаемое в (3), пропорциональное v^2 , – это величина вектора нормального ускорения a_n , а второе, пропорциональное ускорению dv/dt , – единичный вектор, определяющий направление вектора a_t .

С учетом того, что силу сопротивления среды F_{res} упрощенно можно представить как пропорциональную квадрату скорости v^2 (см. [11]), а ее направление с учетом принятых допущений противоположно вектору скорости v , то есть

$$F_{res} = -Ak_{res}v^2,$$

где k_{res} – коэффициент сопротивления воздуха, зависящий от формы БПЛА, плотности воздуха, его температуры и др., перепишем уравнение (1) в следующем виде:

$$m \left(\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{B_x W_x + B_y W_y + B_z W_z}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \right) \times \frac{v^2}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{dv/dt}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} = \quad (4)$$

$$= F + F_g + F_w - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{k_{res}}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} v^2.$$

Уравнение (4) описывает зависимость ускорения dv/dt от вектора силы тяги F при текущих значениях скорости v и положения центра масс БПЛА, определяемого параметром t на k -ом сплайне траектории, при наличии известного вектора силы тяжести F_g и переменных, но измеряемых в процессе движения векторов силы ветра F_w и силы сопротивления среды F_{res} . Из него видно, что за счет вектора силы тяги F осуществляется не только заданное движение БПЛА по пространственной траектории, но также компенсация внешних силовых воздействий (F_g , F_w , F_{res}) и центробежной силы, возникающей на криволинейных участках этой траектории.

С использованием (4) решим задачу формирования такой предельно высокой программной скорости движения центра масс отдельного БПЛА, которая может быть отработана типовой системой управления с учетом ограничений, накладываемых на величину вектора тяги $|F| \leq |F_{max}|$. Для этого сначала рассчитаем значение верхней границы программной скорости $v_m(t)$, превышение которой гарантированно приведет к нарушению указанного условия, когда величины вектора тяги $|F| = |F_{max}|$ будет недостаточно для компенсации перечисленных выше сил даже при движении БПЛА с текущей постоянной скоростью (при $|a_t| = 0$).

Для этого перепишем уравнение (4), принимая $dv/dt = 0$, $v = v_m$ и $F = F_{max}$, в следующем виде:

$$F_{max} = (\tilde{F}_{\Sigma n} - \tilde{F}_{res})v_m^2 - F_g - F_w, \quad (5)$$

где

$$\tilde{F}_{\Sigma n} = m \left(\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{B_x W_x + B_y W_y + B_z W_z}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \right) \times \frac{1}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2},$$

$$\tilde{F}_{res} = - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \frac{k_{res}}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}.$$

Это векторное уравнение (5) перепишем в скалярном виде по трем проекциям на координатные оси x , y и z :

$$F_{max x} = (\tilde{F}_{\Sigma nx} - \tilde{F}_{res x})v_m^2 - F_{gx} - F_{wx},$$

$$F_{max y} = (\tilde{F}_{\Sigma ny} - \tilde{F}_{res y})v_m^2 - F_{gy} - F_{wy},$$

$$F_{max z} = (\tilde{F}_{\Sigma nz} - \tilde{F}_{res z})v_m^2 - F_{gz} - F_{wz}.$$

После чего с учетом того, что

$$|F_{max}| = \sqrt{F_{max x}^2 + F_{max y}^2 + F_{max z}^2}, \text{ запишем:}$$

$$|\mathbf{F}_{max}|^2 = \tilde{a}v_m^4 + \tilde{b}v_m^2 - \tilde{c}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{a} &= [(\tilde{F}_{\Sigma nx} - \tilde{F}_{res x})^2 + (\tilde{F}_{\Sigma ny} - \tilde{F}_{res y})^2 + \\ &+ (\tilde{F}_{\Sigma nz} - \tilde{F}_{res z})^2], \tilde{b} = -2[(\tilde{F}_{\Sigma nx} - \tilde{F}_{res x})(\tilde{F}_{gx} + \tilde{F}_{wx}) + \\ &+ (\tilde{F}_{\Sigma ny} - \tilde{F}_{res y})(\tilde{F}_{gy} + \tilde{F}_{wy}) + (\tilde{F}_{\Sigma nz} - \tilde{F}_{res z})(\tilde{F}_{gz} + \tilde{F}_{wz})], \\ \tilde{c} &= [(\tilde{F}_{gx} + \tilde{F}_{wx})^2 + (\tilde{F}_{gy} + \tilde{F}_{wy})^2 + (\tilde{F}_{gz} + \tilde{F}_{wz})^2]. \end{aligned}$$

Решением уравнения (6) является значение искомой скорости v_m . Для его решения проведем замену $v_m^2 = V$, решим полученное квадратное алгебраическое уравнение, после чего проведем обратную замену переменных и найдем искомые корни уравнения. Из полученных четырех корней два являются комплексно сопряженными и дальше не будут рассматриваться. Из оставшихся двух только один соответствует движению программной точки (и БПЛА) по траектории в сторону увеличения параметра t :

$$v_m = \sqrt{\frac{-\tilde{b} + \sqrt{\tilde{b}^2 - 4\tilde{a}(\tilde{c} - |\mathbf{F}_{max}|^2)}}{2\tilde{a}}}. \quad (7)$$

Отметим, что для корректного расчета скорости v_m с использованием представленного выражения (7) должны выполняться следующие условия:

- 1) $\tilde{a} \neq 0$, верное при $\tilde{\mathbf{F}}_{\Sigma n} \neq \tilde{\mathbf{F}}_{res}$;
- 2) $\tilde{b}^2 - 4\tilde{a}(\tilde{c} - |\mathbf{F}_{max}|^2) \geq 0$, выполняемое, пока величины вектора максимальной тяги $\mathbf{F}_{max}$ достаточно для обеспечения требуемого для точного движения по пространственной траектории нормального ускорения $\mathbf{a}_n$.

Согласно (7) формируется закон изменения $v_m(t)$ (см. рис. 2), определяющий верхнюю границу скорости v , движение с которой может быть обеспечено с учетом ограничения величины вектора силы тяги $\mathbf{F}$. Однако использовать этот закон в качестве программной скорости $v^*(t)$ движения центра масс БПЛА недопустимо, поскольку в общем случае эта величина является переменной на различных участках траектории, а для вывода закона (7) было принято, что величина тангенциального ускорения $|\mathbf{a}_t| = 0$. Таким образом, при формировании программной скорости $v^*(t)$ необходимо, чтобы эта скорость на всей траектории не превышала желаемую скорость $v_d(t)$, определяемую с учетом вида выполняемой миссии, а также рассчитанную скорость $v_m(t)$ (7), а на отдельных ее участках была дополнительно снижена для возможности осуществления движения с $|\mathbf{a}_t| \neq 0$.

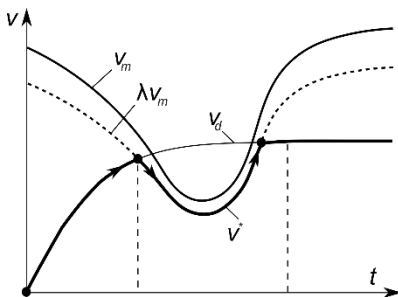


Рис. 2. Пример формирования программной скорости v^* с учетом желаемой v_d и рассчитанной v_m

Для формирования закона изменения программной скорости $v^*(t)$, при движении с которой будут соблюдаться наложенные на $|\mathbf{F}|$ ограничения, предлагается применить следующий простой подход [19]: непосредственно в процессе движения БПЛА согласно (7) рассчитывать текущее значение $v_m(t)$ для данного аппарата, после чего его программную скорость принимать равной

$$v^* = \min(\lambda v_m, v_d), \quad (8)$$

где $\lambda \in (0,1]$ – эмпирически подбираемый коэффициент.

В результате формируемая программная скорость v^* будет проходить на всех участках траектории заведомо ниже $v_m(t)$, что позволит сохранить требуемую высокую точность движений БПЛА по траектории.

Для формирования программной скорости движения группы БПЛА (см. рис. 3) описанная процедура расчета программной скорости v_i^* должна повторяться для каждого i -го аппарата, а общая скорость движения формации v^* , равная скорости движения БПЛА-лидера, должна выбираться такой, чтобы ни один из аппаратов не превышал рассчитанной для него скорости v_{mi} (7). При этом необходимо учитывать, что прямое сравнение скоростей движения v_i^* разных БПЛА, двигающихся в одном построении, недопустимо, поскольку в общем случае траектории движения всех дронов не параллельны. Из-за этого разные аппараты могут проходить различное расстояние по пространственным траекториям при движении в одном строю.

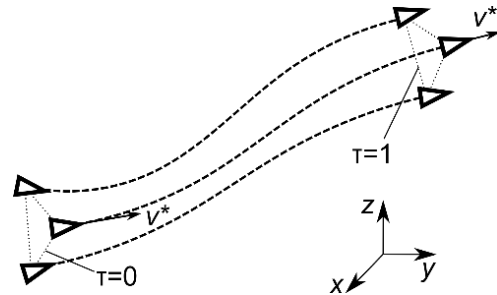


Рис. 3. Движение группы БПЛА, перемещающихся в общем строю по заданным пространственным траекториям в АСК

Поэтому предлагается при формировании программных траекторий движения (см. рис. 3) так располагать точки, используемые для задания параметрических сплайнов, чтобы одинаковым значениям параметра t (на k -м сплайне) соответствовали положения всех БПЛА, соответствующие их позициям в построении. Тогда при одинаковой для каждого БПЛА скорости dt/dt изменения параметра будет осуществляться синхронное движение всей группы в одном строю.

Это позволяет для выбора скорости движения всей формации сравнивать не скорости v_i^* движения отдельных БПЛА в АСК, а скорости изменения соответствующих им параметров t_i (см. dt/dt в (2)). Для этого вначале для каждого i -го БПЛА согласно (8) рассчитывается программная скорость v_i^* , затем по известной формуле [6]

$$dt_i/dt = v_i^* / \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2 + B_{zi}^2},$$

где B_{xi} , B_{yi} , B_{zi} – первые производные координат $x_i(t_i)$, $y_i(t_i)$, $z_i(t_i)$ по параметру t_i , однозначно определяющему положение программной точки (x_i, y_i, z_i) i -го БПЛА в АСК Оху z , вычисляется соответствующее значение скорости изменения параметра t_i . В результате, искомая скорость v^* движения всей группы БПЛА будет рассчитываться как

$$v^* = dt_i/dt \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2 + B_{zi}^2}, \quad (9)$$

где индекс i соответствует номеру БПЛА с наименьшей рассчитанной скоростью dt_i/dt .

Таким образом, система, реализующая описанный алгоритм формирования программной скорости для группы БПЛА, состоящей из n аппаратов, должна работать следующим образом.

Сначала для каждого из аппаратов согласно выражению (7) рассчитывается соответствующее значение скорости v_{mi} , $i = \overline{1, n}$. С учетом этих значений, а также заданного коэффициента λ и желаемого значения скорости v_d согласно (8) рассчитывается предварительное значение программной скорости v_i^* этого БПЛА. Затем, после расчета скоростей изменения параметров dt_i/dt и выбора из них минимальной, согласно (9) вычисляется искомая программная скорость v^* движения БПЛА-лидера, за которым по заданным параметрическим сплайнами траекториям следуют другие аппараты, автоматически подстраивая свои режимы движения с целью сохранения заданного строя.

Расчет скорости v^* для одного БПЛА с использованием предложенного метода (7)–(8) требует следующее количество операций на каждом дискретном интервале управления: 28 операций сложения / вычитания, 31 – умножения / деления, 3 – вычисление арифметического квадратного корня. Такая вычислительная сложность доступна даже для маломощных вычислительных бортовых устройствах БПЛА.

Результаты моделирования

Для исследования системы формирования программной скорости v^* , синтезированной с использованием описанного выше метода, проведено моделирование в среде Matlab. Рассматривалось движение группы из трех БПЛА, в которой за дроном-лидером 1 следуют аппараты 2 и 3 по гладким пространственным траекториям (см. рис. 4), построенным с использованием тринадцати параметрических В-сплайнов третьей степени [6]. Для упрощения рассмотрено движение БПЛА в горизонтальной плоскости на постоянной высоте $z = 20$ м. Все три БПЛА имели одинаковую массу $m = 1$ кг, сила ветра $F_w = [3 \ 3 \ 0]^T$ Н, коэффициент сопротивления среды $k_{res} = 1$.

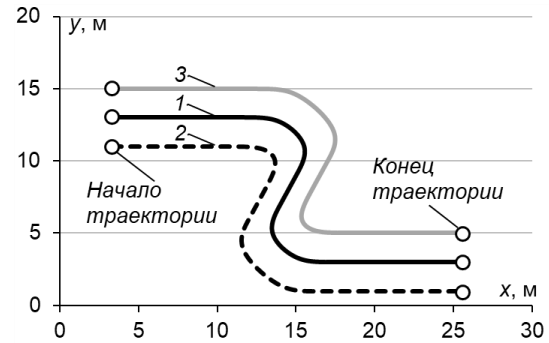
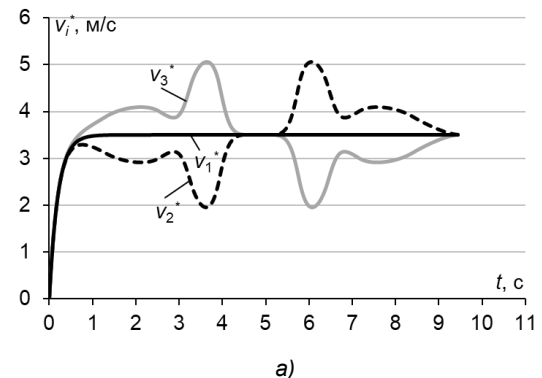


Рис. 4. Программные траектории движения центров масс трех БПЛА, перемещающихся в строе

Сначала рассмотрим движение группы БПЛА по заданным траекториям при следовании аппаратов 2 и 3 за лидером 1, скорость движения которого равна постоянному значению $v_d = 3.5$ м/с (см. v_1^* на рис. 5а).

На рис. 5а видно, что скорости движения 2-го v_2^* и 3-го v_3^* БПЛА автоматически подстраивались так, чтобы следовать за лидером 1, сохраняя заданное построение. При этом, поскольку при выполнении поворотов в строю (см. рис. 4) аппараты 2 и 3 проходят различное расстояние, то развиваемые ими скорости в соответствующие промежутки времени 3–4 и 5.5–6.5 с начинают существенно различаться, достигая значения 5 м/с. В результате нарушалось условие $v_i^* \leq v_{mi}$ (см. рис. 6а), а величина вектора тяги $|F_i|$ соответствующего дрона (см. рис. 7а) начинала превышать заданное максимально допустимое значение $|F_{max}| = 20$ Н. При управлении БПЛА в эти моменты времени его движительный комплекс не обеспечивал бы требуемую тягу, что привело бы к его сходу с траектории, нарушению строя и, возможно, потере аппарата из-за столкновения с другими БПЛА.

Очевидно, что для предотвращения этих нежелательных ситуаций можно снизить программную скорость v_1^* за счет уменьшения v_d до некоторого другого постоянного значения $v_d = 2.4$ м/с (это наибольшее постоянное значение v_1^* , при котором условие $v_i^* \leq v_{mi}$ будет непрерывно выполняться для всех БПЛА и заданный строй не будет нарушен). Однако из-за снижения скорости на всех участках траектории, даже на тех, где возможно поддерживать ее более высокое значение, время выполнения миссии увеличится на 12.7%.



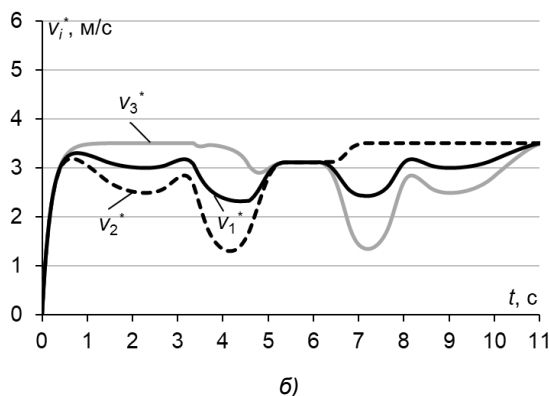
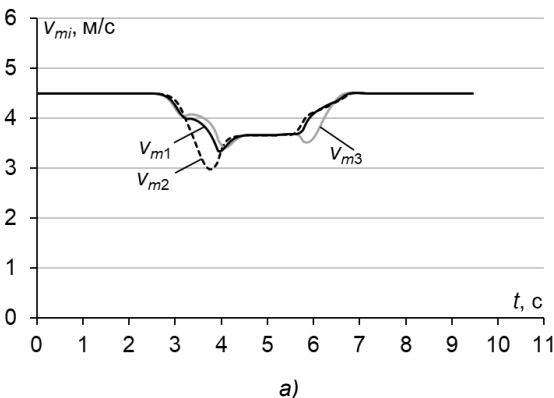


Рис. 5. Законы изменения программных скоростей v_i^* движения центров масс БПЛА при движении по траектории с а) постоянной скоростью; б) настраиваемой скоростью

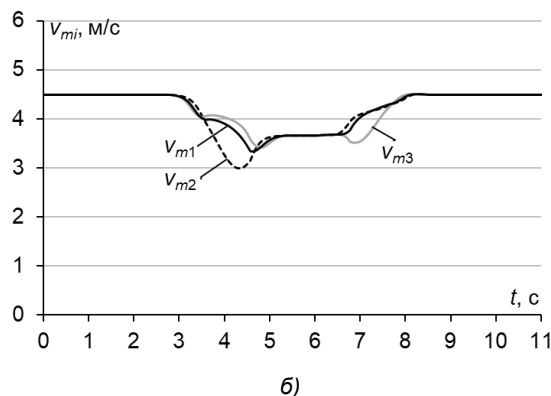
Теперь рассмотрим движение БПЛА по траектории при работе системы формирования скорости, синтезированной с использованием представленного выше метода. В этом случае программная скорость движения БПЛА-лидера v_1^* (см. рис. 5б) формировалась автоматически согласно (7)–(9). Заданный коэффициент $\lambda = 0.85$.

Сначала на интервале времени до 1 с скорость v_1^* возрастала до желаемого значения v_d . Затем до момента времени 3.5 с она уменьшалась, обеспечивая возможность 3-му БПЛА, двигающемуся за БПЛА-лидером 1 на коротком участке по более протяженной траектории (см. рис. 4), сохранять построение, при этом не превышая скорости v_d . Далее до момента времени 7 с программные скорости всех трех БПЛА уменьшались, не достигая значения v_d , с целью выполнения условий $v_i^* \leq \lambda v_{mi}$ (см. v_{m2} и v_{m3} на рис. 6б) и, следовательно, условий $|F_i| \leq |F_{max}|$ (см. рис. 7б). Затем до конца траектории скорость движения БПЛА-лидера v_1^* также корректировалась, поддерживая на этот раз движение 2-го БПЛА на участке траектории с большей длиной с желаемой скоростью v_d .

Таким образом, программные скорости движения всех БПЛА либо принимали значения, равные желаемой скорости v_d , либо на участках траектории, где величина v_{mi} снижалась, уменьшались до значения λv_{mi} , при этом неизменно сохраняя заданный строй.



а)

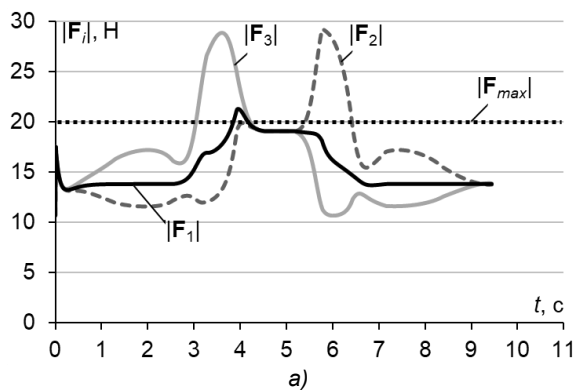


б)

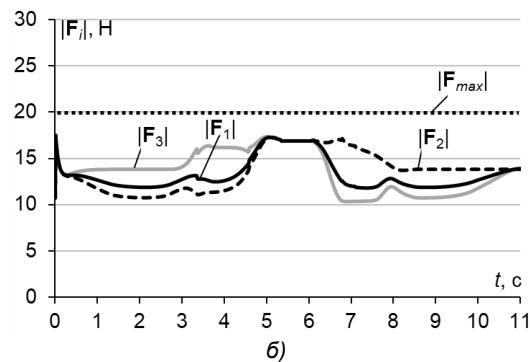
Рис. 6. Законы изменения рассчитанных скоростей v_{mi} движения центров масс БПЛА при движении по траектории с а) постоянной скоростью; б) настраиваемой скоростью

За счет того, что при работе указанной системы программная скорость v_1^* снижалась для сохранения строя только на отдельных участках траектории и при этом на рассчитанную величину, время прохождения траектории было уменьшено по сравнению с движением с наибольшей постоянной скоростью с 13.7 с до 11 с, то есть на 20%.

Полученные результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность предложенного метода. Причем при движении БПЛА по другим траекториям, на которых имеются участки с большей кривизной, или при других параметрах масс аппаратов и коэффициента сопротивления среды k_{res} величины v_{mi} уменьшаются до значений значительно ниже 3 м/с, эффективность предложенного подхода существенно возрастает.



а)



б)

Рис. 7. Законы изменения величин векторов тяги $|F_i|$ при движении БПЛА по траектории с а) постоянной скоростью; б) настраиваемой скоростью

Заключение

В работе описаны результаты разработки метода формирования программной скорости v^* движения БПЛА (одного или движущегося в составе группы). Эта скорость на различных участках траектории движения корректируется так, чтобы обеспечивать сохранение высокой точности перемещений

аппарата за счет поддержания величины вектора тяги на допустимом уровне, который может поддерживать стандартная бортовая система управления. При этом за счет упрощенного расчета программной скорости синтезируемые с использованием этого метода системы могут быть реализованы даже на маломощных бортовых вычислительных устройствах БПЛА.

Литература

1. Asif A.L., Awais K.J., Rashid Ali L., Haque N. Unmanned aerial vehicles: A review // *Cognitive Robotics*, vol. 3, 2023, pp. 8–22, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004>
2. Barbedo J.G.A. A Review on the Use of Unmanned Aerial Vehicles and Imaging Sensors for Monitoring and Assessing Plant Stresses // *Drones*, vol. 3, № 40, 2019, pp. 1–27, <http://dx.doi.org/10.3390/drones3020040>
3. Oleksyn S., Tosetto L., Raoult V., Joyce K.E., Williamson J.E. Going Batty: The Challenges and Opportunities of Using Drones to Monitor the Behaviour and Habitat Use of Rays // *Drones*, vol. 5, № 12, 2021, pp. 1–15, <https://doi.org/10.3390/drones5010012>
4. Liu Y., Bucknall R. A survey of formation control and motion planning of multiple unmanned vehicles // *Robotica*, vol. 36, № 7, 2018, pp. 1019–1047, <https://doi.org/10.1017/S0263574718000218>
5. Rogers D.F., Adams J.A. Mathematical elements for computer graphics // McGraw-Hill, 1976, 239 p.
6. Губанков А.С., Горностаев И.В. Исследование различных типов параметрических сплайнов для задания траекторий движения мехатронных объектов // Материалы XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024). Москва, 17-20 июня, 2024. С. 1685-1689.
7. Arasteh S.T., Kalisz A. Conversion between cubic Bezier curves and Catmull–Rom splines // *arXiv*, 2021, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00770-x>
8. Ziadi S., Njah M., Chtourou M. PSO-DVSF: A New Method for the Path Planning of Mobile Robots // *Proc. of the 16th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering, STA'2015, Monastir, Tunisia*, 2015, pp. 445–451, <https://doi.org/10.1109/STA.2015.7505116>
9. Saif O., Fantoni I., Zavala-Rio A. Distributed Integral Control of Multiple UAVs: Precise Flocking and Navigation // *IET Control Theory and Applications*, 2019, 13 (13), pp. 2008–2017, <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5684>
10. Zhao J., Zhang J., Wang J., Zhang X., Wang Y. Local Path Planning Algorithm for UGV Based on Improved Covariance Matrix Adaptive Evolution Strategy // *Proc. of the 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2021, pp. 1085–1091, <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601399>
11. Chan Y.Y., Kam K.H.N., Lee C.K.M., Li-Ta Hsu, K.L. Keung. Wind dynamic and energy-efficiency path planning for unmanned aerial vehicles in the lower-level airspace and urban air mobility context // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, vol. 57, pp. 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103202>
12. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: control, sensing, vision and intelligence // 1987, 580 p.
13. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control // Pearson Education International, 2005, 400 p.
14. Haschke R., Weitnauer E., Ritter H. On-Line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories // *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 3248–3253, <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2008.4650924>
15. Shikai Shao, Yu Peng, Chenglong He, Yun Du. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization // *ISA Transactions*, 2020, pp. 415–430, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.018>
16. Ze Yu, Naiming Qi, Zheng Li, Tong Lin, Yuxuan Yao, Jianfeng Wang, Mingying Huo. Optimization of multi-target continuous dynamic trajectory for unmanned aerial vehicles // *Aerospace Science and Technology*, vol. 150, 2024, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108958>
17. Yunping Liu, Cheng Chen, Yan Wang, Tingting Zhang, Yiguang Gong. A fast formation obstacle avoidance algorithm for clustered UAVs based on artificial potential field // *Aerospace Science and Technology*, vol. 147, 2024, pp. 1–17, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108974>
18. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. Method of Formation of Reference Movement Speed of Working Tool of Multilink Manipulator // *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, pp. 89–98, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_9
19. Gubankov A., Gornostaev I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group // *Proc. of the International Russian Smart Industry Conference*, 2024, pp. 574–579, <http://dx.doi.org/10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10516162>

References

1. Asif A.L., Awais K.J., Rashid Ali L., Haque N. Unmanned aerial vehicles: A review // *Cognitive Robotics*, vol. 3, 2023, pp. 8–22, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004>
2. Barbedo J.G.A. A Review on the Use of Unmanned Aerial Vehicles and Imaging Sensors for Monitoring and Assessing Plant Stresses // *Drones*, vol. 3, № 40, 2019, pp. 1–27, <http://dx.doi.org/10.3390/drones3020040>
3. Oleksyn S., Tosetto L., Raoult V., Joyce K.E., Williamson J.E. Going Batty: The Challenges and Opportunities of Using Drones to Monitor the Behaviour and Habitat Use of Rays // *Drones*, vol. 5, № 12, 2021, pp. 1–15, <https://doi.org/10.3390/drones5010012>
4. Liu Y., Bucknall R. A survey of formation control and motion planning of multiple unmanned vehicles // *Robotica*, vol. 36, № 7, 2018, pp. 1019–1047, <https://doi.org/10.1017/S0263574718000218>
5. Rogers D.F., Adams J.A. Mathematical elements for computer graphics // McGraw-Hill, 1976, 239 p.

6. Gubankov A., Gornostaev I. Issledovanie razlichnyh tipov parametricheskikh splajnov dlja zadaniya traektorij dvizheniya mehatronnykh obektov. [Study of various types of parametric splines for setting the movement trajectories of mechatron objects] *Materialy XIV Vserossiyskogo soveshhanija po problemam upravlenija (VSPU-2024)*. Moscva, 17–20 ijun, 2024, S. 1685–1689.
7. Arasteh S.T., Kalisz A. Conversion between cubic Bezier curves and Catmull–Rom splines // *arXiv*, 2021, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00770-x>
8. Ziadi S., Njah M., Chtourou M. PSO-DVSF: A New Method for the Path Planning of Mobile Robots // *Proc. of the 16th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering, STA'2015, Monastir, Tunisia, 2015*, pp. 445–451, <https://doi.org/10.1109/STA.2015.7505116>
9. Saif O., Fantoni I., Zavala-Rio A. Distributed Integral Control of Multiple UAVs: Precise Flocking and Navigation // *IET Control Theory and Applications*, 2019, 13 (13), pp. 2008–2017, <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5684>
10. Zhao J., Zhang J., Wang J., Zhang X., Wang Y. Local Path Planning Algorithm for UGV Based on Improved Covariance Matrix Adaptive Evolution Strategy // *Proc. of the 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2021, pp. 1085–1091, <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601399>
11. Chan Y.Y., Kam K.H.N., Lee C.K.M., Li-Ta Hsu, K.L. Keung. Wind dynamic and energy-efficiency path planning for unmanned aerial vehicles in the lower-level airspace and urban air mobility context // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, vol. 57, pp. 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103202>
12. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: control, sensing, vision and intelligence // 1987, 580 p.
13. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control // Pearson Education International, 2005, 400 p.
14. Haschke R., Weitnauer E., Ritter H. On-Line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories // *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 3248–3253, <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2008.4650924>
15. Shikai Shao, Yu Peng, Chenglong He, Yun Du. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization // *ISA Transactions*, 2020, pp. 415–430, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.018>
16. Ze Yu, Naiming Qi, Zheng Li, Tong Lin, Yuxuan Yao, Jianfeng Wang, Mingying Huo. Optimization of multi-target continuous dynamic trajectory for unmanned aerial vehicles // *Aerospace Science and Technology*, vol. 150, 2024, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108958>
17. Yunping Liu, Cheng Chen, Yan Wang, Tingting Zhang, Yiguang Gong. A fast formation obstacle avoidance algorithm for clustered UAVs based on artificial potential field // *Aerospace Science and Technology*, vol. 147, 2024, pp. 1–17, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108974>
18. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. Method of Formation of Reference Movement Speed of Working Tool of Multilink Manipulator // *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, pp. 89–98, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_9
19. Gubankov A., Gornostaev I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group // *Proc. of the International Russian Smart Industry Conference*, 2024, pp. 574–579, <http://dx.doi.org/10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10516162>

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Губанков Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории робототехнических систем, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных информационных систем и морских роботов, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, заведующий лабораторией морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gubankov@dvo.ru

Anton S. Gubankov, PhD (Eng), Associate Professor, senior scientist of robotics laboratory, Institute of Automation and control processes FEB RAS, senior scientist of laboratory of intelligent information systems for marine robots, M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, head of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gubankov@dvo.ru

Горностаев Игорь Вячеславович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории информационно-аналитических и управляющих систем и технологий, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, научный сотрудник лаборатории робототехнических систем, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, научный сотрудник лаборатории морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gornostaev_iv@mail.ru

Igor V. Gornostaev, PhD (Eng), junior scientist of robotics laboratory, Institute of Automation and control processes FEB RAS, scientist of laboratory of robotic systems, M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, scientist of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gornostaev_iv@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 04.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 06.11.2024.

Научная статья

УДК 681.518

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.078>

Идентификация возмущений в электроприводах робототехнических систем на основе оптимального астатического наблюдателя

Кабанов А.А.¹ kabanovaleksey@gmail.com, Зуев А.В.² alvzuev@yandex.ru,

Проценко А.А.² ProtsenkoAlAn@yandex.ru

¹Севастопольский государственный университет (СевГУ), Севастополь, ²Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. В статье рассматривается задача построения системы идентификации возмущающих воздействий в электроприводах робототехнических комплексов. Для её решения используется подход, основанный на использовании оптимальных астатических наблюдателей. Это позволяет избежать недостатков других методов идентификации, таких как необходимость высокочастотной коммутации скользящих наблюдателей. Оптимальные наблюдатели предлагается строить на основе редуцированных моделей исходной диагностируемой системы, получаемых с помощью специально разработанного алгоритма и имеющих меньшую размерность, по сравнению с исходной моделью системы. Это упрощает дальнейшую реализацию оптимальных наблюдателей. Используя предлагаемую процедуру синтеза наблюдателя, также удается придать ему свойство астатизма и исключить статическую погрешность определения величины возмущения. Работоспособность и эффективность предложенной системы идентификации подтверждена компьютерным моделированием.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No. 22-19-00392)

Для цитирования: Кабанов А.А., Зуев А.В., Проценко А.А. Идентификация возмущений в электроприводах робототехнических систем на основе оптимального астатического наблюдателя. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 42—50. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.078

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.078>

Identification of disturbances in electric drives of robotic systems based on an optimal astatic observer

Aleksey A. Kabanov¹ kabanovaleksey@gmail.com, Alexander V. Zuev² alvzuev@yandex.ru,

Alexander A. Protsenko² ProtsenkoAlAn@yandex.ru

¹Sevastopol State University (SevSU), Sevastopol, Russian Federation,

²Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The article considers the problem of constructing a system for identifying disturbing influences in electric drives of robotic complexes. To solve it, an approach based on the use of optimal astatic observers is used. This avoids the disadvantages of other identification methods, such as the need for high-frequency switching of sliding observers. Optimal observers are proposed to be built on the basis of reduced models of the initial system being diagnosed, obtained using a specially developed algorithm and having a smaller dimension compared to the initial system model. This simplifies the further implementation of optimal observers. Using the proposed procedure for synthesizing an observer, it is also possible to give it the property of astatism and eliminate the static error in determining the magnitude of the disturbance. The efficiency and effectiveness of the proposed identification system has been confirmed by computer simulation.

Keywords: electric drives, robots, faults, identification, optimal observers, disturbances, astatism

Financial Support: This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-19-00392).

For citation: Aleksey A. Kabanov, Alexander V. Zuev, Alexander A. Protsenko. Identification of disturbances in electric drives of robotic systems based on an optimal astatic observer. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 42—50. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.078

Введение

В настоящее время расширяются области применения различных робототехнических комплексов (РТК), увеличивается сложность их автономных миссий и различных технологических операций [1–3]. В процессе эксплуатации этих сложных технических устройств особое значение приобретает повышение надежности их качественного функционирования. То есть при

появлении различных неисправностей во всех основных элементах РТК, которые обычно проявляются в виде существенного отклонения их параметров от номинальных значений, необходимо обеспечить своевременное обнаружение этих неисправностей и по возможности устранение негативных последствий их возникновения. Это особенно важно для автономной работы РТК в условиях изменчивости окружающей среды. Но, несмотря на многообразие типов существующих РТК

(роботы-манипуляторы, подводные, наземные и воздушные аппараты), большинство из них содержат схожие функциональные элементы, от которых зависит их работоспособность – электроприводы и движители, обеспечивающие их пространственное перемещение. При этом возникновение неизвестных внешних моментов на выходных валах электроприводов из-за различных факторов (изменение величины нагрузки, ухудшение свойств смазки, износ уплотнительных манжет и подшипников и т. д.) приводит не только к существенно ухудшению качества работы, но и к возникновению аварийных ситуаций или даже потере дорогостоящего оборудования. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является использование методов функциональной диагностики с целью обнаружения возникающих неисправностей с помощью диагностических наблюдателей (ДН) и оценки величины возмущающих воздействий на исполнительные механизмы вследствие их появления. Оценки этих возмущений затем используются автоматическими системами для устранения негативных последствий появления неисправностей. Эти автоматические системы за счет введения дополнительных управляющих сигналов, подаваемых на приводы РТК, обеспечивают стабилизацию их важнейших характеристик при возникновении неисправностей и позволяют им успешно выполнять поставленные задачи.

Распространенным подходом к идентификации неисправностей является использование нейронных сетей [4, 5], в том числе адаптивных сетей и сетей с нечеткой логикой [6]. Эти методы позволяют определять параметры нелинейных динамических систем при возникновении неисправностей, а также компенсировать обнаруженные изменения. Недостатком этих подходов является необходимость предварительного сложного и длительного обучения нейронных сетей для использования в РТК, а также использования специальных тестовых режимов их движения [7], которые не всегда приемлемы. Другим подходом к идентификации неисправностей и отклонений параметров технических систем от своих номинальных значений является использование наблюдателей скользящего режима (или скользящих наблюдателей) [8–10], описываемых дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью. Данные скользящие наблюдатели эффективно применяются на практике для обнаружения и идентификации неисправностей, а также для построения отказоустойчивых систем [11–13]. Их недостатком является то, что в этом случае на математическую модель объекта диагностирования накладывается ряд ограничений. В частности, требуется выполнение, так называемого, условия согласования. Предполагается, что все фазовые координаты диагностируемого объекта, в котором обнаруживаются неисправности и отклонения параметров, должны измеряться соответствующими датчиками, что не всегда возможно в приводах современных РТК. Кроме того, необходимо, чтобы диагностируемые системы были минимально фазовыми, т.е. их передаточные функции не должны иметь нулей и полюсов с положительной

действительной частью, что трудно гарантировать для многосвязных объектов. Кроме того, во всех известных работах скользящие наблюдатели строятся на основе полных моделей исходных объектов диагностирования и, следовательно, имеют размерность не меньшую размерности этих объектов, что затрудняет их практическую реализацию на бортовых компьютерах. Также для корректной работы скользящих наблюдателей требуется высокочастотное переключение, что также требует от ЭВМ РТК высокого быстродействия. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается использовать подход, основанный на использовании оптимальных наблюдателей [14]. Это позволяет избежать недостатков выше указанных методов идентификации, таких как необходимость высокочастотного переключения скользящих наблюдателей. Оптимальные наблюдатели предлагается строить на основе специальных редуцированных моделей исходной системы, что упрощает их реализацию.

Постановка задачи

Рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью вида

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dd(t), \\ x(t_0) &= x_0, y(t) = Cx(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ и $y(t) \in R^l$ – векторы состояния, управления и выхода соответственно; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times q}$ и $C \in R^{l \times n}$ – известная постоянная матрица; $d(t) \in R^q$ – векторная функция, описывающая возмущения: при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении возмущения $d(t)$ – неизвестная функция времени.

В РТК обычно используют двигатели постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами. Также они обычно оснащаются редуктором, датчиками углового положения для измерения угла поворота выходного вала редуктора $\alpha_r(t)$ и датчиками тока их якорных цепей $I(t)$. Электропривод РТК можно описать системой (1) со следующими векторами и матрицами [15]:

$$\begin{aligned}x(t) &= \begin{bmatrix} \alpha_r(t) \\ \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & a_{21} & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ y(t) &= \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_r(t) \\ I(t) \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ a_{12} &= 1/i_r; a_{23} = k_m/J; a_{32} = -k_\omega/L; \\ a_{33} &= -R/L; b = k_u/L,\end{aligned}$$

где $u(t)$ — напряжение, подаваемое на двигатель системой управления; $d(t) = -\hat{M}(t)/J$; $\omega(t)$ — угловая скорость выходного вала двигателя постоянного тока; J — момент инерции ротора двигателя постоянного тока; i_r — передаточное отношение редуктора; $I(t)$ — электрический ток; L — индуктивность обмотки двигателя постоянного тока; k_ω — коэффициент противо-ЭДС, k_m — коэффициент крутящего момента; k_u — коэффициент усилителя напряжения; $\hat{M}(t)$ — неизвестный дополнительный момент нагрузки.

В работе ставится задача разработки метода построения наблюдателя для идентификации

функции $d(t)$. В отличие от методов, традиционно используемых для решения этой задачи, предлагаемое решение основано на методах оптимального управления. По аналогии с [14] задача решается не для исходной системы, а для ее редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели, чувствительной к искомому возмущению.

Общий вид редуцированной модели системы (1) имеет вид [16]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= A_*x_*(t) + B_*u(t) + J_*y(t) + K_*e_y(t), \\ y_*(t) &= C_*x_*(t),\end{aligned}\quad (2)$$

где $x_*(t) \in R^{k \times 1}$ – вектор состояния; $y_*(t) \in R^1$ – выходной сигнал; $A_* \in R^{k \times k}$ – матрица динамических свойств; $B_*(t) \in R^{k \times 1}$ – матрица-столбец при управлении $u(t)$; $C_* \in R^{1 \times k}$ – матрица-строка, связывающая $x_*(t)$ с $y_*(t)$; $J_* \in R^{k \times 2}$ – матрица при $y(t)$; $K_* \in R^{k \times 1}$ – матрица-столбец коэффициентов обратной связи наблюдателя; $e_y(t) \in R^1$ – невязка, формируемая ДН; $k \leq 3$ – размерность вектора состояния модели.

Матрицы A_* , B_* , J_* , векторы K_* и C_* , а также конкретный порядок модели определяются в процессе их синтеза таким образом, чтобы формируемая ими невязка $e_y(t)$ была чувствительна к ненулевой функции $d(t)$. Если эта функция нулевая, то $e_y(t) = 0$, а иначе $e_y(t) \neq 0$. Невязка определяется с помощью выражения:

$$e_y(t) = R_*y(t) - y_*(t), \quad (3)$$

где вектор $R_* \in R^{1 \times 1}$ связывает выходы исходной и редуцированной моделей.

Перед построением ДН необходимо определить соотношения, связывающие матрицы и векторы A_* , B_* , J_* , C_* , R_* и K_* , формирующие ДН, с векторами и матрицами, описывающими диагностируемый привод (1). Для этого введем матрицу Φ_* , для которой при $d(t) = 0$ должно выполняться равенство

$$\Phi_*x(t) = x_*(t). \quad (4)$$

Продифференцировав выражение (4) и подставив вместо $\dot{x}(t)$ и $\dot{x}_*(t)$ правые части уравнений (1) и (2), а также предполагая, что $e_y(t) = 0$ (т.е. при отсутствии возмущений), можно получить выражение:

$$\Phi_*Ax(t) + \Phi_*Bu(t) = A_*x_*(t) + B_*u(t) + J_*y(t),$$

из которого с учетом второго уравнения (1), а также (4) следуют соотношения [16]:

$$\Phi_*A = A_*\Phi_* + J_*C_*, \quad B_* = \Phi_*B. \quad (5)$$

Также при отсутствии возмущений ($e_y(t) = 0$) из (3) после замены в нем векторов выхода $y(t)$ и $y_*(t)$ в соответствии с равенствами $y(t) = Cx(t)$ и $y_*(t) = C_*x_*(t)$ следует, что $R_*(t)Cx(t) - C_*x_*(t) = 0$, откуда с учётом (4) можно получить выражение

$$R_*C = C_*\Phi_*. \quad (6)$$

Решив систему уравнений (5) и (6), можно найти матрицы и векторы Φ_* , A_* , B_* , J_* , C_* , R_* . При этом, согласно предлагаемому методу, ДН должен быть

построен таким образом, чтобы формируемая им невязка $e_y(t)$ была чувствительна к появлению ненулевой функции $d(t)$. Для этого полученные соотношения необходимо дополнить условиями чувствительности и нечувствительности ДН к этой функции. Для этого выражение для невязки (3) перепишем с учётом (1), (2), (4) и (6):

$$e_y(t) = R_*D_*\hat{w}(t) + C_*(\Phi_*x(t) - x_*(t)). \quad (7)$$

Продифференцировав (7) по времени и принимая во внимание (1), (2) и (5), получим уравнение

$$\begin{aligned}\dot{e}_y(t) &= R_*D_*\dot{\hat{w}}(t) + C_*(A_*e(t) + \Phi_*Dd(t) - \\ &\quad - J_*D_*\hat{w}(t) - K_*e_y(t)),\end{aligned}\quad (8)$$

где $e(t) = \Phi_*x(t) - x_*(t) \in R^{k \times 1}$ – вектор рассогласования между переменными состояния диагностируемого привода и ДН.

Из выражения (8), учитывая влияние ненулевой $d(t)$ на невязку $e_y(t)$, определяются условия чувствительности и нечувствительности невязки, формируемой моделью:

- чувствительность невязки к $d(t)$

$$\Phi_*D \neq 0; \quad (9)$$

- нечувствительность невязки к $d_i(t)$

$$\Phi_*D = 0; \quad (10)$$

Полученные условия позволяют сформировать банк ДН. Известно [16], что синтез линейных ДН (2) выполняется легко, если эти наблюдатели ищутся в канонической форме, когда

$$A_* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad C_* = [1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]. \quad (11)$$

В этом случае уравнения (5) и (6) можно представить в виде совокупности k уравнений:

$$\begin{aligned}\Phi_{*1}A(t) &= \Phi_{*2} + J_{*1}C, \\ \Phi_{*i}A &= \Phi_{*i+1} + J_{*i}C, \quad i = 2, \dots, k-1, \\ \Phi_{*k}A &= J_{*k}C,\end{aligned}\quad (12)$$

где Φ_{*i} и J_{*i} – i -е строки матриц Φ_* и J_* соответственно.

Для определения элементов вектора K_* уравнение (8), описывающее поведение вектора рассогласования $e(t)$, запишем с учетом (11) при $d(t) = 0$:

$$\dot{e}(t) = (A_* - K_*C_*)e(t). \quad (13)$$

Из (13) видно, что для выполнения условия устойчивости ДН, когда $e(t) = x(t) - x_*(t) \rightarrow 0$, при $t \rightarrow \infty$ матрица $A_* - K_*C_*$ должна иметь собственные числа с отрицательными действительными частями.

Пусть $k_{*1}, k_{*2}, \dots, k_{*k}$ – компоненты вектора обратной связи K_* , тогда матрица $A_* - K_*C_*$ принимает вид

$$A_* - K_* C_* = \begin{bmatrix} -k_{*1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -k_{*2} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -k_{*k} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

В этом случае коэффициенты $k_{*1}, k_{*2}, \dots, k_{*k}$ связаны с корнями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ характеристического уравнения $A_* - K_* C_*$ соотношениями [15]

$$\begin{aligned} k_{*1} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k), \\ k_{*2} &= \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \dots + \lambda_{k-1} \lambda_k, \\ &\dots \\ k_{*k} &= (-1)^k \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_k. \end{aligned} \quad (14)$$

Для обеспечения устойчивости ДН необходимо, чтобы действительные части получаемых корней их характеристических полиномов имели отрицательные значения.

Если ДН строится в каноничной форме, уравнения (5) и (6) можно представить в виде совокупности k уравнений, которые определяют размерность ДН и описывают его матрицы в виде:

$$R_* C_*^k = J_{*1} C_*^{k-1} + J_{*2} C_*^{k-2} + \dots + J_{*k} C_*. \quad (15)$$

Уравнение (15) можно записать в более удобном для решения блочном виде:

$$[R_* \quad -J_{*1} \quad -J_{*2} \quad \dots \quad -J_{*k}] \begin{bmatrix} C_*^k \\ C_*^{k-1} \\ \vdots \\ C \end{bmatrix} = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) представляет собою систему линейных алгебраических уравнений, содержащую $2k + 2$ неизвестных. Для его решения предлагается следующий алгоритм:

1. Принять $k = 1$.
2. Принять A_* , C_* в соответствии с (11). Из уравнения (16) выразить элементы матрицы J_* и вектора R_* . Если это невозможно (т. е. уравнение (16) не выполняется ни для каких J_* и R_*), то перейти к п. 3. В противном случае перейти к п. 4. Если количество уравнений в системе (16) меньше количества неизвестных элементов матрицы J_* и вектора R_* , то часть из этих элементов можно принять независимыми переменными, а остальные выразить через них.
3. Принять $k = k + 1$ и перейти к п. 2.
4. Найти строки матрицы Φ_* по следующим соотношениям, полученным из (12):

$$\begin{aligned} \Phi_{*1} &= R_* C_*, \\ \Phi_{*2} &= \Phi_{*1} A - J_{*1} C = R_* C A - J_{*1} C, \\ \Phi_{*3} &= R_* C A^2 - J_{*1} C A - J_{*2} C, \\ &\dots \\ \Phi_{*k} &= R_* C A^{k-1} - J_{*1} C A^{k-2} - \dots - J_{*k-1} C, \end{aligned}$$

при этом элементы Φ_* могут зависеть от принятых ранее независимых переменных.

5. Проверить полученные матрицы Φ_* , J_* и вектор R_* на чувствительность или нечувствительность к появлению ненулевой функции $d(t)$ с помощью критериев (9)-(10). При этом значения всех свободных переменных следует подобрать таким образом, чтобы вектор R_* не был нулевым. Если при

этом не удастся выполнить все остальные критерии, то вернуться к п.3.

6. Получить матрицу B_* с помощью (5)

7. Рассчитать элементы вектора обратной связи K_* с помощью (14).

После выполнения приведённого алгоритма определяются неизвестные матрицы B_* , J_* , K_* и векторы C_* и R_* , входящие в редуцированную модель (2) для ДН, который позволяет выявлять появление ненулевой функции $d(t)$.

В итоге предложенный метод позволяет получить редуцированные модели электроприводов РТК, чувствительные к появлению возмущения $d(t)$. Далее будет рассмотрено использование таких моделей для непосредственного построения ДН для обнаружения оценки величины возмущений.

Синтез наблюдателя для идентификаций возмущений

Вспомогательная задача оптимального управления. Рассмотрим вспомогательную задачу оптимального управления для системы, полученной из редуцированной модели (2)

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \bar{A}_* z(t) + \bar{J}_* y(t) + B_* u(t) + D_* v(t), \\ z(t_0) &= \Phi x_0, y_z(t) = C_* z(t), \\ \bar{A}_* &= A_* - K C_*, \bar{J}_* = J_* + K R_*, \end{aligned} \quad (17)$$

где функция $v(t)$ рассматривается как вспомогательное управление, которое играет роль неизвестной функции $d(t)$, описывающей возмущения, и выбирается так, чтобы перевести систему (2) из состояния $z(t_0) = \Phi x_0$ в состояние $y_z(t_f) = y_*(t_f)$, $t_f \rightarrow \infty$, и при этом минимизировать функционал невязки (далее зависимость от времени t опустим для сокращения записи)

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (e_y^T Q e_y + v^T R v) dt \rightarrow \min_v, \\ Q &> 0, R > 0, e_y = y_z - y_*. \end{aligned} \quad (18)$$

Задача идентификации состоит в том, чтобы по измерениям y как можно более точно восстановить движение z вспомогательной системы (17), т.е. нужно построить оптимальное в смысле (18) управление v и порождаемую им траекторию системы (2) такие, что $\|y_z - y_*\| \rightarrow 0$, $\|v - d\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Теорема [14]. Если система для ошибки $e = z - x_* \in R^k$: $\dot{e} = \bar{A}_* e + D_*(v - d)$, $e(t_0) = 0$ сильно наблюдаема, то $e_y(t) = C_* e(t) \rightarrow 0$ ($t > 0$) влечет $v(t) \rightarrow d(t)$.

Синтез наблюдателя. По сути, задача (17), (18) является задачей построения линейно-квадратичного управления для следящей системы с возмущениями. Приведем ее решение.

Для задачи (17), (18) запишем Гамильтониан

$$H = \frac{1}{2} e^T C_*^T Q C_* e + \frac{1}{2} v^T R v + \lambda^T (\bar{A}_* z + D_* v + f),$$

где $f = B_* u + \bar{J}_* y$ и определим оптимальное управление

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial v} &= 0 \Rightarrow R v + D_*^T \lambda = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow v = -R^{-1} D_*^T \lambda, \end{aligned} \quad (19)$$

а также составим уравнения для сопряженной переменной и переменной состояния

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \bar{A}_* z - D_* R^{-1} D_*^T \lambda + f, z(t_0) = \Phi x_0, \\ \dot{\lambda} &= -\frac{\partial H}{\partial z} = -\bar{A}_*^T \lambda - C_*^T Q C_* z + C_*^T Q R_* y. \end{aligned} \quad (20)$$

Уравнение для сопряженной переменной учитывает, что $C_* x_* = y_*$ и для редуцированной модели также имеет место соотношение $R_* y = y_*$. Интегрируя в прямом времени (20), можно найти z и λ , затем на основе (19) восстановить функцию, описывающую возмущение:

$$d = v = -R^{-1} D_*^T \lambda$$

Сложность заключается в том, что (20) является двух точечной краевой задачей, и начальные условия для сопряженной переменной в начальный момент времени $\lambda(t_0)$ неизвестны. Для поиска управления предлагается взять преобразование Риккати вида [17]

$$z = M\lambda + g, z(t) = M(t)\lambda(t) + g(t) \quad (21)$$

где $M(t)$ – невырожденная матрица, $g(t)$ – некоторая вектор-функция. Дифференцируя (21) и выполнив ряд преобразований по аналогии с [17], получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{M} &= \bar{A}_* M + M \bar{A}_*^T - D_* R^{-1} D_*^T + M C_*^T Q C_* M, \\ \dot{g} &= \bar{A}_* g + M C_*^T Q C_* g - M C_*^T Q R_* y + f. \end{aligned} \quad (22)$$

При $t = t_0$ из (21) имеем $z(t_0) = M(t_0)\lambda(t_0) + g(t_0)$, а поскольку $\lambda(t_0)$ неизвестна, то для удовлетворения начальных условий нужно принять $M(t_0) = 0, z(t_0) = g(t_0)$. Подставляя (21) в (19), окончательно для управления v имеем:

$$v = -R^{-1} D_*^T M^{-1}(z - g). \quad (23)$$

Подставляя (23) в (17), получаем итоговое выражение для диагностического наблюдателя

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \bar{A}_* z - D_* R^{-1} D_*^T M^{-1}(z - g) + f, \\ z(t_0) &= \Phi x_0, y_z = C_* z, \end{aligned} \quad (24)$$

где M и g определяются как решение уравнений (22) с начальными условиями $M(t_0) = 0, z(t_0) = g(t_0)$.

На бесконечном интервале времени, когда $t_f \rightarrow \infty, t \rightarrow \infty$, решение матричного уравнения (22) для M при условии управляемости и наблюдаемости системы (17) стремится к установившемуся значению $\bar{M}$, которое является решением алгебраического уравнения [18, 19]

$$\bar{A}_* \bar{M} + \bar{M} \bar{A}_*^T - D_* R^{-1} D_*^T + \bar{M} C_*^T Q C_* \bar{M} = 0, \quad (25)$$

а функция g из второго уравнения в (22) будет стремиться к ограниченному решению $\bar{g}$ дифференциального уравнения

$$\dot{g} = (\bar{A}_* + \bar{M} C_*^T Q C_*) \bar{g} - \bar{M} C_*^T Q R_* y + f \quad (26)$$

при начальных условиях $\bar{g}(t_0) = z(t_0)$.

Диагностический наблюдатель на бесконечном интервале времени будет иметь вид (24), в котором g и M заменены на $\bar{g}$ и $\bar{M}$ соответственно.

Синтез астатического наблюдателя. Для сложных объектов линейное представление как правило является результатом линеаризации исходного возмущенного движения объекта в окрестности неподвижной точки, что сопровождается некоторой вычислительной погрешностью. Это приводит к тому, что управление в окрестности особой точки происходит с некоторой постоянной или медленно меняющейся ошибкой. Такими же будут последствия изменения условий функционирования системы и параметров внешней среды. Все эти и подобные явления приводят к тому, что ошибка идентификации реального возмущения может оказаться совсем не малой. Такая ситуация является вполне обычной для классической теории управления и типичным решением в таком случае является свойство астатизма системы стабилизации, т.е. способность системы обеспечивать нулевую статическую ошибку при воздействии постоянных внешних возмущений [20].

Пусть в системе (17) переменная v представляет собой интеграл от некоторого управления w , то есть

$$\dot{v} = B_w w, \quad v_0 = 0. \quad (27)$$

Предполагая управляемость системы (17), дополним вектор z переменной v . Обозначим полученный составной вектор $X = \text{col}(z, v)$. Объединяя (17) и (27), получим систему с блочной структурой

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \tilde{A} X + \tilde{B} w + \tilde{f}, \\ Y &= \tilde{C} X = y_z = C_* z, \\ \tilde{A} &= \begin{bmatrix} \bar{A}_* & D_* \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_v \end{bmatrix}, \tilde{f} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{C} = [C_* \quad 0]. \end{aligned} \quad (28)$$

Преобразуем функционал невязки (18) с учетом нового управления w :

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (e_y^T C_*^T Q C_* e_y + w^T R w) dt \rightarrow \min_w, \quad (29)$$

Решение задачи (28), (29) будет иметь вид (23)-(26) с учетом замены матриц $\bar{A}_*, D_*, C_*$ на $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$, приведем его ниже

$$\begin{aligned} w &= -R^{-1} \tilde{B}^T \tilde{M}^{-1}(X - \tilde{g}) = \tilde{G}(X - \tilde{g}), \\ \tilde{A} \tilde{M} + \tilde{M} \tilde{A}^T - \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T + \tilde{M} \tilde{C}^T Q \tilde{C} \tilde{M} &= 0, \\ \dot{\tilde{g}} &= (\tilde{A} + \tilde{M} \tilde{C}^T Q \tilde{C}) \tilde{g} - \tilde{M} \tilde{C}^T Q R_* y + f. \end{aligned} \quad (30)$$

В результате для w из первого уравнения в (30) имеем

$$\begin{aligned} w &= \tilde{G}(X - \tilde{g}) = [G_z \quad G_v] \begin{bmatrix} z - g_z \\ v - g_v \end{bmatrix} = \\ &= G_z(z - g_z) + G_v(v - g_v). \end{aligned} \quad (31)$$

Подставляя это в (28) и объединяя с (17), получим замкнутую систему

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \bar{A}_* z + D_* v + f, \quad z(t_0) = x_0, \\ \dot{v} &= B_v G_z(z - g_z) + B_v G_v(v - g_v), \\ v(t_0) &= 0. \end{aligned} \quad (32)$$

По предположению существует $i = 1, 2, \dots, (k + q)$, при котором

$$D_*^T e_i \neq 0, \quad (33)$$

где e_i - $(k + q)$ -вектор, i -тый элемент которого равен 1, а все остальные – 0.

Умножим первое уравнение системы (32) слева на e_i^T

$$e_i^T \dot{z} = e_i^T \bar{A}_* z + e_i^T D_* v + e_i^T f,$$

и, в силу (33), разрешим полученное уравнение относительно v

$$v = (e_i^T D_*)^{-1} e_i^T (\bar{A}_* z - \dot{z} + f) \quad (34)$$

Подставляя теперь (34) в уравнение (32) для v , получим астатический закон управления

$$\begin{aligned} \dot{v} &= B_v G_z (z - g_z) + B_v G_v (S(\bar{A}_* z - \dot{z} + f) - g_v), \\ S &= (e_i^T D_*)^{-1} e_i^T, \quad v(t_0) = 0. \end{aligned} \quad (35)$$

Действительно, переменная v является интегралом линейной формы от вектора z . Для того, чтобы убедиться в этом, остается проинтегрировать (35) от t_0 до t_f , используя формулу интегрирования по частям и конкретные выражения для компонент матрицы $\tilde{G}$ обратной связи (учитывая их гладкость).

Таким образом, выражение для астатического наблюдателя имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \bar{A}_* z + D_* v + f, \quad z(t_0) = x_0, \\ \dot{v} &= B_v G_z (z - g_z) + B_v G_v (S(\bar{A}_* z - \dot{z} + f) - g_v), \\ S &= (e_i^T D_*)^{-1} e_i^T, \quad v(t_0) = 0, \end{aligned}$$

где вычисление блоков G_z , G_v , g_z , g_v выполняется через решение блочного уравнения Риккати для $\tilde{M}$ и дифференциального уравнения для $\tilde{g}$ в (30).

Тестовый пример

Для проверки эффективности полученных наблюдателей было проведено математическое моделирование. Редуцированная модель электропривода постоянного тока может быть описана системой (1) со следующими векторами и матрицами [21]:

$$\begin{aligned} A_* &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, J_* = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{a_{12}}{a_{33}} \\ 0 & a_{12}(a_{23} + a_{33}/a_{32}) \end{bmatrix}, \\ B_* &= \begin{bmatrix} 0 \\ a_{12}/a_{33} \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & -a_{12} & a_{12}/a_{32} \end{bmatrix}, \\ C_* &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

При моделировании использовались следующие параметры электропривода: $J = 0.001$ кг·м²; $R = 0.5\Omega$; $L = 0.01$ Гн; $k_m = 0.04$ Н·м/А; $k_\omega = 0.04$ В·с/рад; $i_r = 100$; $k_u = 35$.

На рис.1 дан график оцениваемого возмущения и самой оценки со стороны наблюдателя. Из рисунка

видно, что наблюдатель в целом справляется, но присутствует статическая ошибка оценивания (график ошибки на рис.2).

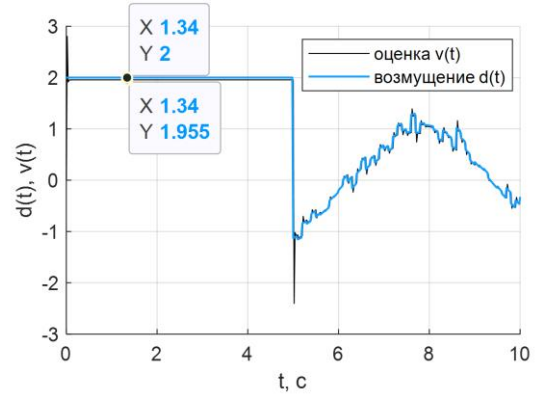


Рис. 1. Возмущение и оценка диагностического наблюдателя

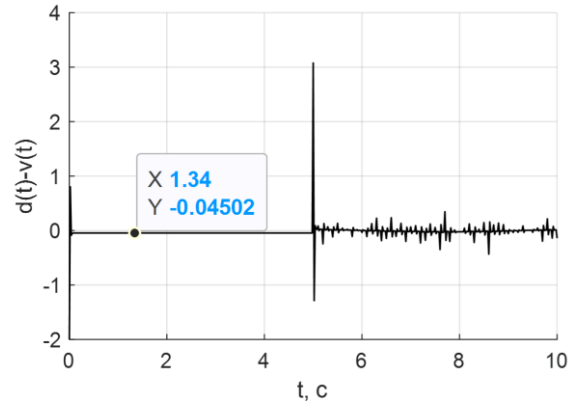


Рис. 2. Ошибка идентификации возмущения

Для устранения статической ошибки в наблюдатель введен астатизм, график оценки возмущения астатическим наблюдателем дан на рис.3. График ошибки дан на рис. 4, где видно, что статическая ошибка равна нулю.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы синтеза и исследования системы идентификации неизвестных возмущающих воздействий на электроприводы робототехнических систем. Данная задача решена на основе метода построения оптимальных диагностических наблюдателей на основе редуцированных моделей исходной системы. Это позволяет упростить реализацию системы идентификации на бортовых компьютерах роботов с ограниченной вычислительной мощностью. Для проверки работы синтезированной системы проведено компьютерное моделирование, результаты которого показали ее эффективность.

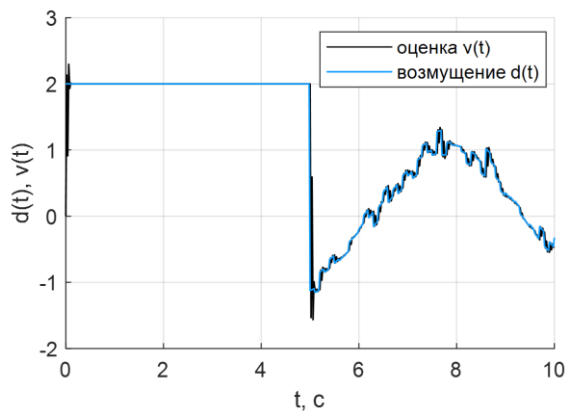


Рис. 3. Возмущение и оценка астатического наблюдателя

Последующие исследования будут направлены на развитие предложенного подхода и его обобщения на случай нелинейных систем, а также на проведении экспериментов и тестов на реальных РТК с целью адаптации метода к реализации на бортовых вычислителях. Последнее, в частности, может потребовать дополнительных теоретических изысканий по разработке дискретного варианта метода для моделей объектов, описываемых разностными уравнениями. На этом пути предполагается использование существующих наработок по теории оптимального управления дискретными системами, в т.ч. для нелинейных

систем, описываемых в псевдолинейной форме с коэффициентами матриц системы, зависящими от состояния (методы State-Dependent Coefficients). Это перспективное направление открывает новые возможности по разработке простых, пригодных для реализации на бортовых вычислителях методов идентификации возмущений, возникающих в исполнительных системах робототехнических комплексов, и методов синтеза адаптивных законов управления, позволяющих парировать идентифицированные возмущения.

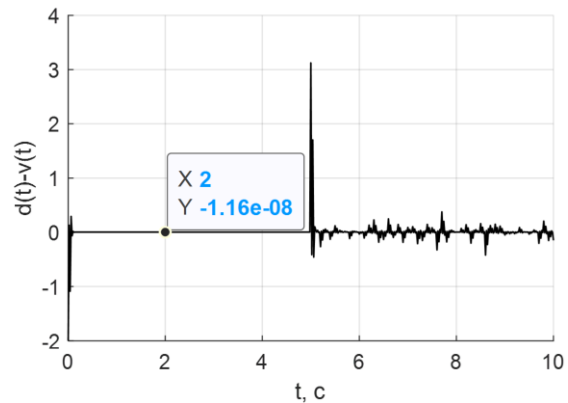


Рис. 4. Ошибка идентификации возмущения астатического наблюдателя

Литература

1. Kurfess T. R. Robotics and automation handbook. CRC Press, Boca Raton, 2005, 579 p.
2. Siciliano B., Khatib O. Springer handbook of robotics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, 1627 p.
3. Griffiths G. Technology and applications of autonomous underwater vehicles. CRC Press, 2002, 369 p.
4. Li Z. Application of fault tolerant controller based on RBF neural networks for mobile robot. International Symposium on intelligent ubiquitous computing and education, Chengdu, China, 2009, p. 531–534.
5. Tang J., Liang X., Huang M., Gong Z. Fault diagnosis of rolling bearing based on BP neural network technology. IEEE 9th international conference on computer science and network technology, Dalian, China, 2021, p. 95–99.
6. Ghrieb A. O., Kourd Y., Guersi N. Supervision of industrial manipulators using ANFIS system. 17th international conference on control, automation and systems, Jeju, 2017, p. 161–166.
7. Li K., Yang J., Yuan C., Xu J., Dai X., Luo J. Fault-tolerant motion planning of redundant manipulator with initial position error. IEEE 7th data driven control and learning systems conference, Enshi, China, 2018, p. 533–538.
8. Edwards C., Spurgeon S. K., Patton R. J. Sliding mode observers for fault detection and isolation. Automatica, 2000, vol. 36, no. 4, p. 541–553. DOI:10.1016/S0005-1098(99)00177-6.
9. Edwards C., Spurgeon S. On the development of discontinuous observers. International journal of control, 1994, vol. 59, no. 5, p. 1211–1229.
10. Brisilla R. M., Sankaranarayanan V., Joseph Godfrey A. Extended state observer based sliding mode control of permanent magnet DC motor. 2015 Annual IEEE India conference (INDICON), IEEE, New Delhi, India, 2015, p. 1–6. DOI:10.1109/INDICON.2015.7443441.
11. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumskii A. E. Identification of faults in the sensors of technical systems with the use of sliding mode observers. Measurement techniques, 2020, vol. 62, no. 10, p. 869–878. DOI:10.1007/s11018-020-01707-1.
12. Chen C.-C., Xu S., Liang Y.-W. Study of nonlinear integral sliding mode fault-tolerant control. IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 2016, vol. 21, no. 2, p. 1160–1168.
13. Nair R. R., Karki H., Shukla A., Behera L., Jamshidi M. Fault-tolerant formation control of nonholonomic robots using fast adaptive gain nonsingular terminal sliding mode control. IEEE Systems journal, 2019, vol. 13, no. 1, p. 1006–1017.
14. Kabanov A. A., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Filaretov V. F. Fault Identification: An approach based on optimal control methods. Automation and remote control, 2023, vol. 84, no. 9, p. 956–965. DOI:10.1134/S0005117923090059.
15. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Жирабок А. Н., Проценко А. А. Разработка системы аккомодации к дефектам в движителях подводных роботов. Мехатроника, автоматизация, управление, 2021, Т. 22, № 5, с. 262–271. DOI:10.17587/mau.22.262-271.
16. Жирабок А. Н., Усольцев С. А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем. Автоматика и телемеханика, 2000, № 7, с. 149–159.

17. Mufti I. H., Chow C. K., Stock F. T. Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the riccati transformation. SIAM review, 1969, vol. 11, no. 4, p. 616–619. DOI:10.1137/1011096.
18. Bryson A. E., Ho Y.-C. Applied optimal control: optimization, estimation, and control, Taylor and Francis, 1975, 469 p.
19. Naidu D.S. Optimal control systems. Electrical engineering handbook. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003, 275 p.
20. Fossen T. I. Guidance and control of ocean vehicles. New York: John Wiley & Sons, 1999, 494 p.
21. Filaretov V., Zuev A., Zhirabok A., Protsenko A. Development of a fault adaptation system for underwater robot manipulators. International conference on ocean studies (ICOS), IEEE, Vladivostok, Russia, 2022, p. 15–20. DOI:10.1109/ICOS55803.2022.10033347.

References

1. Kurfess T. R. Robotics and automation handbook. CRC Press, Boca Raton, 2005, 579 p.
2. Siciliano B., Khatib O. Springer handbook of robotics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, 1627 p.
3. Griffiths G. Technology and applications of autonomous underwater vehicles. CRC Press, 2002, 369 p.
4. Li Z. Application of fault tolerant controller based on RBF neural networks for mobile robot. International Symposium on intelligent ubiquitous computing and education, Chengdu, China, 2009, p. 531–534.
5. Tang J., Liang X., Huang M., Gong Z. Fault diagnosis of rolling bearing based on BP neural network technology. IEEE 9th international conference on computer science and network technology, Dalian, China, 2021, p. 95–99.
6. Ghrieb A. O., Kourd Y., Guersi N. Supervision of industrial manipulators using ANFIS system. 17th international conference on control, automation and systems, Jeju, 2017, p. 161–166.
7. Li K., Yang J., Yuan C., Xu J., Dai X., Luo J. Fault-tolerant motion planning of redundant manipulator with initial position error. IEEE 7th data driven control and learning systems conference, Enshi, China, 2018, p. 533–538.
8. Edwards C., Spurgeon S. K., Patton R. J. Sliding mode observers for fault detection and isolation. Automatica, 2000, vol. 36, no. 4, p. 541–553. DOI:10.1016/S0005-1098(99)00177-6.
9. Edwards C., Spurgeon S. On the development of discontinuous observers. International journal of control, 1994, vol. 59, no. 5, p. 1211–1229.
10. Brisilla R. M., Sankaranarayanan V., Joseph Godfrey A. Extended state observer based sliding mode control of permanent magnet DC motor. 2015 Annual IEEE India conference (INDICON), IEEE, New Delhi, India, 2015, p. 1–6. DOI:10.1109/INDICON.2015.7443441.
11. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumskii A. E. Identification of faults in the sensors of technical systems with the use of sliding mode observers. Measurement techniques, 2020, vol. 62, no. 10, p. 869–878. DOI:10.1007/s11018-020-01707-1.
12. Chen C.-C., Xu S., Liang Y.-W. Study of nonlinear integral sliding mode fault-tolerant control. IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 2016, vol. 21, no. 2, p. 1160–1168.
13. Nair R. R., Karki H., Shukla A., Behera L., Jamshidi M. Fault-tolerant formation control of nonholonomic robots using fast adaptive gain nonsingular terminal sliding mode control. IEEE Systems journal, 2019, vol. 13, no. 1, p. 1006–1017.
14. Kabanov A. A., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Filaretov V. F. Fault Identification: An approach based on optimal control methods. Automation and remote control, 2023, vol. 84, no. 9, p. 956–965. DOI:10.1134/S0005117923090059.
15. Filaretov V. F., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Protsenko A. A. Razrabotka sistemy akkomodatsii k defektam v dvizhitelnykh podvodnykh robotov [Development of an accommodation system for defects in underwater robot thrusters]. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie, 2021, vol. 22, no. 5, c. 262–271. DOI:10.17587/mau.22.262-271.
16. Zhirabok A. N., Usoltsev S. A. Lineynye metody pri diagnostirovanii nelineynykh sistem [Linear methods in the diagnosis of nonlinear systems]. Avtomatika i telemekhanika, 2000, no. 7, p. 149–159.
17. Mufti I. H., Chow C. K., Stock F. T. Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the riccati transformation. SIAM review, 1969, vol. 11, no. 4, p. 616–619. DOI:10.1137/1011096.
18. Bryson A. E., Ho Y.-C. Applied optimal control: optimization, estimation, and control, Taylor and Francis, 1975, 469 p.
19. Naidu D.S. Optimal control systems. Electrical engineering handbook. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003, 275 p.
20. Fossen T. I. Guidance and control of ocean vehicles. New York: John Wiley & Sons, 1999, 494 p.
21. Filaretov V., Zuev A., Zhirabok A., Protsenko A. Development of a fault adaptation system for underwater robot manipulators. International conference on ocean studies (ICOS), IEEE, Vladivostok, Russia, 2022, p. 15–20. DOI:10.1109/ICOS55803.2022.10033347.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кабанов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, директор института, Севастопольский государственный университет (СевГУ), 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, д.33; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com;

Alexey A. Kabanov, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute, Sevastopol State University (SevSU), 299053, Russian Federation, Sevastopol, Universitetskaya str., 33; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com;

Зуев Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных информационных систем для морских роботов, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д.5а, e-mail: zuev@dvo.ru.

Alexander V. Zuev, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Leading researcher of the Laboratory of intelligent information systems for marine robots, Institute of marine technology problems named after academician M.D. Ageev FEB RAS, 690091, Russian Federation, Vladivostok, Sukhanova str., 5a, e-mail: zuev@dvo.ru.

Проценко Александр Анатольевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д.5а, e-mail: protsenko_aa@dvfu.ru.

Alexander A. Protsenko, Ph. D. (Eng.), Researcher of the Laboratory of intelligent information systems for marine robots, Institute of marine technology problems named after academician M.D. Ageev FEB RAS, 690091, Russian Federation, Vladivostok, Sukhanova str., 5a, e-mail: protsenko_aa@dvfu.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 00.00.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 00.00.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 00.00.2024.

Научная статья

УДК 681.518.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.079>**Подход к построению информационно-управляющей системы для посадки беспилотного воздушного судна**Горин В.А.¹ gorin.va@dvfu.ru, Губанков А.С.^{1,2} gubankov@iacp.dvo.ru, Юхимец Д.А.^{1,2} undim@iacp.dvo.ru¹МГУ им. адм. Г.И. Невельского, ²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Аннотация. В статье рассматривается решение задачи обеспечения точной автоматической посадки беспилотного воздушного судна (БВС), оснащённого типовым набором датчиков и полётным контроллером (ПК) с имеющейся системой управления, с помощью недорогой и компактной встраиваемой информационно-управляющей системы (ИУС), использующей компьютерное зрение и визуальные маркеры различных типов для позиционирования БВС относительно посадочной площадки. Основным направлением использования предлагаемой ИУС является расширение применения БВС для решения задач морского и внутреннего водного транспорта, имеющего пригодные для этого площадки ограниченных размеров. Разработанная ИУС позволит эксплуатировать БВС в автоматическом режиме для решения различных задач, в частности инспекции судов, поисков косяков промысловых рыб, обеспечения связи, морской логистики и т.д. Для подтверждения работоспособности системы приводятся результаты моделирования работы ИУС и её натурных испытаний на суше с применением экспериментального БВС. Морские испытания запланированы на навигационный период 2025 г.

Ключевые слова: Беспилотное воздушное судно, информационно-управляющая система, визуальный маркер, robotic operation system (ROS).

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 24-61-00025)

Для цитирования: Горин В.А., Губанков А.С., Юхимец Д.А. Разработка подхода к реализации информационно-управляющей системы для точной посадки беспилотного летательного аппарата. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 51—60. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.079

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.079>**Approach to development of an information-control system for landing an unmanned aerial vehicle**Vladislav A. Gorin¹ gorin.va@dvfu.ru, Anton S. Gubankov^{1,2} gubankov@iacp.dvo.ru,Dmitry A. Yukhimets^{1,2} undim@iacp.dvo.ru¹Laboratory of Marine Unmanned Aviation and Marine Aviation Systems Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, ²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

Abstract. The paper deals with the solution of the problem of ensuring precision automatic landing of unmanned aerial vehicles equipped with a typical set of sensors and a flight controller with an implemented control system by means of a cheap and compact embedded information-control system, using computer vision and visual markers of various types for positioning the unmanned aircraft relative to the landing site. The main direction of application of the proposed information-control system is to expand the use of unmanned aerial vehicles to solve the problems of maritime and inland waterway transport, which has suitable sites of limited size. The developed information-control system will make it possible to operate the above vehicles in automatic mode to solve various tasks, in particular ship inspections, searches for shoals of commercial fish, communications, marine logistics, etc. To confirm the system's operability, the results of modeling and its field tests on land using experimental unmanned aerial vehicle are presented. Sea trials are planned for the next navigation period of 2025.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, information-control system, visual marker, robotic operation system (ROS).

Financial Support: This work is supported by Russian Scientific Foundation (grant 24-61-00025).

For citation: Vladislav A. Gorin, Anton S. Gubankov, Dmitry A. Yukhimets. Approach to development of an information-control system for landing an unmanned aerial vehicle. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 51—60. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.079

Введение

Совершенствование БВС в течение последних десятилетий, позволившее стать им компактными, функциональными и доступными, как с точки зрения стоимости, так и с точки зрения необходимых для их эксплуатации навыков и знаний, стало следствием появления малоразмерной, дешевой и производительной электроники, совершенствования электрических двигателей и аккумуляторов на

основе лития, а также общего развития систем управления. Появились БВС, способные решать широкий спектр задач, занимаясь не только тем, что раньше возлагалось на пилотируемую авиацию, но и тем, что в принципе считалось не осуществимым или экономически нецелесообразным. В настоящее время БВС активно применяются в сельском хозяйстве и нефтегазовой отрасли, используются для осуществления аэрофотосъемки, а также для картографирования, геодезии и в научных

исследованиях. При этом, согласно прогнозам, сфера применения БВС будет неуклонно расширяться в течение грядущих десятилетий и потребность в них будет постоянно расти.

Перспективным является внедрение БВС на флоте для решения задач морского и внутреннего водного транспорта. Они способны взять на себя часть функций, возлагаемых зачастую на пилотируемые летательные аппараты вертолетного типа, доставляя грузы с суши на борт судна и наоборот, осуществляя мониторинг состояния водной поверхности, выступая в качестве платформ для размещения средств наблюдения или ретрансляции сигналов и т. д. При этом БВС могут размещаться там, где нет возможности разместить пилотируемый летательный аппарат.

Для успешного применения БВС в этих сценариях необходимо, чтобы они обладали возможностью точной посадки в автоматическом режиме с использованием небольших площадок [1,2], местоположение которых изначально точно может быть не известно. При использовании БВС на море такое требование продиктовано ограниченностью на судах пространства, которое может быть задействовано для посадки, и тем, что любое судно во время стоянки неизбежно перемещается из-за воздействия течений, ветра и прочих факторов. На суше же – требованиями безопасности при эксплуатации БВС в населенных пунктах для доставки грузов и т. п.

Для удовлетворения существующих потребностей разрабатывается и изготавливается множество разнообразных БВС, использование которых для решения обозначенных задач на первый взгляд является очевидным и экономически целесообразным. Большинство производителей и разработчиков БВС закладывают в свои изделия возможности для обеспечения выполнения только базовых, наиболее распространенных задач, оснащая их полётными контроллерами, использующими закрытые готовые управляющие системы с ограниченным набором функций, а также стандартными наборами датчиков, в число которых входят GNSS (global navigation satellite system) приемники, обеспечивающие невысокую точность позиционирования [3,4], что влечет за собой отсутствие у таких БВС возможности точной автоматической посадки.

Существует несколько подходов к решению обозначенной проблемы, позволяющих использовать существующие БВС, а не разрабатывать дорогие узкоспециализированные модели. К примеру, в работе [5] для осуществления точной автоматической посадки БВС предлагается оснастить его и посадочную площадку модулями RTK GNSS (Real Time Kinematic GNSS), которые обеспечивают высокую точность позиционирования как самого БВС, так и посадочной площадки, а также микрокомпьютером, который формирует команды управления для БВС, получая по каналу связи координаты посадочной площадки. Такой подход позволяет добиться высокой точности при посадке БВС, однако обладает недостатками, обусловленными высокой стоимостью модулей RTK GNSS, необходимостью наличия канала связи между БВС и площадкой, и потребностью в превращении её

в дорогое и сложное устройство, требующее постоянного электропитания для работы.

В работах [6-10] для точной посадки БВС предлагается использовать разнообразные устройства захвата, позволяющие поймать БВС. Например, в работах [6,7] используются устройства захвата, устанавливаемые на конце кран-балки на судне, с помощью которых производится захват БВС и его торможение. В [6] устройство оснащается телевизионной камерой и дальномером, с помощью которых осуществляется коррекция положения БВС относительно захвата во время посадки. При этом на борту самого БВС не устанавливается дополнительное оборудование. В работе [7] предлагается использовать устройство захвата, аналогичное предыдущему, но с установленными на нем маяками вместо камеры и дальномера. Для обнаружения маяков на борту БВС располагается приемное устройство. В работе [8] устройством захвата выступает многозвенный манипулятор, который устанавливается на посадочной площадке и используется для захвата и посадки БВС. В [9] описывается применение лебёдки и магнитного улавливающего устройства для точной посадки БВС. Лебедка устанавливается на борту БВС и при посадке опускает металлический груз, который улавливается магнитным устройством, расположенным на посадочной площадке. При захвате груза устройством с помощью лебедки БВС выравнивается относительно площадки и подтягивается к ней. В работе [10] представлен подход, совмещающий идеи из работ [8,9]. Предлагается использовать манипулятор, устанавливаемый на посадочной площадке, рабочим инструментом которого является магнитный захват, способный притягивать груз, опускаемый лебедкой, встроенной в БВС, что обеспечивает стыковку БВС с манипулятором для дальнейшей посадки. Для определения положения БВС относительно посадочной площадки используются видеорекамеры высокого разрешения и установленные на БВС инфракрасные метки.

Основной проблемой предложенных в работах [6-10] решений является необходимость оснащения посадочной площадки громоздкими и дорогими устройствами, которые к тому же, в случае неудачного захвата, могут привести к повреждению БВС. При этом представленные в [9,10] системы требуют установки на БВС лебёдки с грузом, увеличивающей его массу.

Еще одним возможным подходом является создание систем с использованием технического зрения, которые позволяют реализовать распознавание посадочной площадки и наведение на неё БВС за счет выделения ее на фоне окружающей среды с помощью цветовых [11] или специальных визуальных маркеров [12]. Указанные системы, имея очевидные недостатки в виде ограниченной дальности обнаружения посадочной площадки и зависимости качества их работы от освещенности и погодных условий, обладают существенными преимуществами, заключающимися в их невысокой стоимости, малых габаритах и отсутствии необходимости размещения на посадочной площадке дорогого и громоздкого оборудования.

В связи с этим в настоящей работе рассматривается подход к решению проблемы

обеспечения точной автоматической посадки БВС, заключающийся в синтезе для существующих БВС встраиваемой ИУС, способной взаимодействовать с распространенными готовыми управляющими системами и позволяющей без внесения в БВС существенных изменений добавить им функцию автоматической точной посадки.

Указанная ИУС рассматривается на примере экспериментально мультироторного БВС с конкретным набором установленных на нем аппаратных средств. Полученная система содержит необходимые компоненты для управления беспилотным летательным аппаратом и может быть легко дополнена или изменена в ходе эксплуатации.

Постановка задачи

Исходя из анализа существующих подходов к решению проблемы обеспечения точной автоматической посадки БВС для разрабатываемой ИУС были сформулированы следующие требования:

- 1) ИУС должна быть совместима с существующими готовыми управляющими системами, применяемыми в БВС.
- 2) Система должна быть построена на базе доступных и дешевых компонентов.
- 3) Для своей работы ИУС не должна требовать размещения на посадочной площадке какого-либо оборудования.
- 4) ИУС должна быть реализована на базе ROS для обеспечения модульности программных компонентов, упрощения расширения системы и внесения в неё изменений.

5) ИУС должна обеспечивать определение местоположения посадочной площадки и управление БВС, для его приведения к ней и посадки.

Таким образом, разработанная ИУС должна обеспечивать добавление функции точной посадки большинству БВС, которые не обладают ей изначально, без внесения изменений в их типовое программное обеспечение (ПО). При этом разрабатываемая ИУС должна быть легко встраиваемой, чтобы избавиться от необходимости внесения конструктивных изменений в БВС, и модульной на программном уровне.

Описание экспериментального БВС

Разработка ИУС осуществлялась на примере экспериментального аппарата, представленного на рисунке 1. Этот аппарат оснащён набором стандартных датчиков и типовым полётным контроллером.



Рис. 1. Экспериментальное БВС

В качестве программного обеспечения для полётного контроллера применяется ArduPilot.

Экспериментальное БВС содержит два бортовых вычислительных устройства: одноплатный микрокомпьютер ODROID XU4 и полётный контроллер PIXHAWK 2.4.8, оснащённый инерциальным измерительным модулем MPU6000 (IMU, inertial measurement unit) и датчиком атмосферного давления MS5607. Также аппарат оснащён следующим набором датчиков:

- модуль GPS Bantian BN-452 с интегрированным магнитным датчиком QMC5883L,
- модуль PX4FLOW,
- лазерный дальномер Garmin Lidar Lite V3,
- приёмником сигналов радиопередачи TBS Crossfire RX,
- USB-камера с разрешением 800x600 пикселей.

Схема подключения оборудования экспериментального аппарата с установленной встраиваемой системой точной посадки показана на рисунке 2. К полётному контроллеру PIXHAWK по интерфейсу I2C подключаются датчики QMC5883L, Garmin Lidar Lite V3 и PX4FLOW, по последовательному порту – модуль GPS BN-452, приёмник TBS Crossfire RX и система точной посадки, состоящая из микрокомпьютера ODROID XU4 и USB-камеры.

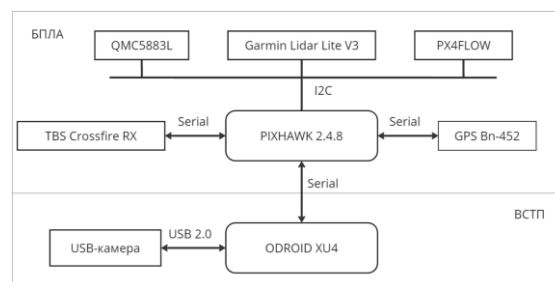


Рис. 2. Схема подключения оборудования экспериментального БВС

Архитектура ИУС

Исходя из сформулированных требований была разработана архитектура ИУС, обеспечивающая выполнение функций, необходимых для осуществления точной автоматической посадки БВС.

Для того, чтобы система имела возможность обнаружить и определить местоположение посадочной площадки и при этом на посадочной площадке не пришлось размещать какое-либо оборудование, в ней была применена технология компьютерного зрения. Такой подход также позволил сделать систему компактной, простой и дешевой.

На посадочной площадке для её обнаружения размещаются визуальные маркеры двух типов: ArUco и цветные. Использование двух типов маркеров обусловлено их недостатками, которые при совместном применении могут быть скомпенсированы. Так, для маркеров ArUco можно добиться относительно высокой точности при отслеживании их положения и ориентации с помощью систем технического зрения, однако в силу самого устройства этих маркеров дальность их обнаружения и распознавания невысока. Цветовой маркер аналогичных размеров может быть обнаружен такой системой на существенно большем расстоянии, однако точность при его отслеживании

будет ниже, в сравнении с маркером ArUco. Из этого следует, что для обеспечения приемлемой дальности работы системы и сохранения небольших габаритов посадочной площадки имеет смысл применять два типа маркеров, используя цветовой маркер при большом удалении БВС от посадочной площадки, а ArUco – когда БВС находится близко к ней.

Разработанная ИУС выполняет обнаружение посадочной площадки с расположенными на ней визуальными маркерами, рассчитывает положение посадочной площадки относительно БВС и на основании разработанного алгоритма формирует команды управления для ПК, содержащие целевые точки, в которые БВС должно переместиться. Применение позиционного управления позволяет осуществить требование совместимости с существующими закрытыми управляющими системами, поскольку большинство из них способны принимать от внешних устройств команды на перемещение БВС в заданную точку пространства.

Предполагается, что при этом ПК БВС работает в типовом режиме и решает следующие задачи: сбор и первичная обработка данных от бортовых датчиков, выработка сигналов управления двигателями для стабилизации аппарата в пространстве, удержания заданного положения или движения по траектории при работе в автономном и телеуправляемом режимах.

Для работы встраиваемой системы точной посадки, построенной согласно предлагаемой архитектуре, необходимо, чтобы БВС, после выполнения заложенной в него программы действий, прибыло в предполагаемую точку посадки, после чего перешло в режим управления устройством-компаньоном. После перехода в этот режим система точной посадки начинает выполнение своих функций.

Диаграмма состояний системы точной посадки показана на рисунке 3. Система в процессе работы может находиться в 3-х возможных состояниях.

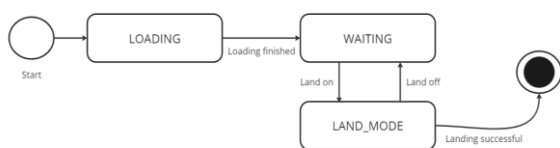


Рис. 3. Диаграмма состояний системы

1. Состояние **LOADING**. В процессе инициализации система переходит в режим ожидания загрузки микрокомпьютера и полётного контроллера (**LOADING**). Основная задача, выполняемая в этом состоянии, заключается в установке связи между компьютером ODROID XU4 и ПК PIXHAWK. После успешной загрузки компьютера, контроллера и установки связи ИУС переходит в состояние **WAITING**.

2. Состояние **WAITING**, в котором система ожидает команды на переход в рабочий режим **LAND_MODE**.

3. Состояние **LAND_MODE**, в котором осуществляется посадка БВС за счёт использования

данных о положении маркера, расположенного на посадочной площадке.

Описание системы, запускаемой на микрокомпьютере

На микрокомпьютере ODROID XU4 под управлением операционной системы Ubuntu 18.04. запущены узлы ROS для обработки данных, поступающих от USB-камеры, формирования команд управления при нахождении системы посадки в состоянии **LAND_MODE** и обмена данными с полётным контроллером. Граф узлов системы показан на рисунке 4.

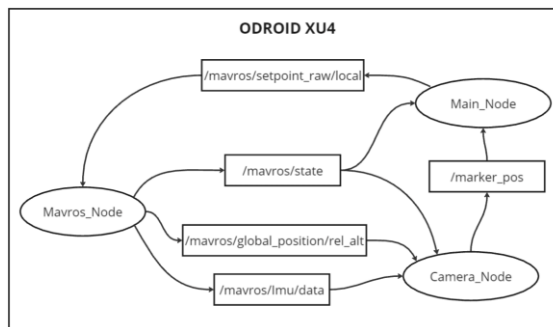


Рис. 4. Граф узлов ROS

Типы сообщений, которыми обмениваются узлы системы, представлены в таблице 1.

Каждый узел отвечает за выполнение определенных функций, необходимых для работы системы.

За обработку изображения, получаемого с камеры, обнаружение и определение положения маркеров, расположенных на посадочной площадке, отвечает узел **Camera_Node**.

Узел **Camera_Node** представляет собой программу, реализующую алгоритм обработки изображения для обнаружения маркеров на посадочной площадке и расчёта их координат.

Для работы алгоритма, реализованного в данном узле, необходимо предварительно получить матрицу внутренних параметров камеры и вектор её коэффициентов искажения. Их определение выполняется с помощью стандартных процедур калибровки.

Для уменьшения вычислений узел в процессе работы, получив изображение с камеры, в первую очередь пытается обнаружить на нём ArUco маркеры. Обнаружение и расчет положения ArUco маркеров осуществляется штатными средствами библиотеки OpenCV. Сначала исходное изображение с камеры конвертируется в палитру оттенков серого, после чего на нем обнаруживаются все ArUco маркеры. Из полученного массива маркеров выбираются те, идентификационные номера которых совпадают с известными номерами маркеров на посадочной площадке. Поскольку на посадочной площадке может располагаться несколько ArUco маркеров разных размеров, из выбранных маркеров приоритет отдается тому, который имеет наименьший размер. Для этого маркера с использованием известных матрицы внутренних параметров камеры и вектора коэффициентов искажения проводится расчет его положения в системе координат (СК) $Ox_c y_c z_c$,

Таблица 1

Типы сообщений топиков

Название топика	Тип данных	Описание топика
/mavros/imu/data	Sensor_msgs/Imu	Топик, в который публикуется сообщение, содержащее угловые скорости, линейные ускорения и ориентация БВС, вычисленные ПК
/mavros/state	Mavros_msgs/State	Топик, содержащий информацию о режиме работы ПК БВС
/mavros/setpoint_raw/local	Mavros_msgs/PositionTarget	Топик, в который публикуются сообщения, содержащие координаты целевой точки для ПК БВС
/marker_pos	Geometry_msgs/Point	Топик, в который публикуются сообщения, содержащие позицию маркера в системе координат, связанной с БВС
/mavros/global_position/rel_alt	Std_msgs/Float64	Топик, содержащий информацию о высоте БВС

связанной с камерой, начало которой совпадает с началом связанной с БВС СК $Ox_d y_d z_d$, но ось z_c направлена противоположно оси z_d , т.е. вниз. Это необходимо учитывать в дальнейших расчетах. Расположение систем координат показано на рисунке 5, где $Oxyz$ – неподвижная (абсолютная) СК, $Ox_h y_h z_h$ – полусвязанная СК.

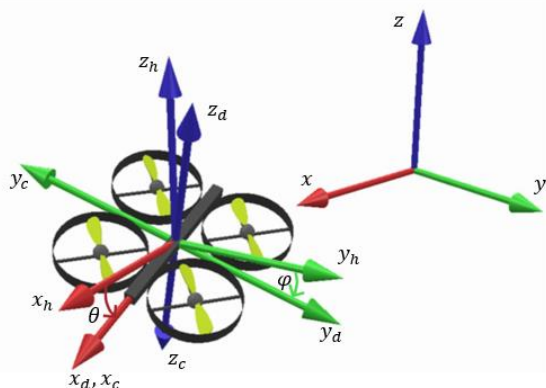


Рис. 5. Расположение систем координат

Поскольку в ПО ArduPilot принято задавать целевую точку для полетного контроллера БВС в полусвязанной СК $Ox_h y_h z_h$, начало которой совпадает с началом СК БВС $Ox_d y_d z_d$, ось z_h параллельна оси z абсолютной СК, а сама СК поворачивается по курсу вслед за БВС, необходимо получить координаты маркера в этой СК, зная их в СК $Ox_d y_d z_d$, для чего можно воспользоваться выражением:

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\varphi) \cdot \sin(\theta) & \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где φ и θ – углы крена и тангажа БВС, которые рассчитываются ПК.

В случае успешного обнаружения ArUco маркера и расчёта его координат, они публикуются в топик «/marker_pos» с указанием типа маркера, и выполнение программы начинается заново. В противном случае узел начинает поиск на изображении цветного маркера.

Для этого исходное изображение с камеры сначала преобразуется в цветовую палитру HSV (hue, saturation, value), после чего к нему применяется типовой алгоритм, описанный в работах [11,13]. Суть алгоритма заключается в получении из

HSV изображения черно-белого изображения, на котором белым цветом выделен цветовой маркер, а черным – всё остальное. На последнем этапе обработки изображения устраняется его дисторсия, которая в дальнейшем может привести к возникновению ошибок при расчете координат цветowego маркера. Устранение дисторсии производится с помощью описанного в работе [13] метода с применением матрицы внутренних параметров камеры и вектора коэффициентов искажения.

Результат работы такого алгоритма представлен на рисунках 6 и 7. На рисунке 6 представлено исходное изображение, на рисунке 7 – итоговое.



Рис. 6. Исходное цветное изображение

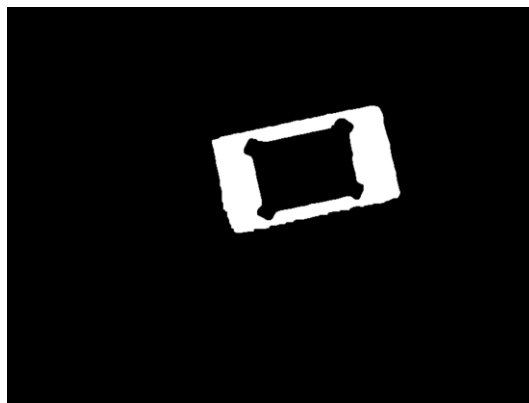


Рис. 7. Итоговое изображение

Обработанное изображение с устраненной дисторсией используется для расчета координат цветового маркера в СК $Ox_c y_c z_c$.

Преобразование трехмерных координат точки, попадающей в поле зрения камеры, в пиксельные координаты описывается выражением:

$$z_c \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где p_x и p_y – пиксельные координаты точки на изображении, $[x_c y_c z_c]^T$ – координаты точки пространства в СК $Ox_c y_c z_c$, f_x, f_y – фокусные расстояния камеры по осям изображения, c_x, c_y – координаты оптического центра.

Выражение (2) позволяет получить уравнение для расчета координат цветового маркера в СК $Ox_c y_c z_c$ при известных пиксельных координатах маркера:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = z_c \cdot \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Пиксельные координаты центра маркера на изображении рассчитываются по следующим формулам:

$$p_x = \text{round}\left(\frac{m_x}{m_0}\right), \quad (4)$$

$$p_y = \text{round}\left(\frac{m_y}{m_0}\right).$$

Для расчёта предварительно находятся величины m_0, m_x и m_y . Величина m_0 представляет собой количество белых пикселей на полученном изображении, m_x и m_y – суммы координат белых пикселей по осям x_{img} и y_{img} изображения соответственно.

Также для расчета координат маркера нужно знать величину z_c , которая может быть получена по следующей формуле:

$$z_c = H \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta), \quad (5)$$

где H – высота БВС над поверхностью земли, рассчитанная ПК.

Для получения координат цветового маркера в СК $Ox_h y_h z_h$ можно воспользоваться выражением (1), заменив в нём вектор $[x_d y_d z_d]^T$ на $[x_c y_c z_c]^T$.

Как и в случае использования ArUco маркера, координаты цветового маркера публикуются в топик «/marker_pos» с указанием типа маркера.

Если на изображении не удалось найти маркеры, в топик ничего не публикуется.

Управление движением БВС во время посадки реализует узел «Main_Node». Этот узел, если полётный контроллер БВС находится в режиме управления устройством-компаньоном, т.е. ИУС находится в состоянии LAND_MODE, формирует для ПК типизированные команды установки целевой точки для БВС, в которые оно должно переместиться, на основе данных, полученных из топика «/marker_pos». Целевая точка устанавливается так, чтобы посадка происходила в два этапа, на первом из которых БВС, сохраняя высоту, сближалось бы с посадочной площадкой, а на втором осуществляло

снижение, если находится в пределах допустимого удаления, величина которого задается программно и зависит от типа маркера, используемого для расчета относительного положения площадки.

При этом координаты целевых точек, поступающие на вход системы управления БВС, подвергаются фильтрации для исключения рывков [14,15] с помощью экспоненциального фильтра [16]:

$$\text{filt}(kh) = \text{filt}((k-1)h) + \alpha \cdot (\text{meas}(kh) - \text{filt}((k-1)h)), \quad (6)$$

где filt – это отфильтрованное значение, а meas – новое измеренное значение, k – номер шага, h – время шага, α – весовой коэффициент фильтра.

Для установки соединения между ПК БВС и бортовым микрокомпьютером используется предоставляемый ROS пакет MAVROS. При его использовании автоматически запускается узел Mavros_Node, который позволяет отправлять команды и получать данные от ПК БВС с помощью протокола MAVLink.

Исследование работы системы посадки БВС

Для проверки корректности функционирования разработанной системы на первом этапе было проведено компьютерное моделирование, для чего в среде моделирования CoppeliaSim была получена модель БВС, характеристики которой соответствовали экспериментальному аппарату, рассмотренному выше.

Моделирование проводилось с использованием посадочной площадки, на которой размещались два маркера ArUco с размерами сторон 4x4 и 18x18 сантиметров, а также цветовой маркер размером 50x50 см. Посадочная площадка имела координаты (0 м, 0 м, 0 м). Весовой коэффициент фильтра был подобран эмпирически, его значение составило $\alpha = 0.4$.

БВС был помещен в точку с координатами (-10 м, -10 м, 60 м), после чего ИУС была переведена в режим LAND_MODE. Траектория движения БВС при посадке показана на рисунке 9. На рисунке 10 показан график динамической ошибки в плоскости XY.

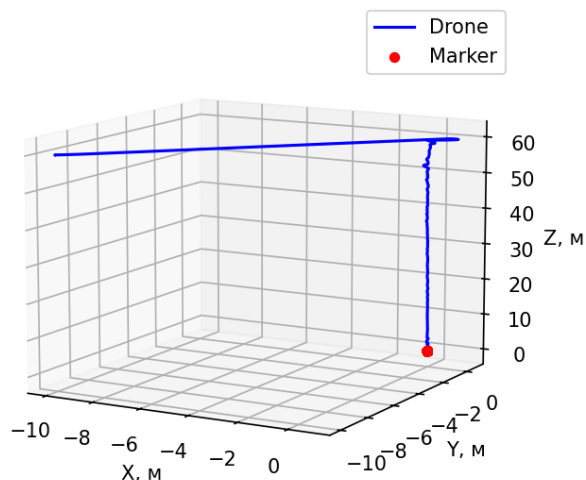


Рис. 9. Траектория БВС при посадке

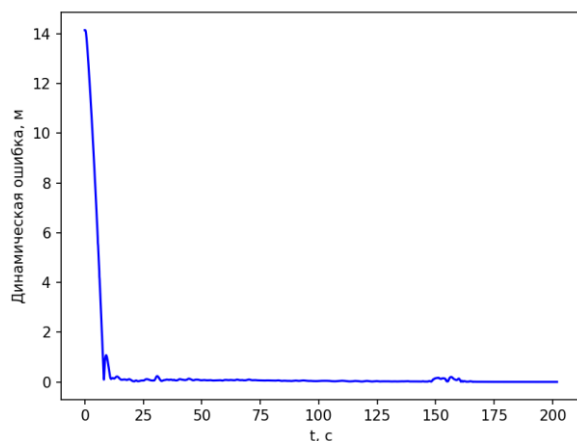


Рис. 10. График динамической ошибки в плоскости XY

На рисунке 9 видно, что разработанная ИУС позволила добиться при посадке БВС точности около 0.01 м.

Завершающим этапом проверки корректности работы системы стало проведение натурных испытаний с применением экспериментального БВС.

В ходе испытаний на посадочной площадке располагались маркеры ArUco с размерами сторон 4x4 и 18x18 сантиметров, а также цветовой маркер с приблизительно размером 60x60 сантиметров.

Были достигнуты следующие значения дальности обнаружения маркеров системой: цветовой маркер – 42-45 метров, большой ArUco маркер – 8-9 метров, малый ArUco маркер – 3.5-2 метра.

Была осуществлена посадка БВС в автоматическом режиме с высоты 41 метра при начальном удалении БВС от посадочной площадки в горизонтальной плоскости в 16.5 метров, траектория движения БВС при посадке показана на рисунке 11. Ось X связанной с поверхностью земли СК OXYZ направлена на Север, ось Y – на Запад. Точность приземления составила 0.24 метра, что видно на графике динамической ошибки в плоскости XY, представленном на рисунке 12.

Рисунок 13 содержит графики скорости БВС в СК OXYZ. Скорость по оси X показана красной линией, по Y – зелёной, по Z – синей.

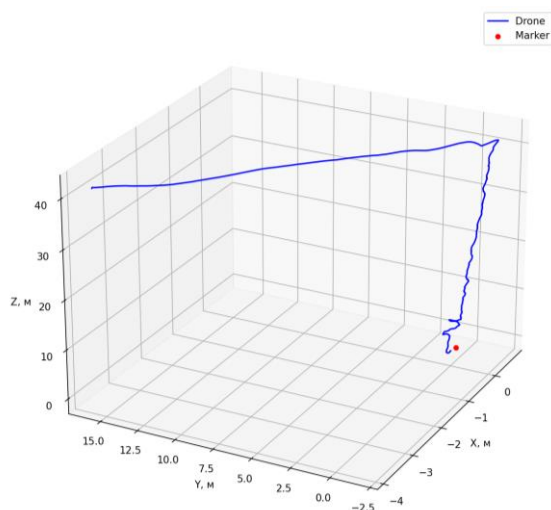


Рис. 11. Траектория БВС при посадке

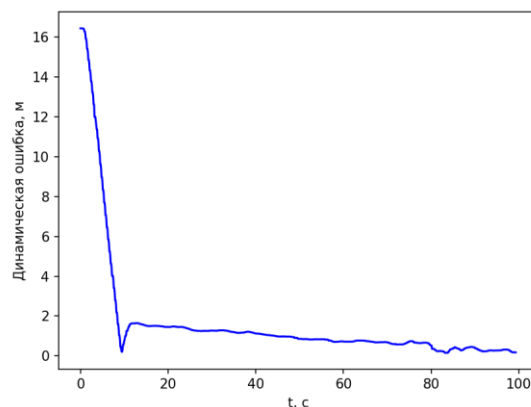


Рис. 12. График динамической ошибки в плоскости XY

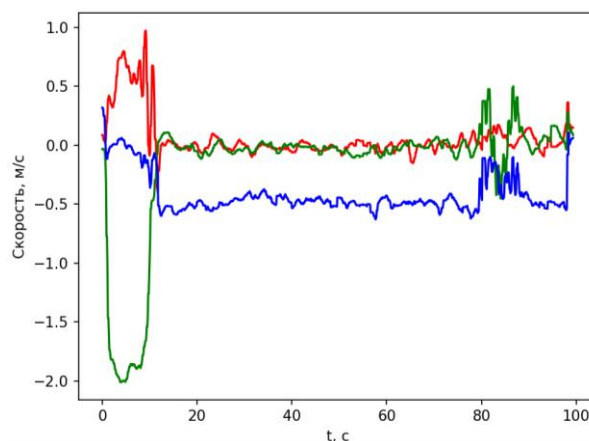


Рис. 13. Скорости БВС

На представленных выше графиках видно, что с начала движения по 13 секунду БВС стремится с максимальной скоростью сблизиться с посадочной площадкой, при этом сохраняя высоту неизменной. С 13 секунды начинается спуск и более точное выравнивание по посадочной площадке, при этом используется цветовой маркер. С 77 секунды, которая соответствует высоте БВС около 9 метров, начинаются переключения системы между цветовым и большим ArUco маркерами, переключения прекращаются после 88 секунды, соответствующей высоте в 5 метров. С 93 по 96 секунду система переключается с большого на малый ArUco маркер. После чего переключения прекращаются и используется только малый маркер. Скорость посадки была ограничена 0.5 м/с из соображений безопасности.

На рисунке 14 представлено изображение, полученное с камеры БВС во время посадки с высоты 23 м.

Результаты, полученные при натурных испытаниях и компьютерном моделировании, подтвердили работоспособность системы. Следует отметить, что точность посадки БВС и качество работы системы в реальных условиях оказалась хуже, чем при компьютерном моделировании, что было ожидаемо, поскольку моделирование не учитывает влияние погодных условий, особенностей БВС и его системы управления.



Рис. 14. Изображение с камеры БВС

Заключение

Разработанная ИУС может быть применена на различных БВС, способных осуществлять

вертикальный взлёт и посадку. Она позволяет использовать существующие БВС, оснащенные стандартными наборами датчиков и полетными контроллерами под управлением готовых закрытых управляющих систем, для решения задач, требующих от них возможности точной автоматической посадки на небольшие посадочные площадки. При этом предложенная система устраняет необходимость точного указания для БВС координат посадочной площадки при его автономной эксплуатации, поскольку позволяет ему самостоятельно осуществлять обнаружение площадки и посадку на неё. Для использования ИУС не требует внесения существенных изменений в конструкцию БВС, а также серьёзного увеличения его стоимости. Предлагаемая система может быть использована на БВС, применяемых с судов морского и внутреннего водного транспорта, а также БВС, предназначенных для решения задач логистики на суше, если их предполагаемые посадочные площадки имеют небольшой размер.

Литература

1. Губанков А.С., Ермолов И.Л., Минаев Д.Д., Силкин А.А., Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов на суда морского и внутреннего водного транспорта. Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара, 2023, С. 530-534.
2. Lu K., Li Q. An autonomous carrier landing system design and simulation for unmanned aerial vehicle. Guidance Navigation and Control Conference (CGNCC), 2014, pp. 1352-1356.
3. Скрыпник О.Н., Нечаев Е.Е., Арефьев Р.О., Астраханцева Н.Г. Исследование точности совмещенного ГЛОНАСС/GPS приемника. Материалы докладов 25-ой Международной Крымской конференции, 2015, Т. 1, С. 239-240.
4. Li X., Zhang, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., Schuh, H. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. Scientific Reports 5, 2015, Article number: 8328.
5. Jordan A., Rydalch M., McLain T., Wiliamson M. Precision Maritime Localization and Landing with Real-time Kinematic GNSS. AIAA SCITECH 2023 Forum, 2013, pp. 1-11.
6. Шаров С.Н., Соловьева В.В., Дворяшин М.С. Судовая система управления посадкой беспилотного летательного аппарата. Патент РФ 133094, 2013, Бюл. №28.
7. Подоплёкин Ю.Ф., Толмачёв С.Г., Шаров С.Н. Информационно-управляющая система приведения беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно. Информационно-управляющие системы, 2012, № 3, С. 22-28.
8. Maier M., Kondak K. Robot assisted landing of VTOL UAVs on ships: A simulation case study of the touch-down phase. IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2017, pp. 2094-2101.
9. Liu C., Jiang Z., Xu R., Ji X., Zhang L., Qian H. Design and optimization of a magnetic catcher for UAV landing on disturbed aquatic surface platforms. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022, pp. 1162-1168.
10. Xu R., Liu C., Cao Z., Wang Y., Qian H. A Manipulator-Assisted Multiple UAV Landing System for USV Subject to Disturbance. Cornell University, 2022, pp. 1-12.
11. Lee H., Jung S., Shim D.H. Vision-based UAV landing on the moving vehicle. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016, pp.1-7.
12. Dergachov K., Bahinskii S., Piavka I. The Algorithm of UAV Automatic Landing System Using Computer Vision. 2020 IEEE 11th International Conference of Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 2020, pp. 247-252.
13. Robert L. OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook. Packt Open Source Pub., 2011, 287p.
14. Gubankov A., Gornostaev I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group. 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 574-579.
15. Gubankov A., Gornostaev I. Comparison Study of Different Types of Setting Reference Movements for Mechatronic Objects by Means of Parametric Splines. Proc. of IEEE International Conference on Ocean Studies (ICOS 2022). Vladivostok, Russia, 2022, pp. 35-38.
16. Olsson G., Piani G. Computer systems for automation and control. New York: Prentice Hall, 1992, 497 p.

References

1. Gubankov A.S., Ermolov I.L., Minaev D.D., Silkin A.A., Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Osobennosti avtomaticheskoy posadki bespilotnykh letatel'nykh apparatov na suda morskogo i vnutrennego vodnogo transporta [Features of automatic landing of unmanned aerial vehicles on sea and inland waterway transport vessels]. Materialy XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara, 2023, s. 530-534.
2. Lu K., Li Q. An autonomous carrier landing system design and simulation for unmanned aerial vehicle. Guidance Navigation and Control Conference (CGNCC), 2014, pp. 1352-1356.
3. Skrypnik O.N., Nechaev E.E., Arefev R.O., Astrakhantseva N.G. Issledovanie tochnosti sovmeshchennogo GLONASS/GPS priemnika [Research of accuracy of the combined GLONASS/GPS receiver]. Materialy dokladov 25-oy Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii, 2015, T. 1, s. 239-240.
4. Li X., Zhang, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., Schuh, H. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. Scientific Reports 5, 2015, Article number: 8328.
5. Jordan A., Rydalch M., McLain T., Wiliamson M. Precision Maritime Localization and Landing with Real-time Kinematic GNSS. AIAA SCITECH 2023 Forum, 2013, pp. 1-11.
6. Sharov S.N., Solov'eva V.V., Dvoryashin M.S. Sudovaya sistema upravleniya posadkoy bespilotnogo letatel'nogo apparata [Shipboard unmanned aerial vehicle landing control system]. Patent RF 133094, 2013, Byul. №28.
7. Podoplekin Yu.F., Tolmachev S.G., Sharov S.N. Informatsionno-upravlyayushchaya sistema privedeniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov na dvizhushcheesya sudno [Information-control system for bringing unmanned aerial vehicles to a moving vessel]. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy, 2012, № 3. s. 22-28.
8. Maier M., Kondak K. Robot assisted landing of VTOL UAVs on ships: A simulation case study of the touch-down phase. IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2017, pp. 2094-2101.
9. Liu C., Jiang Z., Xu R., Ji X., Zhang L., Qian H. Design and optimization of a magnetic catcher for UAV landing on disturbed aquatic surface platforms. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022, pp. 1162-1168.
10. Xu R., Liu C., Cao Z., Wang Y., Qian H. A Manipulator-Assisted Multiple UAV Landing System for USV Subject to Disturbance. Cornell University, 2022, pp. 1-12.
11. Lee H., Jung S., Shim D.H. Vision-based UAV landing on the moving vehicle. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016, pp.1-7.
12. Dergachov K., Bahinskii S., Piavka I. The Algorithm of UAV Automatic Landing System Using Computer Vision. 2020 IEEE 11th International Conference of Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 2020, pp. 247-252.
13. Robert L. OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook. Packt Open Source Pub., 2011, 287p.
14. Gubankov A., Gornostaev I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group. 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 574-579.
15. Gubankov A., Gornostaev I. Comparison Study of Different Types of Setting Reference Movements for Mechatronic Objects by Means of Parametric Splines. Proc. of IEEE International Conference on Ocean Studies (ICOS 2022). Vladivostok, Russia, 2022, pp. 35-38.
16. Olsson G., Piani G. Computer systems for automation and control. New York: Prentice Hall, 1992, 497 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Горин Владислав Андреевич, лаборант, научная лабораторией морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gorin.va@dvfu.ru

Vladislav A. Gorin, laboratory assistant of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gorin.va@dvfu.ru

Губанков Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, заведующий лабораторией морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gubankov@iacp.dvo.ru

Anton S. Gubankov, PhD(Eng.), Associate Professor, senior scientist Institute of Automation and control processes FEB RAS, Head of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gubankov@iacp.dvo.ru

Юхимец Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН, 690041, г.Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Dmitry A. Yukhimets, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading researcher IACP FEB RAS, 5, Radio str., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 19.11.2024.

Научная статья

УДК 629.584

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.080>

Метод синтеза системы траекторного управления движением АНПА, учитывающего особенности кинематической модели их движительных комплексов

Юхимец Д.А.^{1,2,3} undim@iacp.dvo.ru,¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ²МГУ им. адм. Г.И. Невельского, ³Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. В работе предложен метод синтеза системы траекторного управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), учитывающей неопределенность параметров АНПА, а также ограничения величин управляющих воздействий, формируемых их движительными комплексами. Для решения поставленной задачи синтезируется робастная система управления пространственным положением АНПА, обеспечивающая учет влияния перекрестных связей между степенями свободы АНПА и неопределенность их параметров. При этом для обеспечения точного движения АНПА в процессе выполнения миссии дополнительно синтезируется контур коррекции программной скорости движения, для учета возможного входа движителей АНПА в насыщения и предотвращения схода его с траектории. Особенностью предложенного метода коррекции программной скорости является учет особенностей динамики АНПА и кинематики его движительного комплекса, что позволяет оперативно подстраивать программную скорость движения, не дожидаясь входа движителей в ограничения.

Ключевые слова: Автономный необитаемый подводный аппарат, траекторное управление, неопределенные параметры, движительный комплекс, кинематика движительного комплекса, динамика подводного робота.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFW-2021-0003) и государственного задания ДВФУ (тема № FZNS-2023-2011)

Для цитирования: Юхимец Д.А. Метод синтеза системы траекторного управления движением АНПА, учитывающего ограничения их движительного комплекса. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 61—68. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.080

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.080>

The synthesis method of AUV tracking control system with considering of kinematic model of their thruster system

Dmitry A. Yukhimets^{1,2,3} undim@iacp.dvo.ru,¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, ²Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, ³Far Eastern Federal University

Abstract. The article proposes a method for synthesizing a system of AUV trajectory control considering the uncertainty of the AUV parameters, as well as the limitations of the values of the control thrusts and torques formed by its propulsion complex. To solve this problem, a robust spatial position control system is synthesized, which considers the influence of interactions between the degrees of freedom of the AUV and the uncertainty of their parameters. At the same time, to ensure the accurate movement of the AUV during the mission, an additional control loop for correcting the program speed of movement is synthesized. This loop to consider the possible entry of the AUV thrusters into saturation and its departure from the trajectory. The main feature of the proposed method of correction of the program speed is to consider the peculiarities of the AUV dynamics and the kinematics of its propulsion system, which allows you to quickly adjust the program speed of movement without waiting for the thrusters to enter the saturations.

Keywords: Autonomous unmanned underwater vehicle, tracking control system, uncertain parameters, propulsion system, kinematic of propulsion system, AUV dynamic.

Financial Support: This research was carried out within the state assignment of IACP FEB RAS (theme FFW-2021-0003) and the state assignment of FEFU (theme FZNS-2023-2011)

For citation: Dmitry A. Yukhimets. The synthesis method of AUV tracking control system with considering of kinematic model of their thruster system. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 61—68. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.080

Введение

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) все чаще используются для выполнения различных миссий в заранее неизвестной обстановке [1]. Указанные миссии требуют их движения по сложным траекториям,

которые отличаются от традиционных миссий картографирования, когда АНПА движутся по прямолинейным траекториям (галсам). Примером такой миссии является отслеживание протяженного объекта (например, кабеля), который может быть проложен не прямолинейно, иметь существенные изгибы. Другим примером такого движения служит движение АНПА в окружении различных

препятствий, когда АНПА вынужден обходить указанные препятствия по сложным криволинейным траекториям.

Для выполнения указанных операций АНПА должны точно двигаться по формируемым в процессе выполнения миссии криволинейным траекториям. При этом АНПА являются сложными нелинейными объектами, имеющими существенные взаимовлияния между степенями свободы, неопределенные параметры, а также находящимися под влиянием заранее неизвестных внешних воздействий. Для точного управления таким объектом в настоящее время уже разработано большое количество методов синтеза систем управления [2-6], обеспечивающих высокую точность движения АНПА в условиях параметрической неопределенности и влияния неизвестных внешних возмущений.

Однако указанные системы управления позволяют обеспечивать высокую точность движения АНПА только в том случае, когда их движительный комплекс способен реализовать те величины сил и моментов, которые сформированы системой управления. При этом особенностью движения АНПА по сложным криволинейным траекториям является необходимость одновременного формирования управляющих воздействий по нескольким степеням свободы с помощью одних и тех же движителей. В результате может возникнуть ситуация, когда отдельные движители входят в насыщение и нужные управляющие силы и моменты не могут быть реализованы движительным комплексом АНПА. В результате АНПА может сойти с траектории и даже столкнуться с окружающими объектами.

Многие исследователи разрабатывают методы учета кинематических и динамических особенностей движительного комплекса АНПА для реализации высокоточных систем управления движением. В работе [7] предлагается метод синтеза системы траекторного управления АНПА, где в качестве движительного комплекса используется маршевый движитель и рули. Указанные системы управления учитывают особенности кинематики движительного комплекса и нелинейные зависимости управляющих моментов от скорости движения АНПА, но не учитывают ограничения, накладываемые особенностями траектории. Кроме того, указанные подходы не применимы к АНПА с движительными комплексами, состоящими из набора движителей.

В работе [8] предлагается метод учета ограничений движительного комплекса АНПА за счет коррекции программной скорости его движения вдоль заданной траектории. Эта коррекция осуществляется с помощью дополнительного контура настройки программной скорости в зависимости от текущей точности движения АНПА. В качестве недостатка метода можно указать то, что указанная коррекция начинается только тогда, когда движительный комплекс уже находится в насыщении и это начинает влиять на точность движения АНПА.

В работе [9] предлагается метод предварительной оценки корректной величины программной скорости, которая не приведет ко входу в насыщения движителей АНПА при движении по гладкой траектории, описываемой сплайнами. Однако указанный метод дает слишком заниженную

оценку указанной скорости исходя из наиболее нагруженных участков траектории и слабо применим для траекторий, которые заранее неизвестны и формируются в процессе выполнения АНПА заданной миссии.

Таким образом, в работе решается задача разработки метода синтеза высокоточной системы траекторного управления АНПА в неизвестной заранее обстановке, который за счет коррекции программной скорости движения АНПА, на основе анализа особенностей динамики АНПА и кинематики его движительного комплекса позволял бы формировать указанную скорость в процессе движения по неизвестным заранее траекториям, не дожидаясь входа в насыщения отдельных движителей и схода АНПА с траектории.

Постановка задачи

В работе рассматривается движение АНПА по криволинейным траекториям, которые могут задаваться заранее или формироваться в процессе движения АНПА (например, при обходе препятствий).

Рассматриваемый АНПА описывается следующей моделью динамики [10]:

$$M(\dot{v}) + C_R(M_R, v)v + g(\xi) + (C_A(M_A, v) + D(v))v = \tau, \quad \dot{\eta} = J(\xi)v, \quad (1)$$

где $M = M_R + M_A \in R^{6 \times 6}$; $M_R \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции АНПА; $M_A \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции присоединенных масс и моментов инерции; $C_R(M_R, v) \in R^{6 \times 6}$, $C_A(M_A, v) \in R^{6 \times 6}$ – матрица Кориолисовых и центробежных сил и моментов; $D(v) \in R^{6 \times 6}$ – матрица сил и моментов гидродинамического сопротивления; $g(\xi) \in R^6$ – вектор гидростатических сил и моментов; $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ – вектор положения и ориентации АНПА в абсолютной системе координат (АСК); $\xi = [\varphi, \theta, \psi]$ – вектор углов крена, дифферента и курса; $J(\xi) \in R^{6 \times 6}$ – матрица перехода из связанной системы координат (ССК) в АСК; $\tau = [T_x, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z]^T$ – вектор упоров и моментов, создаваемых движительным комплексом АНПА в ССК; $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей АНПА в ССК.

Матрица Кориолисовых и центробежных сил и моментов в уравнении (1) описывается выражениями [10]:

$$C_R(M_R, v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix}, \quad C_A(M_A, v_r) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_{1r} + A_{12}v_{2r}) \\ -S(A_{11}v_{1r} + A_{12}v_{2r}) & -S(A_{21}v_{1r} + A_{22}v_{2r}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$M_R = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

где $v_1 = [v_x, v_y, v_z]^T$, $v_{1r} = [v_{rx}, v_{ry}, v_{rz}]^T$, $v_2 = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$, а оператор $S(\cdot)$:

$$S(\beta) = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_3 & \beta_2 \\ \beta_3 & 0 & -\beta_1 \\ -\beta_2 & \beta_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \beta = [\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3]^T.$$

Считается, что матрица гидродинамических сил и моментов является диагональной, а ее элементы имеют следующий вид [10]:

$$D_{ii} = d_{1i} + d_{2i}|v_i|, i = (\overline{1,6}), \quad (3)$$

где d_{1i} и d_{2i} гидродинамические коэффициенты.

Будем считать, что в модели (1) параметры АНПА известны с некоторой точностью, и она может быть представлена в следующем виде:

$$(\mathbf{M}_n + \mathbf{M}_\Delta)v + ((\mathbf{C}_n(\mathbf{M}_n, v) + \mathbf{C}_\Delta(\mathbf{M}_\Delta v)))v + (\mathbf{D}_n(d_{n1}, d_{n2}, v) + \mathbf{D}_\Delta(d_{\Delta1}, d_{\Delta2}, v))v + \mathbf{g}(\xi) = \tau, \quad (4)$$

где $\mathbf{C}_n \in R^{6 \times 6}$, $\mathbf{D}_n \in R^{6 \times 6}$ – матрицы, определяемые номинальными величинами параметров АНПА; $\mathbf{C}_\Delta \in R^{6 \times 6}$, $\mathbf{D}_\Delta \in R^{6 \times 6}$ – матрицы величины которых зависят от неопределенной или изменяющейся величины параметров АНПА; $\mathbf{M}_n \in R^{6 \times 6}$, $d_{n1} \in R^6$, $d_{n2} \in R^6$ – номинальные величины параметров АНПА; $\mathbf{M}_\Delta \in R^{6 \times 6}$, $d_{\Delta1} \in R^6$, $d_{\Delta2} \in R^6$ – неопределенные величины параметров АНПА. Матрицы $\mathbf{C}_\Delta$ и $\mathbf{D}_\Delta$ вычисляются с помощью выражений (2) и (3) с использованием $\mathbf{M}_\Delta$, $d_{\Delta1}$ и $d_{\Delta2}$.

АНПА имеет движительный комплекс, кинематика которого представлена на рис. 1. Из рис. 1 видно, что управляющие моменты по оси z ССК формируются как специальным подруливающим двигателем T_5 , так и маршевыми двигателями T_1 и T_2 .

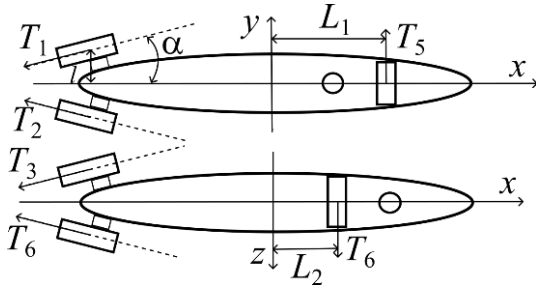


Рис. 1. Кинематика движительного комплекса АНПА

Кинематика движительного комплекса АНПА на рис. 1 описывается следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\alpha & c_\alpha & c_\alpha & c_\alpha & 0 & 0 \\ s_\alpha & -s_\alpha & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & s_\alpha & -s_\alpha & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_\alpha l & -s_\alpha l & 0 & L_2 \\ -s_\alpha l & s_\alpha l & 0 & 0 & L_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $s_\alpha = \sin \alpha$, $c_\alpha = \cos \alpha$.

Далее будем рассматривать движение АНПА в горизонтальной плоскости, так как такой режим движения является основным в процессе выполнения миссии. При этом будет считаться, что указанные траектории задаются в параметрическом виде как функции времени и программной скорости:

$$X^* = F_T(t, v^*),$$

где $X^* = [x^*, y^*]$, v^* – величина программной скорости движения АНПА вдоль программной траектории. То есть движение по траектории реализуется в виде слежения за программной точкой X^* , двигающейся по заданной траектории с программной скоростью v^* . При этом система траекторного управления АНПА работает в следящем режиме, обнуляя рассогласование между координатами целевой точки и координатами АНПА.

В процессе движения по криволинейным траекториям движительный комплекс должен формировать управляющие упоры и моменты, которые рассчитываются системой траекторного управления АНПА в зависимости от заданной программной скорости движения и от вида траектории. При этом указанная программная скорость обычно задается в миссии постоянной и определяется технологическими соображениями для качественного выполнения миссии. Однако при реальном выполнении миссии исходные траектории могут меняться из-за необходимости обхода обнаруженных препятствий, параметры окружающей среды могут не соответствовать ожидаемым (наличие сильных подводных течений). Это приводит к невозможности движительного комплекса реализовывать силовые воздействия, формируемые системой управления одновременно по нескольким степеням свободы. В этом случае необходимо уменьшать программную скорость движения АНПА, что уменьшит силовые и моментные воздействия, требуемые для обеспечения точного движения АНПА по заданным траекториям.

Таким образом, в работе решается задача разработки метода синтеза системы траекторного управления АНПА, который позволит обеспечить точное движение АНПА по заранее неизвестным траекториям с учетом возможных ограничений движительного комплекса за счет подстройки величины программной скорости движения.

Синтез закона траекторного управления АНПА

Структурная схема предлагаемой в работе системы траекторного управления АНПА показана на рис. 2. Как видно из представленного рисунка указанная система состоит из трех основных частей: следящая система управления пространственным движением АНПА, система формирования программных сигналов и система формирования программной скорости движения.

В качестве следящей системы управления пространственным движением АНПА в работе используется комбинированная робастная СУ, состоящая из нелинейного регулятора положения и регулятора с переменной структурой (см. рис. 2).

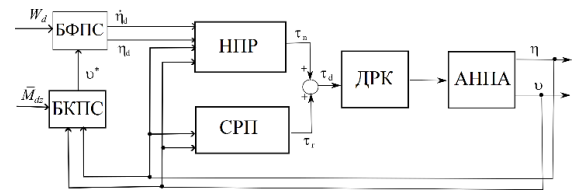


Рис. 2. Структурная схема системы динамического управления АНПА (НПР – нелинейный регулятор положения АНПА; СРП – скользящий регулятор положения, БФПС – блок формирования программных сигналов, БКПС – блок коррекции программной скорости)

Основной задачей алгоритма управления является обеспечить заданное качество управления АНПА в АСК, в условиях, когда параметры АНПА заранее точно не известны или могут меняться в процессе выполнения АНПА миссий.

Уравнение, которое будет описывать желаемую динамическую модель движения АНПА в АСК, имеет следующий вид:

$$\ddot{\eta} + \Lambda \dot{\eta} + \delta \eta = \Lambda \dot{\eta}_d + \delta \eta_d, \quad (6)$$

где $\eta_d \in R^6$ – вектор желаемого положения и ориентации АНПА в АСК; $\Lambda \in R^{6 \times 6}$ – диагональная матрица положительных коэффициентов; $\delta \in R^{6 \times 6}$ – диагональная матрица положительных коэффициентов, которую целесообразно выбрать в виде $\delta = \Lambda^2/4$, позволяющем перемещать АНПА в заданное положение с заданной ориентацией без перегулирования.

Для синтеза алгоритма управления, приводящего систему (1) к виду (6), сведем систему (1) из двух дифференциальных уравнений первого порядка к одному уравнению второго порядка. В результате получим:

$$M(J^{-1}\ddot{\eta} - J^{-1}\dot{J}J^{-1}\dot{\eta}) + (C + D)J^{-1}\dot{\eta} + g = \tau. \quad (7)$$

Сигнал управления движением АНПА выберем в виде:

$$\tau = \tau_n + \tau_s, \quad (8)$$

где τ_n – часть сигнала управления, формируемая на основе известной части параметров АНПА; τ_s – сигнал управления, компенсирующий влияние неизвестной части параметров АНПА.

Сигнал τ_n формируется на основе модели (1) с номинальными параметрами и описания желаемой динамики АНПА (6). Для этого из уравнений (6) и (7) выражаются старшие производные и приравниваются между собой:

$$\Lambda \dot{e}_\eta + \delta e_\eta = JM_n^{-1}\tau_n + \dot{J}J^{-1}\dot{\eta} - JM_n^{-1}(C_n + D_n)J^{-1}\dot{\eta} - JM_n^{-1}g, \quad (9)$$

где $e_\eta = \eta_d - \eta$, $\dot{e}_\eta = \dot{\eta}_d - \dot{\eta}$.

Выражая из (9) τ_n и учитывая, что $v = J^{-1}\dot{\eta}$, получим:

$$\tau_n = M_n J^{-1}(\Lambda \dot{e}_\eta + \delta e_\eta) + (C_n + D_n)v + g - M_n J^{-1}\dot{J}v \quad (10)$$

Сигнал управления (10) обеспечивает АНПА динамические свойства (6) в случае, когда его параметры равны номинальным значениям. Для компенсации отклонения реальных параметров от номинальных будет использоваться дополнительный сигнал управления τ_s , формируемый в следующем виде:

$$\tau_s = K_s \text{sign}(s), \quad s = \Lambda \dot{e}_\eta + \delta e_\eta. \quad (11)$$

где K_s – диагональная матрица положительных коэффициентов.

Множитель J^{-1} используется для того, чтобы перейти от АСК, в которой формируются ошибки по положению, в ССК, в которой формируются тяги и моменты движительного комплекса.

Для оценки выбора коэффициентов K_s воспользуемся методом функции Ляпунова. Выберем функцию Ляпунова в виде $V = s^T M J^{-1} \Lambda^{-1} s$. Производная этой функции с учетом выражений (7)-(10) равна:

$$\dot{V} = s^T (M J^{-1}(\ddot{\eta}_d + \Delta \dot{e}_\eta) + (M_\Delta J^{-1}\dot{J} + C_\Delta + D_\Delta)v - \tau_s), \quad (12)$$

где $\Delta = \Lambda^{-1}\delta$.

Для того, чтобы обеспечить отрицательность выражения (12) сигнал τ_s , с учетом того, что его знак равен знаку s (см. (11)) должен удовлетворять условиям:

$$K_s > |M J^{-1}(\ddot{\eta}_d + \Delta \dot{e}_\eta) + (M_\Delta J^{-1}\dot{J} + C_\Delta + D_\Delta)v|. \quad (13)$$

Из (13) видно, что величины коэффициентов матрицы K_s зависят не только от величин неопределенной части параметров, но и от предполагаемых режимов движения АНПА (скоростей и ускорений по различным степеням свободы). Поэтому указанные коэффициенты можно выбрать исходя из максимальных оценок параметров АНПА и текущих величин программных сигналов и вектора состояния АНПА:

$$K_s > |\bar{M} J^{-1}(\ddot{\eta}_d + \Delta \dot{e}_\eta) + (\bar{M}_\Delta J^{-1}\dot{J} + \bar{C}_\Delta + \bar{D}_\Delta)v|,$$

где $\bar{M}, \bar{M}_\Delta$ – оценка максимальной величины матрицы инерции и неопределенной части параметров; $\bar{C}_\Delta, \bar{D}_\Delta$ – оценка максимальной величины сил взаимовлияния и гидродинамических сил, обусловленных неопределенной частью параметров АНПА.

Следует отметить, что сигнал управления τ_s также будет компенсировать неопределенность параметров движительного комплекса, так как если силы и моменты, которые он формирует, будут отличаться от тех, которые вырабатывает сигнал управления, то и динамика АНПА будет отличаться от желаемой динамики, описываемой уравнением (6).

Согласно формуле (11), сигнал компенсации неопределенности параметров АНПА и внешних воздействий имеет вид релейного сигнала. Однако в процессе работы наличие такого сигнала может привести к появлению переключений большой амплитуды и частым реверсам движительного комплекса (chattering), что является нежелательным из-за негативного влияния на исполнительные элементы АНПА. Для минимизации этого явления контур компенсации предпочтительно реализовывать с использованием функций «мягкого реле», например, усилителя с ограничением, имеющего следующий вид:

$$u_{out} = \begin{cases} k_r u_{in}, & \text{если } |u_{in}| < 1/k_r \\ \text{sign}(u_{in}), & \text{если } |u_{in}| \geq 1/k_r \end{cases} \quad (14)$$

где k_r – положительный коэффициент.

Чем больше коэффициент k_r , тем ближе будет функция (14) к релейной и тем вероятнее будет возникновение колебаний. При этом небольшие величины этого коэффициента приведут к недостаточности компенсирующих воздействий, что может снизить точность работы системы.

Далее будут рассмотрены особенности динамики АНПА, которые влияют на формирование управляющих воздействий при траекторном движении, а также будет предложен метод формирования программной скорости, обеспечивающий точную работу предложенной системы управления.

Алгоритм настройки программной скорости движения АНПА

Далее будем рассматривать движение АНПА в горизонтальной плоскости, что является основным режимом движения при выполнении миссии. Из уравнений (1)-(3) получим уравнения движения АНПА в горизонтальной плоскости в предположении $v_z = 0$, $\omega_x = 0$, $\omega_y = 0$, а матрицу присоединенных масс будем считать диагональной, что справедливо для большинства АНПА. В результате получим уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{v}_y &= -\frac{m-\lambda_{11}}{m-\lambda_{22}}v_x\omega_z - \frac{d_{1y}}{m-\lambda_{22}}v_y, \\ (I_{zz} - \lambda_{66})\dot{\omega}_z &= -(\lambda_{11} - \lambda_{22})v_xv_y - d_{1z}\omega_z - \\ &\quad d_{2z}\omega_z|\omega_z| + M_z. \end{aligned} \quad (15)$$

Следует отметить, что в процессе выполнения миссии система управления будет обеспечивать движение АНПА, так, чтобы он двигался вдоль траектории с заданной скоростью, ориентируя свою продольную ось вдоль касательной к траектории. В этом случае величина программной скорости v^* движения АНПА будет задавать величину линейной скорости v_x .

Выражение для скорости v_x можно получить из выражения (5), в предположении, что АНПА движется по заданной траектории ориентируясь вдоль этой траектории:

$$\dot{v}_x = \Lambda(v^* - v_x) + \delta\epsilon_x, \quad (16)$$

где ϵ_x – расстояние от АНПА до целевой точки, движущейся по траектории.

Как видно из представленных уравнений при движении по криволинейной траектории АНПА одновременно совершает поступательное движение по оси x ССК и вращение по оси z ССК. Это приводит к появлению силы Кориолиса в линейной степени свободы y ССК и появлению ускорения и соответственно скорости v_y . Появление ненулевого значения скорости v_y приводит к появлению момента взаимовлияния во вращательной степени свободы относительно оси z ССК. Указанный момент имеет тот же знак, что и угловая скорость ω_z , так как обычно выполняется условие $|\lambda_{11}| < |\lambda_{22}|$, которое обусловлено торпедообразной формой АНПА. То есть возникает момент взаимовлияния, который должен быть компенсирован противомоментом, создаваемым движительным комплексом АНПА. Если на создание этого противомомента движительному комплексу не хватает ресурсов, то АНПА продолжит поворачиваться в прежнюю сторону независимо от сигнала управления и сойдет с траектории. Поэтому можно сформулировать следующее условие, обеспечивающее точную работу системы траекторного управления при движении АНПА по сложным криволинейным траекториям:

$$|M_{cz}| = |-(\lambda_{11} - \lambda_{22})v_xv_y| < \bar{M}_{dz}, \quad (17)$$

где $\bar{M}_{dz}$ – максимальное значение момента по оси z ССК, которое может сформировать движительный комплекс АНПА в текущем режиме движения.

В работе указанное условие предлагается выполнить, формируя соответствующее значение программной скорости движения в процессе функционирования АНПА. Сначала получим модель,

описывающую зависимость величины M_{cz} от величины программной скорости движения v^* . Для этого продифференцируем выражение, описывающее величину M_{cz} :

$$\dot{M}_{cz} = -(\lambda_{11} - \lambda_{22})\dot{v}_xv_y - (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_x\dot{v}_y. \quad (18)$$

С учетом выражений (16) и (17) уравнение (18) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{cz} &= -k_1(\Lambda_{11}(v^* - v_x) + \delta_{11}\epsilon_x)v_y - \\ &\quad - k_1v_x(-k_2v_x\omega_z - k_3v_y) = \\ &= -k_1\Lambda_{11}v^* + k_1\Lambda_{11}v_xv_y - k_1\delta_{11}\epsilon_xv_y + k_1k_3v_xv_y + \\ &\quad + k_1k_2v_x\omega_z = \\ &= -k_1\Lambda_{11}v^*v_y - k_1\delta_{11}\epsilon_xv_y + k_1k_2v_x^2\omega_z - (\Lambda_{11} + k_2)M_{cz}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $k_1 = (\lambda_{11} - \lambda_{22})$, $k_2 = \frac{m-\lambda_{11}}{m-\lambda_{22}}$, $k_3 = \frac{d_{1y}}{m-\lambda_{22}}$.

Анализ уравнения (19) показывает, что динамика изменения момента M_{cz} описывается дифференциальным уравнением первого порядка. При этом указанное уравнение является устойчивым, так как корень его характеристического уравнения имеет вид:

$$\lambda_{Mcz} = -(\Lambda_{11} + k_2) < 0.$$

Это означает, что величина момента M_{cz} будет стремиться к некоторому установившемуся значению при постоянных величинах переменных v^* , v_x , v_y , ω_z , ϵ_x . Величину этого установившегося значения можно использовать для оценки величины программной скорости. Для установившегося значения M_{cz} справедливо равенство $\dot{M}_{cz} = 0$. Из (18) несложно получить:

$$v^* = \frac{k_1\delta_{11}v_y\epsilon_x - k_1v_x^2\omega_z - (\Lambda_{11} + k_2)\bar{M}_{dz}}{k_3\Lambda_{11}v_y}. \quad (20)$$

В выражении (20) все слагаемые имеют знак, соответствующий знаку v_y , поэтому указанное выражение можно переписать в виде:

$$v^* = \frac{k_1\delta_{11}|v_y|\epsilon_x + k_1v_x^2|\omega_z| + (\Lambda_{11} + k_2)|\bar{M}_{dz}|}{k_3\Lambda_{11}|v_y|}. \quad (21)$$

В выражении (21) переменная $\bar{M}_{dz}$ является максимально возможным моментом, который может быть сформирован движительным комплексом АНПА при отработке заданной программной скорости АНПА. Указанное значение вычисляется на основе кинематической модели движительного комплекса АНПА.

Для получения оценки этой величины будем использовать модель (5). Из этой модели можем записать выражения для силы τ_x и момента M_{dz} :

$$\begin{aligned} \tau_{dx} &= T_1\cos\alpha + T_2\cos\alpha + T_3\cos\alpha + T_4\cos\alpha, \\ M_{dz} &= (-T_1\sin\alpha + T_2\sin\alpha)l_1 + T_5L. \end{aligned} \quad (22)$$

Из (21) видно, что одни и те же движители используются для создания силы тяги по оси x ССК и для создания момента по оси z ССК. Для вычисления величины $\bar{M}_{dz}$ будем предполагать, что движители T_3 и T_4 будут формировать максимально возможные значения упоров $\bar{T}$, для того, чтобы основную тягу вдоль оси x ССК создавали именно они. При этом один из движителей T_1 и T_2 , в зависимости от нужного знака момента, также будет формировать максимально возможное значение упора, для того

чтобы обеспечить максимальную разность упоров между этими движителями.

Оценка желаемой силы тяги по оси z ССК осуществляется по выражению:

$$\tau_x = d_{1x}v^* + d_{2x}v^{*2}. \quad (23)$$

Из выражений (22) и (23) записать выражение, описывающее максимально возможный момент по оси z :

$$|\bar{M}_{dz}| = 4\bar{T}l_1 \sin \alpha + \bar{T}_5 L - (d_1 v^* + d_2 v^{*2}) l_1 \tan \alpha. \quad (24)$$

Подставив выражение (24) в (20), получим уравнение:

$$(\Lambda_{11} + k_2)v^{*2} + (k_3\Lambda_{11}|\omega_z| + (\Lambda_{11} + k_2)d_{1x}l_1)v^* - 4\bar{T}l_1 \sin \alpha - \bar{T}_5 L - k_1\delta_{11}|v_y|\varepsilon_x - k_1v_x^2|\omega_z| = 0. \quad (25)$$

Несложно показать, что уравнение (25) имеет два действительных корня: отрицательный и положительный. В качестве величины программной скорости необходимо выбирать положительный корень, который будет рассчитываться по следующему выражению:

$$v^* = \frac{K_b + \sqrt{K_b^2 + 4K_a K_c}}{2K_a}, \quad K_a = \Lambda_{11} + k_2, \quad (26)$$

$$K_b = k_3\Lambda_{11}|\omega_z| + (\Lambda_{11} + k_2)d_{1x}l_1,$$

$$K_c = 4\bar{T}l_1 \sin \alpha - \bar{T}_5 L - k_1\delta_{11}|v_y|\varepsilon_x - k_1v_x^2|\omega_z|.$$

Таким образом, выражение (26) позволяет автоматически формировать такую величину программной скорости, которая может быть отработана движительным комплексом АНПА. При этом указанная величина программной скорости может быть рассчитана в реальном масштабе времени на основе аналитических формул без использования итерационных алгоритмов.

Результаты математического моделирования

Для исследования предложенного метода синтеза системы траекторного управления движением АНПА было проведено математическое моделирование в среде MATLAB/Simulink.

В процессе исследования моделировался АНПА, имеющий следующие параметры:

$$m = 950 \text{ kg}, I_{xx} = 34 \text{ kgm}^2, I_{yy} = 3800 \text{ kgm}^2, I_{zz} = 3800 \text{ kgm}^2,$$

$$\lambda = \text{diag}([-70 \text{ kg}, -850 \text{ kg}, -850 \text{ kg}, 0, -1650 \text{ kgm}^2, -1650 \text{ kgm}^2]),$$

$$d_1 = \text{diag}([30, 100, 100, 15, 200, 200]),$$

$$d_2 = \text{diag}([30, 950, 950, 150, 2000, 2000])$$

Параметры системы управления (10)-(11) имели следующие значения: $\Lambda = \text{diag}([0.4, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]),$ $K_s = \text{diag}([200, 500, 500, 0, 400, 200]).$

Моделировалось движение АНПА по гладкой траектории, заданной двумя сплайнами третьего порядка, при этом программная скорость движения задавалась 2 м/с.

Результаты моделирования предложенной системы траекторного управления показаны на рис.3а-г. На рисунке 3а показана заданная (синяя кривая) и реальная (красная кривая) траектории движения АНПА, на рис. 3б показан процесс изменения программной скорости движения, на рис.3в показан процесс изменения управляющего

момента по оси z (красная кривая) и тяги по оси x (синяя кривая) ССК, а на рис 3г показано изменение расстояние АНПА от заданной траектории.

Как видно из представленных рисунков при движении АНПА по участку траектории с большой кривизной резко возрастает величина момента M_{cz} , что приводит к уменьшению программной скорости движения (см.рис.3б).

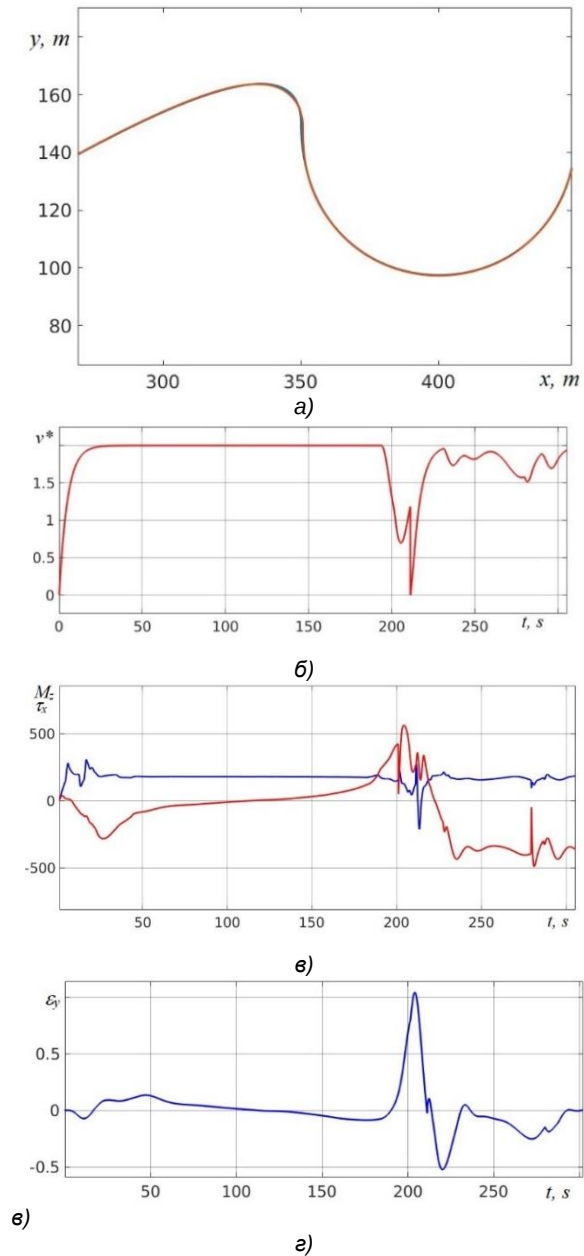


Рис.3. Результаты моделирования предложенной системы траекторного управления

В результате формируемые движительным комплексом управляющие сигналы не входят в насыщение (см. рис.3в) и АНПА достаточно точно походит этот участок (отклонение от траектории не превышает 1м рис.3г).

На рис.4а-г показаны результаты моделирования системы траекторного управления, где в контуре настройки программной скорости движения используется ПИ-регулятор, аналогично работе [8].

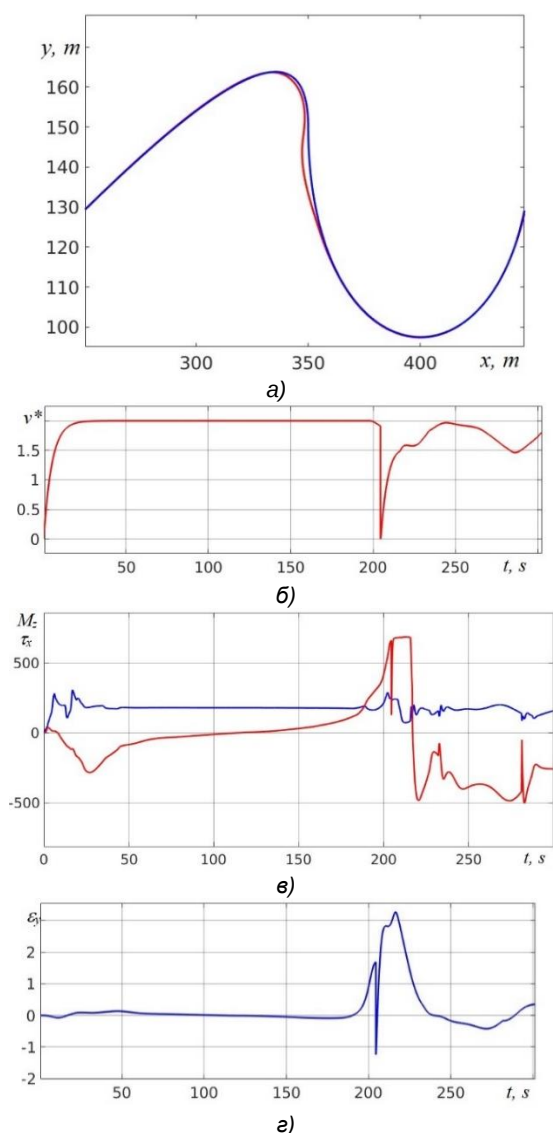


Рис. 4. Моделирование системы траекторного управления с контуром настройки программной скорости движения на основе ПИ-регулятора

Как видно из представленных результатов использование дополнительного контура автоматической настройки программной скорости на основе типовых регуляторов не обеспечивает точного движения АНПА. На участках траектории с большой кривизной снижения программной скорости начинается позже, чем в предыдущем случае, когда движители уже входят (см. рис. 4в) и точность движения АНПА начинает падать. Это приводит к сходу АНПА с траектории, в результате отклонение АНПА от нее превышает 3м (см. рис. 4г).

Таким образом, результаты моделирования подтвердили высокую эффективность предложенной системы траекторного управления АНПА.

Заключение

В работе предложен метод синтеза системы траекторного управления движением АНПА, учитывающей неопределенность параметров АНПА, а также ограничения его движительного комплекса. Для решения поставленной задачи синтезируется система управления пространственным положением, обеспечивающая учет влияния перекрестных связей между степенями свободы АНПА и неопределенностью его параметров. При этом для обеспечения точного движения АНПА дополнительно синтезируется контур коррекции программной скорости движения, для учета возможного входа движителей АНПА в насыщения и схода его с траектории. Особенностью предложенного метода коррекции программной скорости является учет особенностей динамики АНПА и кинематики его движительного комплекса, что позволяет оперативно подстраивать программную скорость движения. Таким образом, результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного подхода.

Литература

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles// Intelligent Service Robotics, 2011, vol.4, pp. 221-231.
2. Lakhwani D. A., Adhyaru D. M. Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle// Proceedings of the 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE), Ahmedabad, 2013, pp. 1-6.
3. Liu X., Zhang M., Rogers E. Trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles based on fuzzy re-planning of a local desired trajectory// IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, vol. 68, no.12, pp. 11657-11667.
4. Filaretov V., Yukhimets D. Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle// International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM), 2012, vol. 3, no. 3, pp. 133-141.
5. Koofigar H. R. Adaptive control of underwater vehicles with unknown model parameters and unstructured uncertainties// Proceedings of the 2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE), Akita, 2012, pp. 192-196.
6. Xu J., Wang M., Qiao L. Dynamical sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicles// Ocean Engineering, 2015, vol. 105, pp. 54-63.
7. Ming Lei Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation// Ocean Engineering, 2020, vol.197, paper 106824.
8. V.F. Filaretov, D.A. Yukhimets, A method for forming program control for velocity regime of motion of underwater vehicles along arbitrary spatial trajectories with given dynamic accuracy// J. Comput. Syst. Sci. Int., 2011, vol.50, no. 4, pp. 673-682.

9. Yukhimets D., Karmanova S. The Method of Conjugation of Rectilinear Trajectories of AUV with Regard to Its Dynamic Properties // Proceeding of the 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia, 2022, pp. 852-857. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896366
10. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, Jonh Willey & Sons, Chichester, UK, 2011.
11. Gubankov A., Gornostaev I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group// Proceedings of the 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 574-579. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10516162.

References

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles// Intellegent Service Robotics, 2011, vol.4, pp. 221-231.
2. Lakhwani D. A., Adhyaru D. M. Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle// Proceedings of the 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE), Ahmedabad, 2013, pp. 1-6.
3. Liu X., Zhang M., Rogers E. Trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles based on fuzzy re-planning of a local desired trajectory// IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, vol. 68, no.12, pp. 11657-11667.
4. Filaretov V., Yukhimets D. Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle// International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM), 2012, vol. 3, no. 3, pp. 133-141.
5. Koofigar H. R. Adaptive control of underwater vehicles with unknown model parameters and unstructured uncertainties// Proceedings of the 2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE), Akita, 2012, pp. 192-196.
6. Xu J., Wang M., Qiao L. Dynamical sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicles// Ocean Engineering, 2015, vol. 105, pp. 54–63.
7. Ming Lei Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation// Ocean Engineering, 2020, vol.197, paper 106824.
8. V.F. Filaretov, D.A. Yukhimets, A method for forming program control for velocity regime of motion of underwater vehicles along arbitrary spatial trajectories with given dynamic accuracy// J. Comput. Syst. Sci. Int., 2011, vol.50, no. 4, pp. 673–682.
9. Yukhimets D., Karmanova S. The Method of Conjugation of Rectilinear Trajectories of AUV with Regard to Its Dynamic Properties // Proceeding of the 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia, 2022, pp. 852-857. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896366
10. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, Jonh Willey & Sons, Chichester, UK, 2011.
11. Gubankov A., Gornostaev I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group// Proceedings of the 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 574-579. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10516162.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юхимец Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН, 690041, г.Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Dmitry A. Yukhimets, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading researcher IACP FEB RAS, 5, Radio str., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.10.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.10.2024

Научная статья

УДК 621.391

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.081>

Нейросетевое распознавание сигнальных созвездий M-QAM типа в магнитно-индукционном подводном канале связи

Родионов А.Ю.¹ rodionov.ayur@dvfu.ru, Власов А.А.¹ vlasov_aa@dvfu.ru, Кузин Д.А.¹ kuzin_da@dvfu.ru, Бобров В.В.¹ bobrov_vv@dvfu.ru, Кирьянов А.В.¹ kiryanov.av@dvfu.ru, Гребенюк И.В.² igor.grebenyuk@mail.ru
¹Дальневосточный федеральный университет, ²Владивостокский государственный университет

Аннотация. В статье представлен анализ возможностей применения нейросетевого распознавания сигнальных созвездий M-QAM магнитно-индуктивной связи для межсредных коммуникационных систем, включая подводные робототехнические комплексы. Рассмотрены особенности распространения магнитного поля в морской воде, включая его устойчивость к внешним воздействиям и помехам. Проведен эксперимент с использованием малогабаритных ферритовых антенн низкочастотного диапазона и систем связи на основе многочастотных сигналов OFDM с различными видами цифровой модуляции M-QAM. Отмечены преимущества магнитно-индуктивной связи в условиях ограничений традиционных радиочастотных и гидроакустических технологий, таких как скрытность сигнала, стабильность канала и отмечается возможность передачи данных в разнородных средах (вода–воздух). Рассмотрены особенности ферритовых антенн, усилительных каскадов для них и пути повышения эффективности подобных комплексов. Обучена сверточная нейронная сеть, способная классифицировать три типа цифровой модуляции по их сигнальным созвездиям при общей точности распознавания 97.71%, что позволяет оперативно подстраиваться под помеховые условия в магнитно-индуктивном канале связи.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, магнитная индукция, подводная связь, OFDM, M-QAM, ферритовые антенны, ближнепольная магнитная связь, проницаемость, каналы подводной связи

Финансирование: Данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023-0008.

Для цитирования: Родионов А.Ю., Власов А.А., Кузин Д.А., Бобров В.В., Кирьянов А.А., Гребенюк И.В. Нейросетевое распознавание сигнальных созвездий M-QAM типа в магнитно-индукционном подводном канале связи. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 69—76. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.081

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.081>

Neural Network Recognition of M-QAM Signal Constellations in Magnetic Inductive Underwater Communication Channel

Alexander Yu. Rodionov¹ rodionov.ayur@dvfu.ru, Aleksandr A. Vlasov¹ vlasov_aa@dvfu.ru, Denis A. Kuzin¹ kuzin_da@dvfu.ru, Vladislav V. Bobrov¹ bobrov_vv@dvfu.ru, Aleksey.V. Kiryanov¹ kiryanov.av@dvfu.ru Igor V. Grebenyuk² igor.grebenyuk@mail.ru
¹Far Eastern Federal University, ²Vladivostok State University

Abstract. The article presents an analysis of the potential applications of neural network-based recognition of M-QAM signal constellations in magnetic inductive communication for inter-medium communication systems, including underwater robotic complexes. The features of magnetic field propagation in seawater are examined, highlighting its resistance to external influences and interference. An experiment was conducted using compact low-frequency ferrite antennas and communication systems based on multi-frequency OFDM signals with various types of M-QAM digital modulation. The advantages of magnetic inductive communication under the constraints of traditional radio frequency and hydroacoustic technologies are noted, such as signal stealth, channel stability, and the ability to transmit data in heterogeneous environments (water-air). The design features of ferrite antennas, amplifier stages for them, and methods to improve the efficiency of such systems are considered. A convolutional neural network was trained to classify three types of digital modulation based on their signal constellations, achieving an overall recognition accuracy of 97.71%, enabling rapid adaptation to interference conditions in the magnetic inductive communication channel.

Keywords: convolutional neural network, magnetic induction, underwater communication, OFDM, M-QAM, ferrite antennas, near-field magnetic communication, permeability, underwater communication channels

Financial Support: This work was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FZNS-2023-0008.

For citation: Alexander Yu. Rodionov., Aleksandr A. Vlasov, Denis A. Kuzin., Vladislav V. Bobrov, Aleksey.V. Kiryanov, Igor V. Grebenyuk. Neural Network Recognition of M-QAM Signal Constellations in Magnetic Inductive Underwater Communication Channel. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 69—76. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.081

Введение

Большая часть практических работ по организации подводной коммуникации между

автономными необитаемыми аппаратами, главным образом, реализуется с помощью гидроакустических систем. Применение подводной связи на основе магнитной индукции (МИ), в отличие от

распространенных способов (электромагнитные (ЭМ) или акустические волны), обладает перспективными функциями, такими как:

- незначительная задержка распространения сигнала;
- стабильное поведение канала, достаточно широкий частотный диапазон с приемлемой шириной рабочей полосы, низкие показатели шума в канале МИ-связи;
- скрытый характер транслируемого информационного потока, что затрудняет его детектирование или перехват;
- малогабаритные антенные системы.

Сюда же можно отнести незначительную задержку распространения сигнала для МИ-волн (при скорости $3.33 \cdot 10^7$ м/с в морской воде). Такая достаточно высокая скорость распространения МИ-волн упрощает проектирование и реализацию подводных сетевых протоколов.

Одним из очевидных преимуществ беспроводного МИ-канала связи является его предсказуемость и стабильность ввиду того, что реактивное сопротивление катушки гораздо меньше, чем у классического антенны-диполя. В сравнении с физическими свойствами каналов с акустической связью, многолучевое замирание не является проблемой для подводной связи на базе МИ, кроме того, благодаря высокой скорости распространения МИ-волны, сдвиги частот, вызванные эффектом Доплера, будут незначительны.

Широкий частотный диапазон с потенциалом высокой скорости передачи данных в МИ-каналах связи обусловлен тем, что передача и прием осуществляются с помощью пары магнитных катушек небольших размеров в качестве антенн. В отличие от широко распространенных антенных систем типа диполя, при использовании ЭМ-волн, в МИ-связи отсутствуют ограничения по минимальной частоте, на которой антенна может работать. Такое важное преимущество делает возможным использование антенны малых размеров с генерацией низкочастотных МИ-сигналов, которые, в свою очередь, позволяют небольшим подводным объектам вести связь на заданные расстояния. Кроме того, рабочие частоты МИ-катушки могут достигать мегагерцового диапазона с достижением достоверного и гарантированного качества передачи сигнала, что способствует получению скоростей передачи данных на порядки более высоких, чем в акустических системах связи [1].

В подводных робототехнических системах использование магнитно-индуктивной связи в ближней зоне на расстояниях до 5-10 м для передачи мультимедиа, графических потоков информации с камеры подводного устройства в режиме реального времени для управления и стыковочных операций является востребованной и актуальной задачей.

К целям и задачам исследования можно отнести использование МИ-связи в составе подводного аппарата, а именно для информационного обмена в системе аппарат-донная станция при стыковочных операциях. Типовые требования здесь к МИ-системе информационного обмена могут предъявляться следующие:

- полудуплексная передача данных между подводными объектами на скоростях не менее 20 кбит/с и дистанциях до 5 метров;

- допустимая относительная скорость перемещения подводного устройства не более 2 м/с;
- электромагнитная совместимость МИ-системы с электрооборудованием подводных аппаратов.

Для обеспечения указанных скоростей информационного обмена необходимо использовать высокоэффективные алгоритмы сигнальной обработки, к которым можно отнести применение многочастотных сигналов с ортогональным частотным уплотнением (OFDM). Высокая спектральная эффективность в подобных методах цифровой модуляции достигается использованием многопозиционной квадратурной модуляции поднесущих частот (M-QAM). К примеру, комбинация подобных методов позволяет получать высокие значения пропускной способности в таких радиосистемах как WiFi, WiMAX, 4G-LTE, DVB-T.

Новой тенденцией в обеспечении связи с подводными робототехническими системами является применение нейросетевых методов улучшения помехоустойчивости цифровых систем обмена информацией. В данных условиях для магнитно-индуктивного канала с высокой пропускной способностью важным аспектом является оперативная адаптивная подстройка многочастотного OFDM M-QAM сигнала к изменяющейся помеховой обстановке, ввиду перемещения аппарата, возникновения магнитных наводок на различных частотах, и как следствие - к динамичному изменению отношения сигнал/шум на отдельных частотных компонентах OFDM сигнала. Применение нейросетевых методов оценки в цифровой сигнальной обработке позволит значительно улучшить адаптацию приемной системы и снизит возможные ошибки при передаче информации.

1. Существующие системы связи на основе магнитной индукции и методы сигнальной обработки

Благодаря вышеупомянутым преимуществам: предсказуемости поведения канала связи, высокой скорости распространения сигнала, достаточной степени скрытности ведения связи и предполагаемой низкой стоимости оборудования, МИ-коммуникации имеют потенциал для применения в системах морского назначения для решения широкого спектра задач.

Эффективность ферритовой антенны зависит от свойств сердечника (материала и его конструктивных размеров) и физическими характеристиками магнитоприемника. Она напрямую зависит от частоты сигнала - увеличивается с частотой. Необходимо добавить, что КПД ферритовой антенны может увеличиваться почти вдвое от присутствия вблизи нее проводящей поверхности, в отличие от электрических антенн, где близкое расположение такой поверхности снижает эффективность антенны.

Направленные свойства ферритовой антенны определили широкое практическое распространение. Если рассматривать характеристики ферритовой антенны, следует отметить высокие резонансные свойства контура, где в качестве индуктивности входит вся ферритовая антенна. Это позволяет в сто и более раз увеличивать ЭДС антенны. Резонансные свойства антенны определены добротностью

магнитоприемника Q , которая зависит соответственно от соотношения между его реактивным и активным сопротивлениями и в первую очередь определены свойствами сердечника. Применение ферритов, сочетающих в себе высокие магнитные свойства с большим удельным сопротивлением, позволяет создавать широкий спектр антенных устройств.

Высокое удельное сопротивление обеспечивает достаточно высокую добротность, порядка 300...500 в зависимости от частотного диапазона. Марка феррита определяется назначением антенны и рабочим диапазоном частот. Общепринято, что для антенн длинноволнового диапазона целесообразно применять сердечник с магнитной проницаемостью 1000 или 2000, а для диапазона средних волн - 600 или 1000. В коротковолновых антеннах следует использовать сердечники с начальной магнитной проницаемостью 100...400, а в антеннах УКВ - 10...50 [2]. Обладая меньшим КПД, ферритовая антенна в ряде случаев может быть предпочтительнее электрической антенны, например, в случае излучения электромагнитного поля в проводящей среде или в непосредственной близости от нее. В случае погружения в морскую воду антенн обоих типов, плотности поля ферритовой антенны будет больше плотности поля электрической антенны на 11 дБ. Это объясняется интерференцией радиоволн, которая приводит к эффекту замирания радиосигнала непосредственно над поверхностью проводящей среды при передаче электромагнитной энергии электрической антенной. Поэтому дальность связи магнитной антенны больше при равных излучаемых мощностях.

Для большинства случаев при выборе типа излучателя предпочтение отдается всенаправленным антеннам. Поскольку диаграмма направленности ферритовых антенн имеет вид «восьмерки», возможно использование двух взаимно перпендикулярных антенн, при условии сдвига фаз питающих токов на 90 градусов.

Отличительной особенностью магнитно-индуктивной связи является быстрое затухание сигнала в зависимости от расстояния. Мощность сигнала ослабевает пропорционально шестой степени от расстояния, что резко ограничивает максимальную дальность работы системы связи. Для увеличения дальности распространения рабочего сигнала требуется повышение магнитного момента передающей катушки системы связи. Магнитный момент M , А·м², находится как $M = N \cdot I \cdot S$, где N – число витков катушки; I – ток в проводнике катушки, А; S – площадь витка катушки, м². Таким образом, при ограниченных размерах магнитной антенны, необходимо увеличивать ток в катушке и число ее витков. Однако реактивное сопротивление катушки увеличивается пропорционально квадрату числа витков, что предполагает соответствующее повышение напряжения на ней для поддержания заданной величины тока. Для увеличения напряжения на катушке может быть использовано явление последовательного резонанса, но это резко сужает полосу частот системы связи.

В работе [3] показано, что одним из оптимальных способов увеличения магнитного момента передающей антенны при сохранении широкой полосы частот является уменьшение числа витков

катушки с одновременным увеличением силы тока. Проектирование малогабаритных и высокоэффективных усилителей мощности, работающих на низкоомную реактивную нагрузку и развивающих токи в десятки и сотни ампер - важная задача, решение которой необходимо для создания системы связи с параметрами, удовлетворяющими актуальным требованиям.

Резонансный вариант построения передатчика является наиболее простым в реализации и позволяет за счет явления последовательного резонанса повысить напряжение на многовитковой катушке передающей магнитной антенны. Добротность колебательной системы ограничивается эквивалентным сопротивлением потерь R_n . Достоинствами варианта можно считать простую реализацию усилителя мощности, формирующего большие токи в активной низкоомной нагрузке при низких напряжениях питания; повышение магнитного момента за счет увеличения числа витков катушки; фильтрацию выходного сигнала передатчика, что особенно актуально при использовании нелинейных усилителей мощности [4]. Недостатками резонансного варианта являются узкая полоса пропускания, обратно пропорциональная добротности колебательной системы и высокие напряжения на реактивных элементах, достигающие единиц и десятков киловольт.

Ввиду поиска компромиссов с использованием резонансных усилителей и узкой резонансной полосы частот существенно важным является выбор высокоэффективных методов цифровой модуляции с точки зрения высокой пропускной способности. Здесь широко применяются модифицированные методы с ортогональным частотным уплотнением сигналов – OFDM. Применение таких методов цифровой модуляции как QPSK (4-QAM), 16-QAM, 64-QAM для модуляции поднесущих OFDM в существующих радиосистемах позволяют добиваться спектральной эффективности 2, 4 и 6 бит/с/Гц соответственно [5, 6].

Современным трендом в цифровой сигнальной обработке звука, изображений и иной информации сейчас является применение нейросетевых технологий, не обходит этот тренд и методы классификации цифровых модуляций. В статье рассматривается проблема определения спектра в системе OFDM на основе методов машинного обучения [7]. Для адаптирования к изменениям отношения сигнал/шум (SNR) сначала формулируется задача распознавания – многоклассовой классификации, которая связана с SNR. Затем обучается Наивный байесовский классификатор (Naive Bayes classifier) и предлагается метод прогнозирования с помощью сокращения классов для уменьшения времени, затрачиваемого на определение спектра.

Среди многих методов измерения OFDM широко применяется детектирование энергии (energy detection) из-за своей простоты и эффективности. Однако он чувствителен к неопределенности шума и при низких значениях SNR существует граница отношения сигнал/шум. Для преодоления феномена границы сигнал/шум применяется корреляция, индуцированная циклическим префиксом [8]. Однако такие методы, как правило, генерируют плохую

корреляцию (и не могут обеспечить высокую производительность обнаружения [9]. С недавних пор применяются подходы, основанные на машинном обучении, чтобы обеспечить новый подход к общему анализу спектра, в том числе для конфигурации OFDM [10]. В работах предлагаются алгоритмы обучения с учителем для неизменной радиочастотной среды с фиксированным отношением сигнал-шум, где в качестве признаков используются собственные значения ковариационной матрицы принимаемого сигнала. Так как основным требованием к системам когнитивного радио является способность точно и быстро определить первичный сигнал, предлагается применение искусственной нейронной сети для решения задачи бинарной классификации. В качестве признаков используется энергия от обнаружения энергии и статистика теста Чжана из LRS-G2 (Likelihood Ratio Test statistic).

Подводные акустические каналы имеют большие задержки распространения и неравномерные доплеровские сдвиги, что затрудняет разработку схемы связи. Несмотря на то, что зачастую два приемно-передатчика фиксированы, подводные акустические каналы сильно различаются во времени, поскольку профиль скорости в канале меняется днем и ночью. В этой статье предлагается метод выбора между модуляциями CDMA и OFDM с использованием сверточной нейронной сети (CNN) для оценки параметров канала и модель случайного леса (RF) для выбора модуляции на основе результатов CNN. Моделирование показывает, что оценка параметров предлагаемого метода лучше, чем у обычного метода наименьших квадратов (LS), а метод случайного леса демонстрирует лучшие результаты обнаружения, чем традиционный DNN (Deep Neural Network). [11]

В работе [12] описывается подводная акустическая система связи с мультиплексированием с ортогональным частотным разделением (OFDM) на основе глубокого обучения. В отличие от традиционного приемника для системы подводной гидроакустической связи с OFDM, который выполняет явную оценку канала и выравнивание для обнаружения передаваемых символов, приемник на основе глубокого обучения, интерпретируемый как DNN, может восстанавливать переданные символы непосредственно после достаточного обучения. Оценка передаваемых символов в приемнике на основе DNN достигается в два этапа: этап обучения, когда для обучения DNN используются помеченные данные, такие как известные переданные данные и известный принимаемый сигнал в неизвестном канале, и этап тестирования, где приемник DNN восстанавливает переданные символы по полученному сигналу. Чтобы продемонстрировать производительность гидроакустической связи с многочастотными сигналами OFDM на основе глубокого обучения, генерируется большое количество помеченных и немаркированных данных, используя модель акустического распространения с измеренным профилем скорости звука для обучения и тестирования приемника DNN. Производительность связи в данном случае оценивается по различным параметрам, таким как длина циклического префикса и количество пилот-символов. Результаты

моделирования показывают, что приемник на основе глубокого обучения обеспечивает постоянное улучшение производительности по сравнению с традиционным приемником OFDM.

Кроме возможности оценки канала OFDM с помощью методов машинного обучения, исследователи в своих работах описывают возможность обнаружения символов OFDM. Предлагается использование модели многослойного персептрона для решения этой задачи [13]. С точки зрения этой модели проблему демодуляции созвездия можно представить как оценку вероятности выходных символов. В качестве функции активации используется ReLU, а в качестве функции потерь – перекрестная энтропия. Предлагается использовать классический метод наименьших квадратов в сочетании с обнаружением символов методами машинного обучения.

2. Выбор параметров для МИ системы подводной связи на базе OFDM M-QAM сигналов

Основным принципом OFDM является разделение цифрового потока данных на N -ое число потоков, передаваемых на отдельных ортогональных частотах. Суммарно все N частот образуют символ OFDM, равный T . По своей структуре сигнал OFDM является комплексным:

$$g(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{C}_i \cdot e^{-2\pi i j \Delta f t} \quad (1)$$

где $\Delta f = 1/T$ – частотное расстояние между соседними несущими, $\dot{C}_i$ – i -ый информационный символ M-QAM, длительностью T , N – количество ортогональных несущих частот сигнала OFDM. Эффективность использования спектра OFDM определяется в данном случае как

$$c_f = \log_2 M \quad (2)$$

где M – количество позиций в манипуляционном созвездии M-QAM на каждой несущей частоте сложного OFDM сигнала.

Спектральная эффективность c_f для МИ-систем связи может определяться выражением (2) ввиду того, что защитные временные интервалы между символами OFDM могут быть приняты 0, из-за малых значений эхо-сигналов в МИ-канале связи на малых дистанциях.

Существует мало природных источников шумового магнитного поля в подводной среде и основным источником помех является тепловой шум приемных цепей и совокупность магнитных излучений подводных аппаратов, которые могут нивелироваться временным отключением приборов во время передачи пакетов МИ-связи. Согласно известному уравнению, мощность теплового шума на входе приемника может быть рассчитана как $P_{\text{ш}} \approx \Delta F \cdot k_0 \cdot T_0$, где ΔF – полоса пропускания МИ-системы, T_0 – температура в Кельвинах, а $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. К примеру, мощность теплового шума будет равной -110 дБм/МГц при $T_0 = 293$ К.

Для дальнейших исследований и тестирования выбирались магнитные антенны разных типов – приемная выполнена на ферромагнитном сердечнике диаметром 10 мм и длиной 200 мм с количеством витков равным 100, передающая –

кольцо диаметром 320 мм с количеством витков равным 250. Частотная характеристика тракта приемо-передачи имеет при этом неравномерность, достигающую 10 дБ. Путем инверсии частотной характеристики можно выполнить предварительную коррекцию для OFDM сигнала для выравнивания спектра на приемном устройстве. Полоса частот OFDM сигнала выбрана $\Delta F = 32$ кГц, при этом символы формируются с длительностью символа $T = 4$ мс, $\Delta f = 250$ Гц при $N = 128$. Скорость передачи в МИ канале можно оценить выражением:

$$V_b = \Delta F \cdot \log_2 M \quad (3)$$

Структура формирования и передачи сигнала представляет собой цифровую линию обработки, где информационный сигнал поступает на модулятор OFDM и согласно выражению (1), действительная часть комплексного сигнала $g(t)$ транслируется с передающего модуля с частотой дискретизации 192 кГц на усилитель мощности. Применялись три типа манипуляции поднесущих частот для формирования информационных символов $\hat{c}_i$ в выражении (1) QPSK (квадратурная фазовая манипуляция с $V_b = 64$ кбит/с), 16-QAM (16-позиционная квадратурная манипуляция с $V_b = 128$ кбит/с), 64-QAM (64-позиционная квадратурная манипуляция с $V_b = 192$ кбит/с) в целях повышения спектральной эффективности используемого многочастотного метода уплотнения OFDM.

3. Численные и экспериментальные морские исследования с классификацией созвездий M-QAM

Для МИ канала с высокой пропускной способностью V_b до 192 кбит/с важным является адаптивная подстройка OFDM M-QAM сигнала на каждой поднесущей частоте к изменяющейся помеховой обстановке. В данном случае нейросетевые методы оценки в цифровой обработке сигналов (ЦОС) позволят значительно улучшить адаптацию приемной системы и снизит возможные ошибки при передаче информации.

В ряде проведенных численных и морских экспериментов были получены записи сигналов OFDM M-QAM с различным отношением сигнал/шум на дальностях от 5 до 10 метров (Рис. 1).

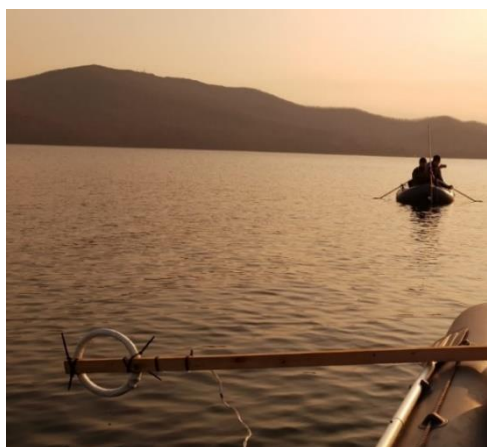


Рис. 1 Передающая магнитная антенна на одной лодке и приемная на другой на удалении 10 м в морской акватории

В ходе тестирования в морской акватории на двух лодках с передающей и приемной антенной МИ-система обеспечивала передачу данных под водой на глубине 2 м на коротких дистанциях (до 5 м) со скоростями до 192 кбит/с в режиме OFDM 64-QAM при соосном расположении антенн. Резонансный усилитель мощности, выходные и входные цепи трактов и эмуляторы цифровой сигнальной обработки размещались в герметичных боксах. Усилительный тракт класса D с мощностью 40 Вт был нагружен на резонансный контур передающей магнитной антенны (Рис. 1) с центральной рабочей частотой 20 кГц с целью расширения рабочей полосы частот ΔF до 32 кГц.

Первым этапом для реализации алгоритма автоматической классификации модуляции по сигнальному созвездию было получение данных для обучения модели и ее тестирования. Для этого был реализован алгоритм на эмуляторах цифровой сигнальной обработки приемника и передатчика для последующего запуска на программируемых приемо-передающих устройствах. На передающей стороне были сгенерированы сигналы, использующие многочастотные модуляции QPSK, 16-QAM и 64-QAM. На приемнике сигналы были приняты и зафиксированы с различным отношением сигнал/шум, что позволяет обучить модель нейронной сети на идеальных сигналах, а затем протестировать ее на сигналах с высоким уровнем искажений. В результате приемо-передающих сессий был сформирован набор данных из 450 сигнальных созвездий. Каждое сигнальное созвездие имеет маркировку класса, соответствующую используемой модуляции. Примеры сигнальных созвездий, с разным уровнем сигнал шум приведены на рис. 2. Количество файлов с созвездиями модуляции QPSK – 153, 16 QAM – 165, 64 QAM – 132.

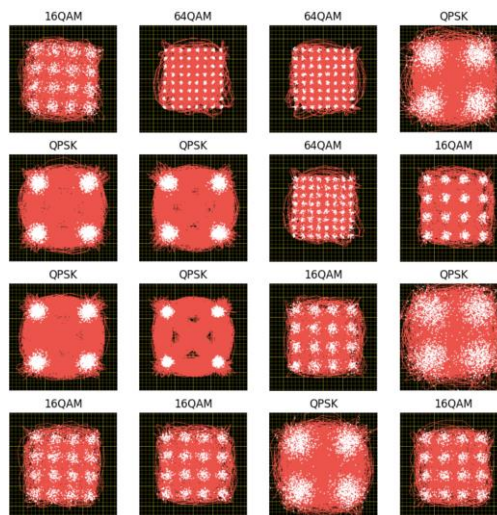


Рис. 2 Примеры полученных сигнальных созвездий, используемых для обучения и тестирования разработанной сверточной нейронной сети

На языке программирования Python, используя библиотеку машинного обучения Tensorflow, была реализована сверточная нейронная сеть, архитектура которой представлена девятью слоями, включающими входной слой, три сверточных слоя, три слоя предвыборки, слой преобразования многомерных данных в одномерный массив,

полносвязный слой, состоящий из 128 нейронов и выходной полносвязный слой с числом нейронов, равным числу классов (три класса). Реализованная сверточная нейронная сеть была обучена на тестовой выборке, состоящей из 350 сигнальных созвездий трех классов. Оставшиеся 100 созвездий были использованы для тестовой выборки. По результатам обучения и тестирования модели были построены график точности классификации (рис. 3) и график потерь (рис. 4). Общая итоговая точность классификации при кросс-валидации достигает 97.71%.

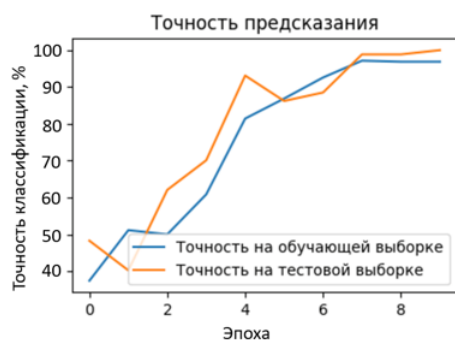


Рис. 3 График точности классификации сигнальных созвездий

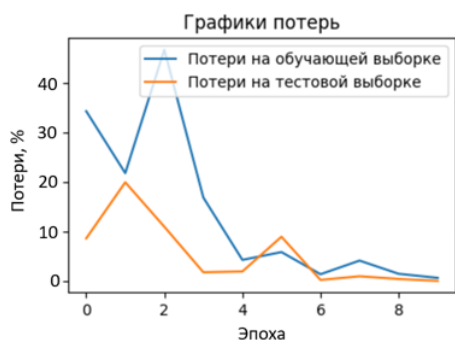
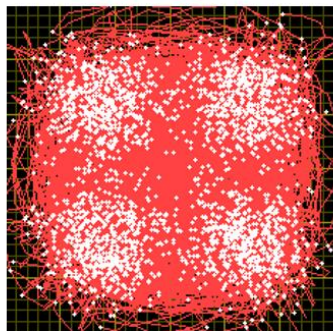
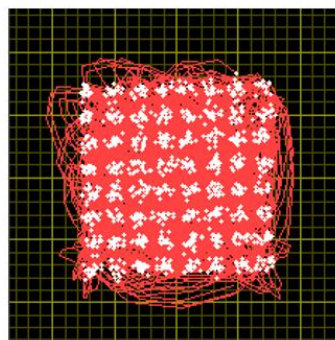


Рис. 4 График потерь при классификации сигнальных созвездий M-QAM

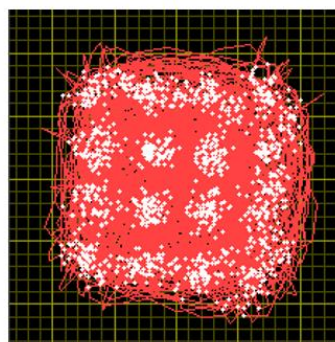
Обученная модель была сохранена и использована на энергоэффективном микрокомпьютере Raspberry Pi 4 без потери точности и скорости классификации. Из рис. 5 видно, что модель точно классифицирует модуляцию цифрового сигнала даже при сильном искажении сигнала из-за воздействия внешних помех в МИ канале связи.



1/1 0s 102ms/step
Созвездие соответствует классу QPSK с вероятностью 100.00 %



1/1 0s 16ms/step
Созвездие соответствует классу 64QAM с вероятностью 97.71 %



1/1 0s 92ms/step
Созвездие соответствует классу 16QAM с вероятностью 99.99 %

Рис. 5 Классификация модуляции по сигнальным созвездиям, используя обученную модель сверточной нейронной сети на микрокомпьютере Raspberry Pi 4

Разработанная модель позволяет оперативно подстраиваться под помеховые условия в описанном магнитно-индуктивном канале связи при скорости информационного обмена 64 кбит/сек, 128 кбит/сек и 192 кбит/сек с обеспечением вероятности ошибки BER не превышающей 10^{-3} .

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения нейросетевых методов для распознавания модуляционных созвездий в условиях магнитно-индуктивного подводного канала связи. Использование сверточной нейронной сети позволило достичь точности классификации в 97,71%, что позволяет адаптивно выполнять перестройку режимов цифровой модуляции отдельных поднесущих частот OFDM сигнала в зависимости от помеховой обстановки. Экспериментальные результаты продемонстрировали возможность передачи данных со скоростью до 192 кбит/с на малых дистанциях (до 10 м), что делает данный подход перспективным для использования в подводных робототехнических системах, включая управление и передачу мультимедийных данных в реальном времени. Эти результаты открывают путь к созданию более надежных и производительных систем подводной связи на основе технологий магнитной индукции.

Литература

1. F. Akyildiz, P. Wang, and Z. Sun. Realizing underwater communication through magnetic induction. *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 11, pp. 42-48, Nov. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7321970/>. - 19.06.2020
2. В.И. Хомич. Ферритовые антенны. М. Энергия. 1989. 95 с. с ил.
3. Бабицкий А.Н., Батулин Т.Н., Беляев Б.А., Боев Н.М., Галеев Р.Г., Изотов А.В., Сушков А.А. Ближнепольные системы передачи цифровой информации // Сб. трудов конф. «Перспективные системы и задачи управления». 2017. С. 476–488.
4. Бабицкий А.Н., Беляев Б.А., Боев Н.М., Галеев Р.Г. Передатчики ближнепольных магнитных систем связи // Издательство Радиотехника: научно-техническая литература, 2017. № 2. С. 111-114. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20309/> (дата обращения: 19.06.2020)
5. Application of Incoherent Multi-Frequency Signals for Information Transmission in a Nonstationary Hydroacoustic Environment / A. Yu. Rodionov, L. G. Statsenko, D. A. Kuzin, M. M. Smirnova // *Acoustical Physics*. – 2023. – Vol. 69, No. 5. – P. 738-747. – DOI 10.1134/s1063771023700653. – EDN YIHNSM.
6. Оценки применения многочастотных сигналов с постоянной огибающей в гидроакустических системах связи / А. Ю. Родионов, П. П. Унру, С. Ю. Кулик, А. А. Голов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2019. – № 3(29). – С. 30-38. – DOI 10.25808/24094609.2019.29.3.004. – EDN SKAQEW.
7. Tian J., Cheng P., Chen Z., Li M., Hu H., Li Y., Vucetic B. A machine learning-enabled spectrum sensing method for OFDM systems // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2019. – T. 68. – №. 11. – С. 11374-11378.
8. Lei Z., Chin F. P. S. Sensing OFDM systems under frequency-selective fading channels // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2010. – T. 59. – №. 4. – С. 1960-1968.
9. Zeng Y., Liang Y. C., Pham T. H. Spectrum sensing for OFDM signals using pilot induced auto-correlations // *IEEE journal on selected areas in communications*. – 2013. – T. 31. – №. 3. – С. 353-363.
10. Chen Y., Oh H. S. A survey of measurement-based spectrum occupancy modeling for cognitive radios // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2014. – T. 18. – №. 1. – С. 848-859.
11. Kim Y., Lee H., Ahn J., & Chung J. Selection of CDMA and OFDM using machine learning in underwater wireless networks // *ICT Express*. – 2019. – T. 5. – №. 4. – С. 215-218.
12. Zhang Y., Li J., Zakharov Y., Li X., Li J. Deep learning based underwater acoustic OFDM communications // *Applied Acoustics*. – 2019. – T. 154. – С. 53-58.
13. Chen Z., He Z., Niu K., Rong Y. Neural network-based symbol detection in high-speed ofdm underwater acoustic communication // *2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. – IEEE, 2018. – С. 1-5.

References

1. F. Akyildiz, P. Wang, and Z. Sun. Realizing underwater communication through magnetic induction. *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 11, pp. 42-48, Nov. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7321970/> (accessed: 19.06.2020).
2. V.I. Khomich. Ferrite Antennas. Moscow: Energiya, 1989. 95 p. (in Russian).
3. A.N. Babitsky, T.N. Baturin, B.A. Belyaev, N.M. Boev, R.G. Galeev, A.V. Izotov, A.A. Sushkov. Near-field systems for digital information transmission. *Proceedings of the Conference "Promising Systems and Tasks of Control"*, 2017, pp. 476–488. (in Russian).
4. A.N. Babitsky, B.A. Belyaev, N.M. Boev, R.G. Galeev. Transmitters of near-field magnetic communication systems. *Radiotekhnika: Scientific and Technical Literature*, 2017, no. 2, pp. 111-114. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20309/> (accessed: 19.06.2020). (in Russian).
5. A.Yu. Rodionov, L.G. Statsenko, D.A. Kuzin, M.M. Smirnova. Application of incoherent multi-frequency signals for information transmission in a nonstationary hydroacoustic environment. *Acoustical Physics*, 2023, vol. 69, no. 5, pp. 738-747. DOI: 10.1134/s1063771023700653. EDN: YIHNSM.
6. A.Yu. Rodionov, P.P. Unru, S.Yu. Kulik, A.A. Golov. Evaluation of the application of multi-frequency signals with a constant envelope in hydroacoustic communication systems. *Underwater Research and Robotics*, 2019, no. 3(29), pp. 30-38. DOI: 10.25808/24094609.2019.29.3.004. EDN: SKAQEW.
7. J. Tian, P. Cheng, Z. Chen, M. Li, H. Hu, Y. Li, B. Vucetic. A machine learning-enabled spectrum sensing method for OFDM systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, vol. 68, no. 11, pp. 11374-11378.
8. Z. Lei, F.P.S. Chin. Sensing OFDM systems under frequency-selective fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, vol. 59, no. 4, pp. 1960-1968.
9. Y. Zeng, Y.C. Liang, T.H. Pham. Spectrum sensing for OFDM signals using pilot induced auto-correlations. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, vol. 31, no. 3, pp. 353-363.
10. Y. Chen, H.S. Oh. A survey of measurement-based spectrum occupancy modeling for cognitive radios. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 848-859.
11. Y. Kim, H. Lee, J. Ahn, J. Chung. Selection of CDMA and OFDM using machine learning in underwater wireless networks. *ICT Express*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 215-218.
12. Y. Zhang, J. Li, Y. Zakharov, X. Li, J. Li. Deep learning-based underwater acoustic OFDM communications. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 154, pp. 53-58.
13. Z. Chen, Z. He, K. Niu, Y. Rong. Neural network-based symbol detection in high-speed OFDM underwater acoustic communication. *2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, IEEE, 2018, pp. 1-5.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Родионов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: rodionov.ayur@dvfu.ru

Alexander Yu. Rodionov, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, o. Russian, p. Ajax, 10, e-mail: rodionov.ayur@dvfu.ru

Власов Александр Александрович, соискатель, Департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: vlasov_aa@students.dvfu.ru

Aleksandr A. Vlasov, PhD student, Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russky Island, Ayaks settlement, 10, e-mail: vlasov_aa@students.dvfu.ru

Кузин Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: kuzin_da@dvfu.ru

Denis A. Kuzin, PhD (Eng), Associate Professor, Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russky Island, Ayaks settlement, 10, e-mail: kuzin_da@dvfu.ru

Бобров Владислав Витальевич, аспирант Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: bobrov_vv@dvfu.ru

Vladislav V. Bobrov, PhD Student, Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russky Island, Ayaks settlement, 10, e-mail: bobrov_vv@dvfu.ru

Кириянов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: kiryanov.av@dvfu.ru

Aleksey.V. Kiryanov, PhD (Eng), Associate Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russky Island, Ayaks settlement, 10, e-mail: kiryanov.av@dvfu.ru

Гребенюк Игорь Владимирович, заместитель руководителя Инженерной школы Владивостокского государственного университета e-mail: igor.grebenyuk@mail.ru

Igor V. Grebenyuk, Deputy Head of the Engineering School of Vladivostok State University e-mail: igor.grebenyuk@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.10.2024.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2024.
Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2024.

Научная статья

УДК 681.884

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.082>**Результаты оценки погрешности гидроакустической навигационной системы с короткой базой в прибрежной зоне**Родионов А.Ю.^{1,2} rodionov.ayur@dvfu.ru, Кирьянов А.В.¹ kiryanov.av@dvfu.ru,Гребенюк И.В.^{1,3} grebenyuk.iv@dvfu.ru, Пестов Д.А.¹ pestov.da@dvfu.ru¹Дальневосточный федеральный университет, ²Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, ³Владивостокский государственный университет

Аннотация. В статье рассматривается вопрос оценки погрешности позиционирования подводных аппаратов при проектировании гидроакустической навигационной системы для прибрежных акваторий. На основе анализа сценария применения предлагается использовать навигационную систему с короткой базой системы. Проведены расчеты погрешности позиционирования для различных дистанций до аппарата. Исходя из полученных результатов для повышения точности позиционирования предложено использовать дополнительный гидроакустический маяк-ответчик.

Ключевые слова: гидроакустическая навигация и связь, навигационная система с короткой базой, позиционирование подводных аппаратов, маяк-ответчик

Для цитирования: Родионов А.Ю., Кирьянов А.В., Гребенюк И.В., Пестов Д.А. Результаты оценки погрешности гидроакустической навигационной системы с короткой базой в прибрежной зоне. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 77—82. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.082

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.082>**Results of error assessment of a hydroacoustic navigation system with a short base in the coastal zone**Alexander Yu. Rodionov^{1,2} rodionov.ayur@dvfu.ru, Alexei V. Kiryanov¹ a.kiryanov@aquatele.com,Igor V. Grebenyuk^{1,3} grebenyuk.iv@dvfu.ru, Daniil A. Pestov¹ pestov.da@dvfu.ru¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, ³Vladivostok State University (VVSU), Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The article discusses the issue of assessing the positioning error of underwater vehicles when designing a hydroacoustic navigation system for coastal waters. Based on the analysis of the application scenario, it is proposed to use a navigation system with a short system base. Calculations of the positioning error were carried out for various distances to the device. Based on the results obtained, it is proposed to use an additional transponder sonar beacon to improve positioning accuracy.

For citation: Alexander Yu. Rodionov, Alexei V. Kiryanov, Igor V. Grebenyuk, Daniil A. Pestov, Results of error assessment of a hydroacoustic navigation system with a short base in the coastal zone. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 77—82. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.082

Введение

Цель настоящей работы - оценить погрешность позиционирования необитаемого подводного аппарата (НПА) с использованием гидроакустической навигационной системы (ГАНС) с короткой базой. Данная система в перспективе должна стать элементом тестового полигона для тестирования НПА в прибрежной зоне о. Русский. В качестве исходных данных рассматривалась необходимость обеспечения позиционирования на дальности до 1000 м с погрешностью определения дистанции до 2 метров для акватории с глубинами до 20 м.

Обоснование технических характеристик и выбор гидроакустических средств для создания ГАНС в данной работе не затрагиваются. Вместе с тем, предполагается использовать высокочастотные гидроакустические модемы с пропускной способностью свыше 1 Кбит/с.

1. Существующие технические решения в области навигации НПА

Навигационные системы являются одним из ключевых элементов при создании и применение подводных аппаратов. Подходы к обеспечению позиционирования НПА могут быть разные: на основе распознавания рельефа [1,2], инерциальные системы [3,4], системы с использованием навигационных сигналов. Последние могут быть гидроакустическими [5-6], радио [7] и оптическими [8] подводные навигационные системы.

Навигация на основе распознавания рельефа, а также инерциальные системы в настоящее время не в состоянии обеспечить необходимую точность позиционирования НПА для планирования маршрута и выполнения точных технологических операций. Навигационные системы, основанные на распознавании рельефов и объектов, страдают от оптических артефактов [1], приводящих к расфокусировке, размытым изображениям и снижению контрастности [2]. При выполнении

технологических операций вблизи морского дна движители НПА будут поднимать донные отложения, значительно затрудняющие видимость. Инерциальные системы навигации, дополненные доплеровским лагом, также не в состоянии обеспечить достаточную точность позиционирования ввиду накопления ошибки при движении [3-4].

Рассматривая гидроакустические, радио и оптическими подводные навигационные системы, главным ограничением в применении выступает дальность передачи навигационных сигналов. Наиболее перспективные и современные системы подводной радионавигации обеспечивают позиционирование на дистанциях до 72 метров на предельных удалениях от опорных станций/буев [9]. В идеальных условиях оптический сигнал можно передать на дистанцию не более 100 метров [10]. Область применения подобных систем – узкоспециализированные задачи, например, в связке с гидроакустическими системами обеспечение приведения и докования подводного аппарата, а также для сверхточной навигации на дистанциях до 10 метров [11].

Для требуемой дальности и точности позиционирования наиболее приемлемым является использование гидроакустических систем навигации (ГАНС). При этом существуют навигационные системы с длинной базой [12], синтезированной длинной базой [13], короткой базой [14] и ультракороткой базой [15]. Каждая из систем имеет свои недостатки и достоинства, которые необходимо рассмотреть в контексте запланированного сценария и специфики использования. Выбор наиболее оптимальной навигационной ситуации для разных условий и применений затруднен тем, что в открытой литературе крайне мало прямых сравнений различных навигационных систем в одинаковых условиях. Кроме того, разные источники по-разному оценивают точность систем навигации разных типов [16,17].

В качестве ГАНС была выбрана система с короткой базой. Одной из причин выбора данного типа системы является ее локальное размещение в пределах судна, пирса, донной станции, не требующее долговременного размещения в акватории маяков-ответчиков, поскольку район размещения относится к зоне активного судоходства. При этом потенциальная точность позиционирования может быть выше, чем у ультракороткобазной системы. Также преимуществом короткобазной системы является возможность централизованного питания и сбора информации по кабелям, что для длиннобазной проблематично.

2. Оценка потенциальной точности позиционирования НПА средствами ГАНС с короткой базой

Погрешность определения координат НПА средствами ГАНС зависит от ряда факторов, включая расположение бортовой приемопередающей антенны ГАНС относительно маяков-ответчиков, расположенных на донной станции, включая точность оценки скорости звука в районе работ, сезонности работы и точности измерения времени распространения акустического сигнала от

НПА до маяков-ответчиков. Оценим погрешность измерения дистанций от НПА до маяков-ответчиков.

Горизонтальное расстояние r до НПА связано с измеряемыми величинами соотношением:

$$(c \cdot t)^2 = (z_2 - z_1)^2 + r^2, \quad (1)$$

где r – горизонтальная дальность, z_1, z_2 – глубины НПА и маяков-ответчиков, c – скорость звука, t – время распространения сигнала. Для мелководных акваторий без резкого перепада по глубине наклонную дальность и горизонтальную дальность от маяков-ответчиков до НПА можно считать приблизительно одинаковыми величинами и основную погрешность в определении дальности будут вносить погрешности измерения времени прихода сигнала и погрешности измерения скорости звука на трассе распространения. Принимая перепад глубин довольно малой величиной по сравнению с дистанциями, получим уравнение погрешностей, которое можно записать в виде:

$$(c + \sigma_c)(t + \sigma_t) \approx r + \sigma_r, \quad (2)$$

где $\sigma_r, \sigma_c, \sigma_t$ – соответствующие погрешности. Главная составляющая из перечисленных погрешностей σ_c – погрешность оценки скорости звука. Если неоднородность морской среды по скорости звука учитывается введением средней скорости, то погрешность σ_c задания имеет оценку:

$$\sigma_c = \sigma_{\text{ср. скор.}} + \sigma_{\text{инстр.}} \quad (3)$$

Примем $\sigma_{\text{инстр.}} = 0,02$ м/с, что соответствует метрологическим характеристикам современного акустического измерителя вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), например, Mini SVP (Valeport, Великобритания).

Значение средней скорости звука существенно зависит не только от сезона, но и от времени суток. По результатам исследования суточной изменчивости ВРСЗ вблизи о. Русский параметр отклонения скорости звука от средней величины за 4 часа измерений составил $\sigma_{\text{ср. скор.}} = 0,33$ м/с [18]. Однако при своевременной оценке динамики ВРСЗ на полигоне, величину σ_c можно свести до минимальных значений 0,02 – 0,1 м/с. Тогда общая погрешность измерения скорости звука может составлять до 0,1-0,33 м/с (при скорости звука 1500 м/с). Погрешность измерения расстояния:

$$\sigma_r \approx c\sigma_t + \sigma_c \frac{r}{c} + \sigma_c \sigma_t. \quad (5)$$

Погрешность измерения времени распространения сигнала σ_t фактически является инструментальной погрешностью и не превышает 10^{-5} и является функцией текущего отношения сигнал/шум.

В ряде, выполненных авторами работ показана погрешность измерения времени распространения сигнала σ_t в диапазоне 10^{-4} – $5 \cdot 10^{-6}$ для летних и зимних акваторий с ледовым покровом соответственно и на дистанциях от 500 до 10 000 метров. Описания и результаты экспериментов авторов показаны в работах [19,20].

Выполним оценку погрешности позиционирования НПА с помощью короткобазной гидроакустической системы. Схема для оценки погрешности позиционирования σ_{12} ГНПА, погрешности измерения дистанции σ_r для двух элементов гидроакустической КБ системы показана на рисунке 1. Погрешность позиционирования σ_{12} НПА зависит от угла α , образованного лучами D_1 и D_2 .

Очевидно, что острота угла α приводит к существенно большим ошибкам позиционирования, что доказывает требование к большему базовому расстоянию A (1-2). Также можно сделать вывод об осторожности использования результатов измерений парами 3-2, 2-4 в короткобазной системе в подобной ситуации, ввиду крайне малых величин углов α . Выражение для погрешности σ_{12} принимает следующий вид, в зависимости от расстояний измерений D_1 , D_2 , базового расстояния A (рисунок 1):

$$\sigma_{12} \approx \frac{\sigma_r}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_1^2 + D_2^2 - A^2}{2D_1D_2} \right)^2}} \quad (6)$$

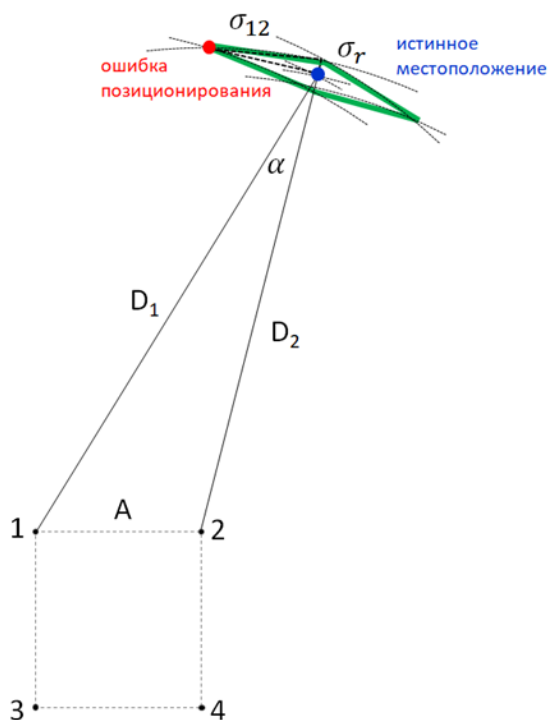


Рис. 1 Схема оценки погрешности позиционирования σ_{12} НПА, погрешности измерения дистанции σ_r для двух элементов гидроакустической короткобазной системы

Для дальнейшего моделирования примем, что базовые расстояния A между маяками-ответчиками донной станции не будут превышать 3 м. Построим графики погрешности позиционирования σ_{12} для дистанций D до 500 м для базового расстояния $A_{1-2} = 3$ м при различной величине $\Delta r = D_1 - D_2$ разности хода лучей от НПА до пары маяков-ответчиков 1-2. $\Delta r = 0, 1, 1.5$ и 2 м.

При идеализированной оценке $\sigma_t = 10^{-5}$ с, $\sigma_c = 0,02$ м/с кривые ошибки σ_{12} представлены на рисунках 2,3. Видно, что на максимальных расстояниях ошибка может достигать 5,5 м (рисунок 2). Для малых дистанций (до 50 м) ошибка может составлять до 40 см (рисунок 3).

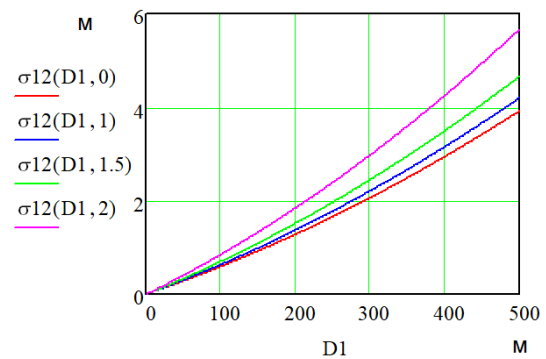


Рис. 2 Кривые ошибки σ_{12} при $\sigma_t = 10^{-5}$ с, $\sigma_c = 0,02$ м/с для дистанции до 500 м

Ввиду того, что существенный вклад в ошибку позиционирования могут вносить многолучевые компоненты целесообразно разместить дополнительный маяк-ответчик, увеличив, таким образом, одно из базовых расстояний свыше 50 метров ($A = 50$ м).

При использовании дополнительного маяка-ответчика при идеализированной оценке $\sigma_t = 10^{-5}$ с, $\sigma_c = 0,02$ м/с получим оценки ошибки σ_{12} , не превосходящие 22 см на 500 м (рисунок 4).

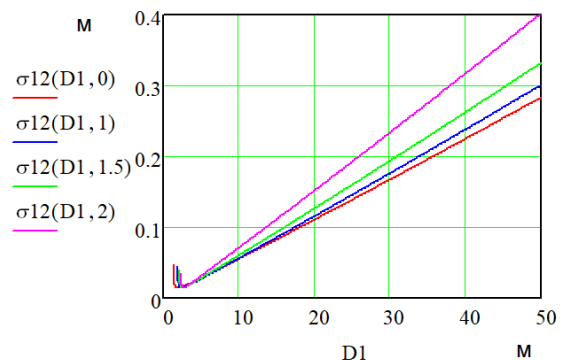


Рис. 3 Кривые ошибки σ_{12} при $\sigma_t = 10^{-5}$ с, $\sigma_c = 0,02$ м/с для дистанции до 50 м

Также оценим погрешности позиционирования ГНПА σ_{12} с учетом погрешности $\sigma_c = 0,33$ м/с, принимая погрешности ее измерения и возможной вариабельности на дистанции 500 м (рисунок 5). При идеализированной оценке $\sigma_t = 10^{-5}$ с получим ошибку позиционирования 1,25 м:

Данные оценки проведены для пары 1-2 маяков-ответчиков (гидроакустических маяков-модем) при заданном базовом разнесении A_{12} . Вариабельность погрешности позиционирования от десятков сантиметров до 16 метров на дистанции 500 м может компенсироваться комплексной статистической обработкой результатов на 4-х антеннах с дополнительным 5-ым маяком-ответчиком на пирсе, что существенно может снизить общую погрешность измерений.

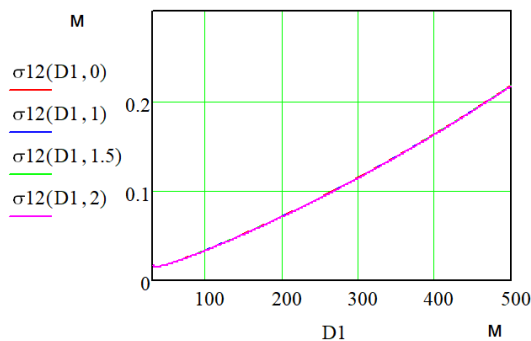


Рис. 4 Кривые ошибки σ_{12} при $\sigma_t = 10^{-5} \text{ с}$, $\sigma_c = 0,33 \text{ м/с}$ для дистанции до 500 м

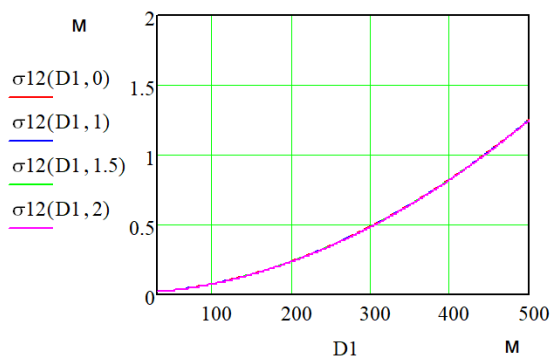


Рис. - Кривые ошибки σ_{12} при $\sigma_t = 10^{-5} \text{ с}$, $\sigma_c = 0,33 \text{ м/с}$ для дистанции до 500 м

Заключение

Погрешности определения данных о местоположении НПА при использовании ГАНС имеют прямую зависимость от дистанции до маяков-ответчиков и базового расстояния КБ системы между маяками. Для короткобазной навигационной системы при расстоянии между маяками-ответчиками 3 метра на расстояниях 500 м ошибка может достигать 5,5 м, для малых дистанций до 50 м ошибка может составлять до 40 см. Для значительного повышения точности определения местоположения НПА на больших дистанциях необходимо установить дополнительный маяк на расстоянии не менее 50 м от группы маяков для достижения погрешности позиционирования НПА менее 0,5-1,5 метров.

Литература

1. Çelebi A. T., Ertürk S. Visual enhancement of underwater images using empirical mode decomposition // Expert Systems with Applications, Mugla, Turkey. – 2012. P. 800-805.
2. Aulinas J. et al. Feature extraction for underwater visual SLAM //OCEANS 2011 IEEE-Spain, Spain. – 2011. – P. 1-7.
3. Shabani M., Gholami A., Davari N. Asynchronous direct Kalman filtering approach for underwater integrated navigation system //Nonlinear Dynamics, Isfaran, Iran. – 2015. P. 71-85.
4. Kang Y. et al. A novel grid SINS/DVL integrated navigation algorithm for marine application. – China: Sensors, 2018. – 364 p.
5. Rodionov A. Y. et al. Experimental estimation of the ranging accuracy using underwater acoustic modems in the frequency band of 12 kHz/ A.Y.Rodionov //2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – Saint-Petersburg, Russia, 2020 – P. 1-3 – DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133883.
6. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods// Gyroscopy and navigation, US. – 2017. P. 80-89.
7. Shaidurov G. Y., Romanova G. N., Kudinov D. S. Parametric Method of Underwater Radio Navigation in Arctic Conditions //Journal of Communications Technology and Electronics, US. – 2020. P. 888-893.
8. Wang S. et al. Blue laser diode light for underwater optical vision guidance in AUV docking //Semiconductor Lasers and Applications IX, Hangzhou, China, –2019. P. 175-183.
9. Grosch A. et al. Theoretical concept for a mobile underwater radio-navigation system using pseudolite buoys. – Germany: Remote Sensing, 2020 – 3636 p.
10. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater optical wireless communication //IEEE access, US. – 2016. P. 1518-1547.
11. Kondo H. et al. Passive acoustic and optical guidance for underwater vehicles //2012 Oceans-Yeosu, Yeosu, Korea(South). – 2012. P. 1-6.
12. Zhang T., Chen L., Li Y. AUV underwater positioning algorithm based on interactive assistance of SINS and LBL. – China: Sensors, 2015. – 42 p.
13. Larsen M. B. Synthetic long baseline navigation of underwater vehicles //OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158), RI, US. – 2000, P. 2043-2050.
14. Li Z. et al. The research of short baseline positioning integration of time-reversal mirror //Shengxue Xuebao(Acta Acustica), China. – 2013. P.287-293.

15. Rypkema N. R., Fischell E. M., Schmidt H. One-way travel-time inverted ultra-short baseline localization for low-cost autonomous underwater vehicles //2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore. – 2017. P. 4920-4926.
16. Wu Y. et al. Survey of underwater robot positioning navigation. – China: Applied Ocean Research, 2019. – 101845 p.
17. Jalal F., Nasir F. Underwater navigation, localization and path planning for autonomous vehicles: A review //2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST), Islamabad, Pakistan. – 2021. P. 817-828.
18. Минаев Д. Д., Моделирование акустических характеристик мелководных морских акваторий по данным натурных экспериментальных исследований/ Д.Т. Минаев, В.И. Петухов //Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 8. – С. 45-52.
19. Родионов А.Ю. Оценка точности измерения дистанции между подводными объектами с использованием гидроакустических модемов / А. Ю. Родионов, П. П. Унру, С. Ю. Кулик, Л. Г. Стаценко // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – № 1(34). – С. 23-29.
20. Kulik, S. Y., Rodionov, A. Y., Dubrovin, F. S., & Unru, P. P. On reliability of data transmission and distance estimation using mobile underwater acoustic modems // In 2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS) – Saint-Petersburg, Russia, 2018 – P. 1-4 – DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405859.

References

1. Çelebi A. T., Ertürk S. Visual enhancement of underwater images using empirical mode decomposition // Expert Systems with Applications, Mugla, Turkey. – 2012. P. 800-805.
2. Aulinas J. et al. Feature extraction for underwater visual SLAM //OCEANS 2011 IEEE-Spain, Spain. – 2011. – P. 1-7.
3. Shabani M., Gholami A., Davari N. Asynchronous direct Kalman filtering approach for underwater integrated navigation system //Nonlinear Dynamics, Isfaran, Iran. – 2015. P. 71-85.
4. Kang Y. et al. A novel grid SINS/DVL integrated navigation algorithm for marine application. – China: Sensors, 2018. – 364 p.
5. Rodionov A. Y. et al. Experimental estimation of the ranging accuracy using underwater acoustic modems in the frequency band of 12 kHz/ A.Y.Rodionov //2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – Saint-Petersburg, Russia, 2020 – P. 1-3 – DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133883.
6. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods// Gyroscopy and navigation, US. – 2017. P. 80-89.
7. Shaidurov G. Y., Romanova G. N., Kudinov D. S. Parametric Method of Underwater Radio Navigation in Arctic Conditions //Journal of Communications Technology and Electronics, US. – 2020. P. 888-893.
8. Wang S. et al. Blue laser diode light for underwater optical vision guidance in AUV docking //Semiconductor Lasers and Applications IX, Hangzhou, China, –2019. P. 175-183.
9. Grosch A. et al. Theoretical concept for a mobile underwater radio-navigation system using pseudolite buoys. – Germany: Remote Sensing, 2020 – 3636 p.
10. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater optical wireless communication //IEEE access, US. – 2016. P. 1518-1547.
11. Kondo H. et al. Passive acoustic and optical guidance for underwater vehicles //2012 Oceans-Yeosu, Yeosu, Korea(South). – 2012. P. 1-6.
12. Zhang T., Chen L., Li Y. AUV underwater positioning algorithm based on interactive assistance of SINS and LBL. – China: Sensors, 2015. – 42 p.
13. Larsen M. B. Synthetic long baseline navigation of underwater vehicles //OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158), RI, US. – 2000, P. 2043-2050.
14. Li Z. et al. The research of short baseline positioning integration of time-reversal mirror //Shengxue Xuebao(Acta Acustica), China. – 2013. P.287-293.
15. Rypkema N. R., Fischell E. M., Schmidt H. One-way travel-time inverted ultra-short baseline localization for low-cost autonomous underwater vehicles //2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore. – 2017. P. 4920-4926.
16. Wu Y. et al. Survey of underwater robot positioning navigation. – China: Applied Ocean Research, 2019. – 101845 p.
17. Jalal F., Nasir F. Underwater navigation, localization and path planning for autonomous vehicles: A review //2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST), Islamabad, Pakistan. – 2021. P. 817-828.
18. Minaev D. D., Modeling of acoustic characteristics of shallow marine areas based on data of field experimental studies / D.D. Minaev, V.I. Petukhov //Underwater search and и robototechnics. – 2013. – № 8. – P. 45-52.
19. Rodionov A.Y. Assesment of accuracy of measuring the distance between underwater object with using sonar modems / A. Y. Rodionov, P. P. Unru, S. Y. Kulik, L. G. Statsenko // Bullet of Engineering School of FEFU. – 2018. – № 1(34). – С. 23-29.
20. Kulik, S. Y., Rodionov, A. Y., Dubrovin, F. S., & Unru, P. P. On reliability of data transmission and distance estimation using mobile underwater acoustic modems // In 2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS) – Saint-Petersburg, Russia, 2018 – P. 1-4 – DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405859.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Родионов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: rodionov.ayur@dvfu.ru

Alexander Yu. Rodionov, Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, o. Russian, p. Ajax, 10, e-mail: rodionov.ayur@dvfu.ru

Кириянов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: kirianov.av@dvfu.ru

Kiryanov Aleksey Valerievich, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russky Island, Ayaks settlement, 10, e-mail: kirianov.av@dvfu.ru

Гребенюк Игорь Владимирович, заместитель руководителя Инженерной школы Владивостокского государственного университета
e-mail: igor.grebenyuk@mail.ru

Grebenyuk Igor Vladimirovich, Deputy Head of the Engineering School of Vladivostok State University
e-mail: igor.grebenyuk@mail.ru

Пестов Даниил Александрович, аспирант Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10 e-mail: pestov.da@dvfu.ru

Pestov Daniil Alexandrovich, Post-graduate student of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, o. Russian, p. Ajax, 10, e-mail: pestov.da@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2024.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 629.58

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.083>

Адаптивное управление электроприводами подводных манипуляторов

Филаретов В.Ф.¹ filaretov@inbox.ru, Зуев А.В.^{1,2} zuev@dvo.ru, Тимошенко А.А.² timoshenko.aal@mail.ru

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,

²Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Аннотация. В настоящее время существует тенденция к расширению области применения автономных необитаемых подводных аппаратов, в частности актуальной является задача автоматического выполнения технологических операций с помощью многозвенных подводных манипуляторов. В статье рассматривается проблема построения адаптивных систем управления электроприводами подводных манипуляторов, использующих только информацию о положении выходных валов этих приводов. Для реализации такой системы сначала строится преобразованная модель электропривода манипулятора, чувствительная к возникновению ненулевого внешнего момента, но у которой в отличие от исходной модели могут быть определены все фазовые координаты. Далее, на основе этой модели синтезируются диагностические наблюдатели, позволяющие в режиме реального времени оценивать внешний крутящий момент, приводимый к выходному валу соответствующего электропривода, а также угловую скорость и ускорение его вращения. Эти оценки затем используются для реализации самонастраивающихся корректирующих устройств, стабилизирующих переменные параметры электроприводов на некотором номинальном уровне за счет подачи дополнительного управляющего воздействия. Эффективность такой системы была подтверждена с помощью математического моделирования автономного необитаемого подводного аппарата с манипулятором.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, манипулятор, электропривод, диагностический наблюдатель, самонастраивающееся корректирующее устройство, адаптивная система управления, математическая модель

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 24-19-00218, <https://rscf.ru/project/24-19-00218>.

Для цитирования: Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А. Адаптивное управление электроприводами подводных манипуляторов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 83—90. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.083

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.083>

Adaptive control of electric drives of underwater manipulators

Vladimir F. Filaretov¹ filaretov@inbox.ru, Aleksandr V. Zuev^{1,2} zuev@dvo.ru,

Aleksandr A. Timoshenko² timoshenko.aal@mail.ru

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation, ²Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Currently, there is a tendency to expand the scope of autonomous underwater vehicles. In particular, the task of automatically performing technological operations using multi-link underwater manipulators is urgent. The article deals with the problem of building adaptive control systems for electric drives of underwater manipulators using only information about the position of the output shafts of these drives. To implement such a system, a transformed model of the manipulator electric drive is first constructed, which is sensitive to the occurrence of a non-zero external moment. Unlike the original model, all phase coordinates of this model can be determined. Further, diagnostic observers are synthesized using this model that allow real-time evaluation of the external torque acting on the output shaft of the corresponding electric drive, as well as the angular velocity and acceleration of its rotation. These estimates are then used to implement self-adjusting corrective devices that stabilize the variable parameters of electric drives at some nominal level by providing additional control signal. The effectiveness of such a system was confirmed using mathematical modeling of an autonomous underwater vehicle with a manipulator.

Key words: autonomous underwater vehicle, manipulator, electric drive, diagnostic observer, self-adjusting corrective device, adaptive control system, mathematical model

Financial Support: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-19-00218, <https://rscf.ru/project/24-19-00218>.

For citation: Vladimir F. Filaretov, Aleksandr V. Zuev, Aleksandr A. Timoshenko, Adaptive control of electric drives of underwater manipulators. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 83—90. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.083

Введение

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) активно используются только при выполнении обзорных, поисковых и других миссий, не требующих выполнения сложных технологических операций [1-3]. Основным препятствием для проведения таких работ в автономном режиме является то, что динамика подводных аппаратов, оснащаемых многосвязными подводными манипуляторами (ПМ), описывается сложными нелинейными математическими моделями с большим количеством переменных и часто неизвестных параметров, описывающих гидростатические и гидродинамические воздействия, в том числе вязкие трения и силы, обусловленные присоединенными массами и моментами инерции [4-6]. Поэтому в настоящее время актуальным является исследование методов оценки неизвестных параметров таких сложных систем, как АНПА с ПМ, а также построение адаптивных систем управления электроприводами подводных манипуляторов, позволяющих стабилизировать их переменные параметры на некотором номинальном уровне.

Хорошо исследованы методы построения самонастраивающихся корректирующих устройств (СКУ) для различных электроприводов наземных манипуляторов [7, 8]. При этом для их построения используются аналитические выражения, описывающие внешний момент, приводимый к выходному валу каждого электропривода ПМ и обусловленный взаимовлияниями между всеми звеньями ПМ, кориолисовыми, центробежными и гравитационными силами [8]. Но в водной среде на каждое звено ПМ также действуют неизвестные силы и моменты, обусловленные присоединенными массами и моментами инерции звеньев, а также силами вязкого трения [4, 6].

Кроме того, в работе традиционных СКУ, кроме положения выходного вала электропривода, используются измерения угловой скорости и ускорения вращения ротора электродвигателя, а также силы тока его якорной обмотки. Использование соответствующих датчиков значительно увеличивает стоимость и без того дорогого оборудования.

В настоящей работе предлагается метод построения адаптивных систем управления электроприводами подводных манипуляторов, в которых измеряется только положение их выходных валов. Для определения остальных неизвестных параметров предлагается использовать методы идентификации, основанные на применении диагностических наблюдателей (ДН) [9-11].

1. Алгоритм построения адаптивных систем управления

Построение адаптивной системы управления электроприводами ПМ осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе на основе известной динамической модели электропривода ПМ строится его преобразованная модель, чувствительная к появлению неизвестного внешнего крутящего момента на его выходном валу. Преобразованная модель, все переменные состояния которой, в отличие от исходной системы, могут быть определены, позволяет применить существующие

методы идентификации с использованием ДН для определения неизвестных переменных параметров электроприводов ПМ.

На втором этапе для каждого электропривода ПМ синтезируются ДН на основе полученной на предыдущем шаге преобразованной модели. С помощью этих наблюдателей может быть получена не только оценка величины неизвестного внешнего крутящего момента на выходном валу каждого электропривода, но также оценки не измеряемых угловых скоростей и ускорений вращения этих валов. Получение указанных оценок в каждый момент времени движения ПМ позволяет использовать СКУ, даже если измеряется только угловое положение выходных валов приводов манипулятора.

На последнем этапе для каждого электропривода ПМ строится СКУ. СКУ должно стабилизировать переменные параметры привода на некотором номинальном уровне, компенсируя часть внешнего момента, обусловленного взаимовлияниями между движущимися звеньями ПМ, действием присоединенных масс и моментов инерции звеньев, а также силами вязкого трения, за счет подачи на его вход дополнительного управляющего воздействия.

Таким образом может быть построена адаптивная система управления электроприводами подводного манипулятора, у которых измеряется только угловое положение их выходных валов. Далее будут подробно описаны указанные этапы построения такой системы.

2. Модель динамики электроприводов манипулятора

Сначала опишем модель исходной системы. В общем случае, модель электропривода i -ой степени подвижности ММ с учетом моментов сухого и вязкого трений выглядит следующим образом [12]:

$$\begin{aligned} k_u u &= L \frac{dI}{dt} + RI + k_\omega \dot{\alpha}, \\ M_{дв} &= k_m I, \\ M_{дв} &= J_\Sigma \ddot{\alpha} + M_{тр} \text{sign}(\dot{\alpha}) + k_b \dot{\alpha} + \frac{P}{i_p}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{\alpha}$ и $\ddot{\alpha}$ – соответственно, скорость и ускорение вращения ротора каждого электродвигателя; u – входное напряжение; I , R и L – соответственно, ток, активное сопротивление и индуктивность якорной цепи электродвигателя; $M_{дв}$ – крутящий момент электродвигателя; J_Σ – момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора, приведенный к этому ротору; k_u – коэффициент усилителя мощности; k_b – коэффициент вязкого трения; $M_{тр}$ – величина момента сухого трения при вращении электропривода; k_ω – коэффициент противо-ЭДС; k_m – коэффициент крутящего момента; i_p – передаточное число редуктора; P – внешний крутящий момент, приводимый к выходному валу электропривода.

В нормальной форме Коши система (1) относительно фазовых координат $x_1 = q$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = I$ принимают вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{1}{J_p} x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k_b}{J_z} x_2 + \frac{k_m}{J_z} x_3 - \frac{M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\alpha})}{J_z} - \frac{P}{J_z J_p} \\ \dot{x}_3 &= -\frac{k_\omega}{L} x_2 - \frac{R}{L} x_3 + \frac{k_u}{L} u\end{aligned}\quad (2)$$

где q – угловое положение выходного вала привода.

С учетом того, что для адаптивного управления электроприводами ПМ предлагается использовать только измерения угловых положений их выходных валов, система (2) может быть записана в матричном виде следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + G\Psi + DP, \\ y &= Cx,\end{aligned}\quad (3)$$

где $x = [x_1, x_2, x_3]^T$ – вектор фазовых координат

электропривода; $A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$; $B = [0 \ 0 \ b_3]^T$;

$C = [1 \ 0 \ 0]$; $D = [0 \ d_2 \ 0]^T$; $\Psi = \text{sign}(\dot{\alpha})$;
 $G = [0 \ g_2 \ 0]^T$; y – измерения электропривода;
 $a_{12} = \frac{1}{J_p}$; $a_{22} = -\frac{k_b}{J_z}$; $a_{23} = \frac{k_m}{J_z}$; $a_{32} = -\frac{k_\omega}{L}$; $a_{33} = -\frac{R}{L}$; $b_3 = \frac{k_u}{L}$;
 $d_2 = -\frac{1}{J_z J_p}$; $g_2 = -\frac{M_{\text{тр}}}{J_z}$.

Однако для полученной модели электропривода (3) не соблюдается условие согласования [11], поскольку в уравнение для фазовой координаты x_2 , которая не измеряется, входит подлежащая определению функция P . Поэтому синтезировать ДН на основе уравнений (3) затруднительно. Для решения возникшей проблемы воспользуемся подходом, предложенным в [9, 10] и построим преобразованную модель системы (3), которая чувствительна к появлению ненулевой функции P и для которой можно определить все фазовые координаты.

3. Построение преобразованной модели электропривода

Преобразованная модель системы (3) может быть получена в виде [9]

$$\begin{aligned}\dot{x}_* &= A_* x_* + B_* u + J_* y + G_* \Psi + D_* P + K_* e_y, \\ y_* &= C_* x_*,\end{aligned}\quad (4)$$

где $x_* \in R^k$ – вектор фазовых координат преобразованной модели; $y_* \in R^1$ – выход модели; $A_* \in R^{k \times k}$, $B_* \in R^k$, $J_* \in R^{k \times l}$, $G_* \in R^k$, $C_* \in R^{1 \times k}$ и $D_* \in R^k$ – матрицы, подлежащие определению; $e_y = R_* y - y_* \in R^1$ – невязка между преобразованной моделью и исходной системой; $R_* \in R^{1 \times c}$ – некоторая постоянная матрица; $K_* \in R^k$ – вектор коэффициентов, обеспечивающих устойчивость системы (4); k – порядок преобразованной модели, $c = 1$ – размерность вектора измерений y исходной системы (3).

Предполагается, что при $P = 0$ и отсутствии внешних возмущений $R_* y(t) = y_*(t)$ и $\Phi_* x(t) = x_*(t)$ для некоторых $\Phi_* \in R^{k \times 3}$ и R_* , удовлетворяющих условиям [13]:

$$\begin{aligned}\Phi_* A &= A_* \Phi_* + J_* C, \quad R_* C = C_* \Phi_*, \\ B_* &= \Phi_* B, \quad D_* = \Phi_* D, \quad G_* = \Phi_* G.\end{aligned}\quad (5)$$

Матрицы R_* и J_* выбираются таким образом, чтобы удовлетворять системе уравнений

$$[R_* \quad -J_*] \begin{bmatrix} CA^3 \\ CA^2 \\ CA \\ C \end{bmatrix} = 0, \quad (6)$$

где J_{*i} ($i = \overline{1, k}$) – соответствующие строки матрицы J_* .

Матрица Φ_* находится из следующих соотношений

$$\begin{aligned}\Phi_{*1} &= R_* C, \quad \Phi_{*2} = R_* CA - J_{*1} C, \\ \Phi_{*k} &= R_* CA^{k-1} - J_{*1} CA^{k-2} - \dots - J_{*k-1} C,\end{aligned}\quad (7)$$

где Φ_{*i} , $i = \overline{1, k}$ – соответствующие строки матрицы Φ_* .

Минимальный порядок преобразованной модели (3) k выбирается таким образом, чтобы нашлось нетривиальное решение уравнений (6), а также соблюдалось условие чувствительности системы (4) к появлению ненулевой функции P :

$$D_* = \Phi_* D \neq 0, \quad (8)$$

Для системы (3), в которой измеряется только одна фазовая координата, нетривиальное решение системы (6), в котором выполняется условие (8), находится только при $k = 3$. Одно из таких решений находится при $R_* = 1$, $J_* = [a_{33} + a_{22} \quad a_{23} a_{32} - a_{22} a_{33} \quad 0]$.

Тогда с учетом (7)

$$\Phi_* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -a_{33} - a_{22} & a_{12} & 0 \\ a_{22} a_{33} - a_{23} a_{32} & -a_{12} a_{33} & a_{12} a_{23} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

По аналогии с [9] матрицы A_* и C_* при $k = 3$ ищутся в канонической форме

$$\begin{aligned}A_* &\in R^{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ C_* &\in R^{1 \times 3} = [1 \quad 0 \quad 0].\end{aligned}$$

С учетом выражений (5) и (9) можно получить матрицы

$$B_* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{12} a_{23} b_3 \end{bmatrix}, \quad D_* = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{12} d_2 \\ -a_{12} a_{33} d_2 \end{bmatrix}, \quad G_* = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{12} g_2 \\ -a_{12} a_{33} g_2 \end{bmatrix}.$$

На последнем этапе построения преобразованной модели нужно подобрать такие элементы k_i ($i = \overline{1, k}$) вектора K_* , чтобы соблюдались условие устойчивости системы (4), т.е. $\Phi_* x(t) - x_*(t) \rightarrow 0$ [7]. Для этого должна быть устойчивой матрица динамики системы (4)

$$A_* - K_* C_* = \begin{bmatrix} -k_{*1} & 1 & 0 \\ -k_{*2} & 0 & 1 \\ -k_{*3} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

т.е. иметь собственные числа с отрицательными вещественными частями, откуда вытекает

$$\begin{aligned} k_{*1} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k), \\ k_{*2} &= \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \dots + \lambda_{k-1} \lambda_k, \\ k_{*k} &= (-1)^k \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_k. \end{aligned} \quad (10)$$

Корни характеристического полинома (10) выбираются из требований к устойчивости, предъявляемых к системе (4).

Таким образом была получена преобразованная модель электропривода подводного манипулятора, чувствительная к появлению неизвестного внешнего момента P , с измеряемым вектором фазовых координат x_* .

Открытым остается вопрос определения нелинейной составляющей Ψ , ведь для этого необходимо знать величину не измеряемой фазовой координаты $x_2(t)$. Найти решение этой проблемы, а также получить оценки других неизвестных величин, необходимых для качественного управления ПМ, удается с помощью синтеза ДН.

4. Синтез диагностического наблюдателя

ДН для приводов, динамика которых соответствует уравнениям (3), на основе преобразованной модели (4) описываются выражениями [9, 10]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_* &= A_* \hat{x}_* + B_* u + J_* y + G_* \Psi + D_* v + K_* e_y, \\ \hat{y}_* &= C_* \hat{x}_*, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\hat{x}_* \in R^3$ – вектор переменных состояния ДН; $\hat{y}_*$ – выход ДН; v – разрывная функция, имеющая вид $v = -\tilde{g} \text{sign}(e_y)$; $\tilde{g}$ – некоторая константа.

При выборе константы $\tilde{g} > \|D_*\|P_{\max} + \Delta\Psi_{\max}$ (где $P_{\max} \geq |P|$ и $\Delta\Psi_{\max} \geq |G_* \cdot (\Psi - \Psi_*)|$), наблюдатель (11) будет асимптотически устойчивым [9, 10], т.е. ошибка между вектором переменных состояния ДН (11) и вектором фазовых координат привода (3) будет обнуляться $e = \hat{x}_* - x_* = 0$ за конечное малое время. Таким образом, функция v становится пропорциональной P , а ее величина определяется равенством: $P = v_{eq}$, где v_{eq} – сигнал v , пропущенный через известный фильтр низких частот [14].

Очевидно, что при $e = 0$ будут соблюдаться равенства $\hat{x}_2 = x_2$ и $\hat{x}_3 = x_3$, поэтому, учитывая вид матрицы Φ_* и то, что $x_1 = q$, $x_2 = \dot{q}$, $x_3 = I$, получаются уравнения, связывающие фазовые координаты привода с уже известными $\hat{x}_2$ и $\hat{x}_3$:

$$\begin{aligned} \hat{x}_2 &= -(a_{33} + a_{22})q + a_{12}\dot{q}, \\ \hat{x}_3 &= (a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})q - a_{12}a_{33}\dot{q} + a_{12}a_{23}I. \end{aligned} \quad (12)$$

Из первого уравнения (12), учитывая, что $\dot{q} = a_{12}\dot{q}$, определяется скорость вращения выходного вала электропривода:

$$\dot{q} = \hat{x}_2 + (a_{33} + a_{22})q. \quad (13)$$

С учетом (13) нелинейная составляющая системы (11) может быть получена в виде $\Psi = \text{sign}(\dot{q})$.

Выразив из второго уравнения (12) ток I и подставив его во второе уравнение системы (2), с учетом того, что $\dot{x}_2 = \dot{q}$ и $\dot{q} = a_{12}\dot{q}$, получим:

$$\ddot{q} = \hat{x}_3 + (a_{22} + a_{23})\dot{q} + (a_{23}a_{32} - a_{22}a_{33})q + a_{12}g_2\Psi + a_{12}d_2P. \quad (14)$$

Таким образом, используя ДН (11), а также выражения (13) и (14), в текущие моменты времени удается определять величины суммарных внешних моментов P , действующих на валах всех электроприводов ПМ, а также величины первых $\dot{q}$ и вторых $\ddot{q}$ производных его обобщенных координат, соответственно.

Далее рассмотрим алгоритм построения СКУ для электроприводов ПМ, использующих полученные оценки указанных выше величин.

5. Построение самонастраивающихся корректирующих устройств для электроприводов подводного манипулятора

Согласно [7], модель электропривода (1) может быть представлена в виде нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка с существенно переменными параметрами

$$\bar{A}\ddot{\alpha} + \bar{B}\dot{\alpha} + \bar{C}\alpha + \bar{F}(\alpha, \dot{\alpha}) = \bar{D}u(t), \quad (15)$$

где $\bar{A} = LJ_\Sigma$, $\bar{B} = Lk_\omega + RJ_\Sigma$, $\bar{C} = Rk_\omega + k_\omega k_M$, $\bar{D} = k_u k_M$, $\bar{F} = L\dot{P}^* + R(P^* + M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\alpha}))$, исходя из предположения, что $\frac{d(M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\alpha}))}{dt} = 0$ при движении манипулятора, $P^* = P/i_p$.

Желаемое дифференциальное уравнение электропривода с постоянными номинальными коэффициентами формируется в виде

$$\bar{a}\ddot{\alpha} + \bar{b}\dot{\alpha} + \bar{c}\alpha = \bar{d}\tilde{u}, \quad (16)$$

где $\bar{a} = LJ_N$, $\bar{b} = RJ_N$, $\bar{c} = k_\omega k_M$, $\bar{d} = k_u k_M$; J_N – номинальный момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора; где $\tilde{u}$ – управляющий сигнал, подаваемый на вход СКУ.

После некоторых преобразований с учетом (15) и (16) может быть получен требуемый закон самонастройки в общем виде

$$u = \frac{1}{\bar{D}} \left(\bar{B} - \frac{\bar{A}}{\bar{a}} \bar{b} \right) \ddot{\alpha} + \frac{1}{\bar{D}} \left(\bar{C} - \frac{\bar{A}}{\bar{a}} \bar{c} \right) \dot{\alpha} + \frac{F(\alpha, \dot{\alpha})}{\bar{D}} + \frac{\bar{d}}{\bar{D} \bar{a}} \tilde{u}. \quad (17)$$

Подставляя известные коэффициенты, а также используя оценки P , $\dot{\alpha}$ и $\ddot{\alpha}$ из (11), (13) и (14) закон (17) принимает вид

$$\begin{aligned} u &= \frac{J_\Sigma}{J_N} \tilde{u} + \frac{Lk_v}{k_M k_u} \ddot{\alpha} + \\ &+ \frac{1}{k_M k_u} \left(Rk_\omega + k_\omega k_M \left(1 - \frac{J_\Sigma}{J_N} \right) \right) \dot{\alpha} + \\ &+ \frac{1}{k_M k_u} \left(R(P^* + M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\alpha}(t))) + L\dot{P}^* \right) \end{aligned} \quad (18)$$

Общая схема адаптивной системы управления электроприводами ПМ, включающей в себя описанные ДН и СКУ, показана на рис. 1.

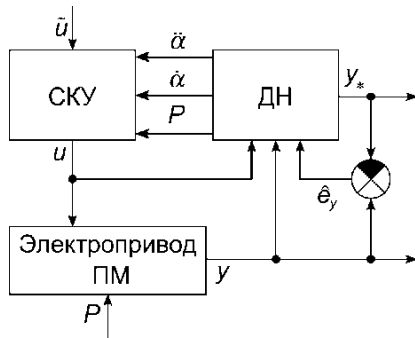


Рис. 1 – общая схема адаптивной системы управления электроприводами ПМ

6. Математическое моделирование

Для исследования разработанной системы было проведено компьютерное моделирование с использованием подводного манипулятора с кинематической схемой типа PUMA (рис. 2). Предполагается, что основание манипулятора жестко зафиксировано, звенья цилиндрические. Для рабочего инструмента (РИ) манипулятора задавалось движение по криволинейной траектории в водном пространстве. При движении манипулятора к выходным валам его электроприводов приводился дополнительный внешний момент, обусловленный взаимовлияниями между движущимися звеньями, действием присоединенных масс и моментов инерции жидкости, а также силами вязкого трения, рассчитываемый при решении ОЗД по известному рекуррентному алгоритму [6]. Для обеспечения заданных показателей качества управления использовался типовой ПИД-регулятор, который задает управляющий сигнал $\ddot{u}$, подаваемый на вход SCU.

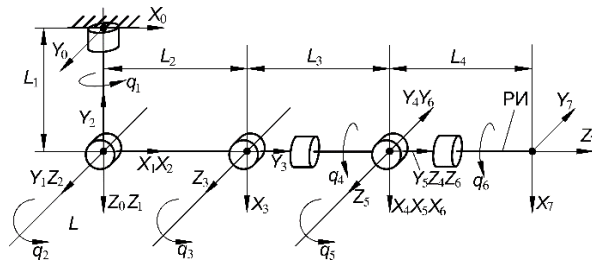


Рис. 2 – Кинематическая схема подводного манипулятора типа PUMA

На рис. 2 введены следующие обозначения: $X_i, Y_i, Z_i, i = \overline{0,7}$ – связанные со звеньями ПМ системы координат, построенные в соответствии с представлением Денавита-Хартенберга [15]; $q_i, i = \overline{1,6}$ – обобщенные координаты ПМ; $L_i, i = \overline{1,4}$ – длины основных звеньев ПМ.

Используемый ПМ имеет следующие параметры (см. рис. 2): длины звеньев $L_1 = 0.05$ м, $L_2 = L_3 = 0.5$ м и $L_4 = 0.25$ м; радиусы сечений звеньев $r_1 = r_2 = r_3 = 0.05$ м, $r_4 = 0.025$ м; массы звеньев $m_1 = 0.4$ кг, $m_2 = m_3 = 4.04$ кг, $m_4 = 0.5$ кг; плавучесть звеньев нейтральная. Параметры жидкости: плотность $\rho = 1028$ кг/м³; динамическая вязкость жидкости $\eta = 1680 \times 10^{-6}$ кг/(м·с); моменты инерции звеньев $T_1 = \text{diag}(0.0003, 0.0003, 0.5)$ кг·м², $T_2 = \text{diag}(0.083, 0.083, 0.005)$ кг·м², $T_3 = \text{diag}(0.083, 0.083, 0.005)$ кг·м², $T_4 = \text{diag}(0.003, 0.003, 0.00016)$ кг·м²;

присоединенные массы жидкости $M_{\Lambda 2} = \text{diag}(0.13, 2.33, 2.33)$ кг, $M_{\Lambda 3} = \text{diag}(2.33, 0.13, 2.33)$ кг, $M_{\Lambda 4} = \text{diag}(0.292, 0.292, 0.0163)$ кг; присоединенные моменты инерции жидкости $T_{\Lambda 2} = \text{diag}(0, 0.031, 0.031)$ кг·м², $T_{\Lambda 3} = \text{diag}(0.031, 0, 0.031)$ кг·м², $T_{\Lambda 4} = \text{diag}(0.001, 0.001, 0)$ кг·м², коэффициенты вязкого трения $k_{P2} = k_{P3} = 0.52$, $k_{P4} = 0.104$, $k_{L2} = k_{L3} = k_{L4} = 0.01$.

Положения центров величин звеньев L_1, L_2, L_3 и L_4 ПМ, соответственно, имеют координаты в связанных с этими звеньями системах координат (см. рис. 2) – $[0.025, 0, 0]^T$ м, $[0.25, 0, 0]^T$ м, $[0, 0.25, 0]^T$ м и $[0, 0, 0.125]^T$ м, а их центров масс – $[0.02, 0, 0]^T$, $[0.2, 0, 0]^T$ м, $[0, 0.2, 0]^T$ м и $[0, 0, 0.1]^T$ м.

Во всех сочленениях ПМ использовались одинаковые электроприводы со следующими параметрами: $R = 0.5$ Ом, $L = 0.01$ Гн, $J_{\Sigma} = J_N = 0.001$ кг·м², $k_u = 35$, $k_v = 0.005$ Н·м·с/рад, $M_{тр} = 0.06$ Н·м, $k_{\omega} = 0.04$ В·с, $k_m = 0.04$ Н·м/А, $i_p = 100$. Коэффициенты ПИД-регулятора: $k_p = 35$, $k_i = 0.01$, $k_d = 5$. Для диагностических наблюдателей была выбрана константа $\tilde{g} = 10^5$.

Для РИ ПМ задавалось пространственной траектории: $x = 0.2 \cos 2t + 0.45$ м, $y = 0.25 \sin t + 0.45$ м, $z = 0.2 \sin 2t + 0.6$ м. Результаты моделирования представлены на рис. 3-8.

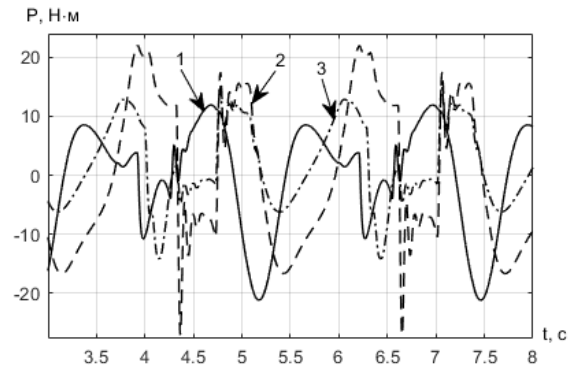


Рис.3 – Оценки величины моментов, действующих в первых трех суставах ПМ

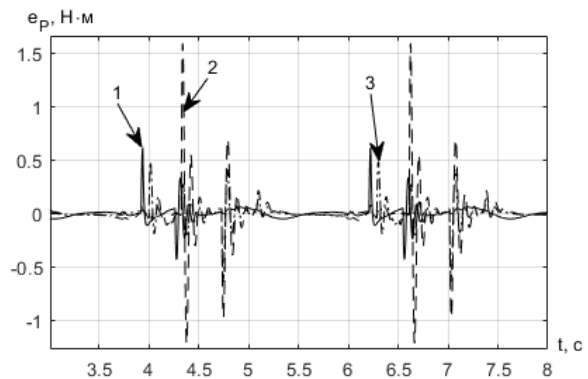


Рис.4 – Ошибка определения величины моментов, действующих в первых трех суставах ПМ

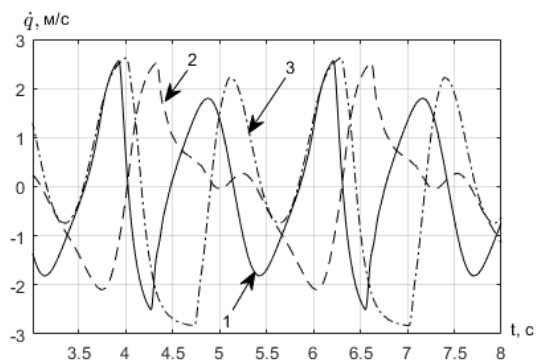


Рис. 5 – Оценки скоростей вращения роторов выходных валов приводов в первых трех суставах ПМ

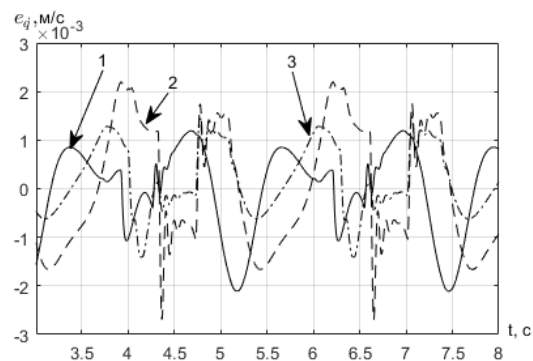


Рис. 6 – Ошибка определения скоростей вращения выходных валов приводов в первых трех суставах ПМ

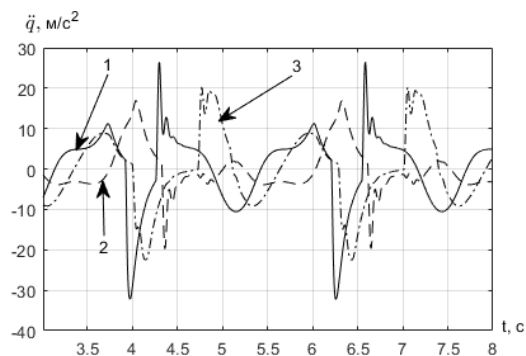


Рис. 7 – Оценки ускорений вращения выходных валов приводов в первых трех суставах ПМ

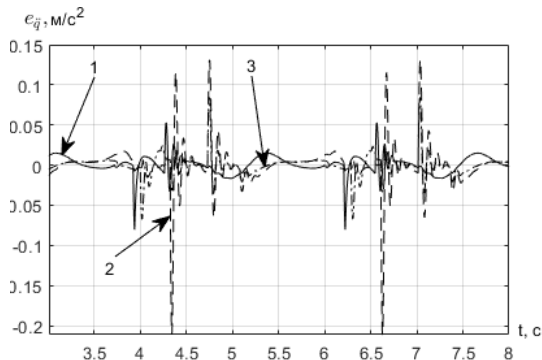


Рис. 8 – Ошибка определения ускорений вращения выходных валов приводов в первых трех суставах ПМ

На рис. 4, 6 и 8 показаны графики ошибок определения значений P , $\dot{q}$, $\ddot{q}$ с помощью ДН (11) и выражений (13), (14) для первых трех степеней подвижности ПМ. Как видно из рисунков, для пиковых значений P (см. рис. 3) относительная ошибка их оценивания не превышает 5%, для $\dot{q}$ (см. рис. 5) – не более 0.1%, и для $\ddot{q}$ (см. рис. 7) – не более 1%. Таким образом, эти оценки могут быть эффективно использованы как для работы адаптивной системы управления приводами манипулятора, так и для решения иных задач.

На рис. 9 показаны графики изменения динамической ошибки $e_{\text{дин}}$ движения РИ ПМ по заданной траектории с использованием разработанной адаптивной системы управления и без нее.

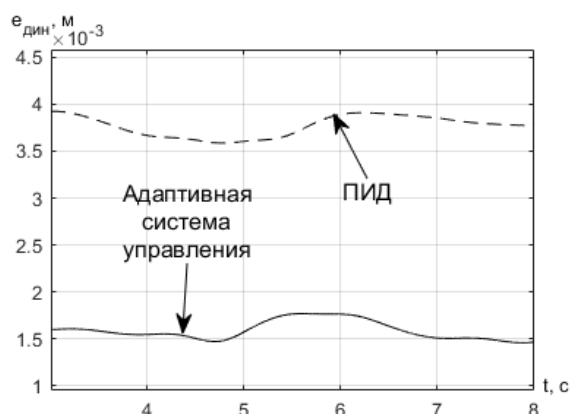


Рис. 9 – Динамическая ошибка движения РИ ПМ по пространственной траектории

Как видно из рисунка, величина этой ошибки при использовании разработанной адаптивной системы управления с использованием оценок неизвестных переменных состояния объекта управления более чем два раза меньше, чем при использовании традиционной системы управления, и не превышает 2 мм.

Заключение

В работе был описан метод построения адаптивных систем управления электроприводами ПМ. При этом для работы таких систем требуется реально измерять только угловые положения выходных валов электроприводов манипулятора, остальные параметры, такие как величины внешнего момента, приводимого к выходным валам электроприводов, скорости и ускорения их вращения, необходимые для качественного и эффективного выполнения технологических операций с помощью АНПА с ПМ в автоматическом режиме, могут быть точно оценены с помощью синтезированных диагностических наблюдателей. Проведенное моделирование показало, что использование таких систем более чем в два раза повышает динамическую точность движения ПМ по заданной пространственной траектории

Литература

1. Griffiths G. Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles. CRC Press, 2003. 368 с.
2. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: изд-во ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.
3. Ehlers F. Autonomous Underwater Vehicles: Design and practice. IET Digital Library, 2020. 592 с.
4. Antonelli G. Underwater Robots. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 279 с.
5. Fossen T.I. Guidance and control of ocean vehicles // Wiley, 1994. 494 с.
6. Филаретов В.Ф. Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53-56.
7. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 304 с.
8. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018. 232 с.
9. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Метод идентификации дефектов в нелинейных системах на основе скользящих наблюдателей. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2021. № 1. С. 11-23.
10. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Сергиенко О., Шумский А.Е. Идентификация дефектов в нелинейных динамических системах и их датчиках на основе скользящих наблюдателей. Автоматика и телемеханика. 2022. № 2. С. 63-89.
11. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers. Automatica. 2007. T. 43. С. 1605-1614.
12. Андреев В.Д., Ивкин А.М., Кулешов В.С. Основы проектирования следящих систем. Под ред. Н. А. Лакоты. Москва: Машиностроение, 1978. 391 с.
13. Жирабок А.Н., Шумский А.Е., Соляник С.П., Суворов А.Ю. Метод построения нелинейных робастных диагностических наблюдателей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 9. С. 34-48.
14. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974. 272 с.
15. Крейг Д.Д. Введение в робототехнику: механика и управление / Д.Д. Крейг. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2013. 564 с.

References

1. Griffiths G. Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles. CRC Press. 2003. 368 p.
2. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Scherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primenenie (Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications). Vladivostok: IPMT DVO RAN. 2018, 368 p. (in Russian)
3. Ehlers F. Autonomous Underwater Vehicles: Design and practice. IET Digital Library. 2020. 592 p.
4. Antonelli G. Underwater Robots. Springer International Publishing Switzerland. 2014. 279 p.
5. Fossen T.I. Guidance and control of ocean vehicles. Wiley. 1994. 494 p.
6. Filaretov V.F. Konoplin A.Yu. The system of automatic stabilization of the underwater vehicle in hover mode with the multi-link manipulator operating. Part 1. *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*. 2014. no. 6. pp. 53-56. (in Russian)
7. Filaretov V.F. Samonastroyayushiesya sistemy upravleniya privodami manipulyatora (Self-adjusting control systems of manipulator electric drives). Vladivostok: DVG TU. 2000. 304 p.
8. Filaretov V.F., Zuev A.V., Gubankov A.S. Upravlenie manipulyatorami pri vypolnenii razlichnykh tekhnologicheskikh operatsiy (Manipulator control during various technological operations). Moscow: Nauka. 2018. 232 p.
9. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. A method for identifying defects in nonlinear systems based on sliding observers. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*. 2021. no. 1. pp. 11-23.
10. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Sergienko O., Shumskiy A.E. Identification of defects in nonlinear dynamic systems and their sensors based on sliding observers. *Avtomatika i telemekhanika*. 2022. no. 2. pp. 63-89.
11. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers. *Automatica*. 2007. vol. 43. pp. 1605-1614.
12. Andreev V.D., Ivkin A.M., Kuleshov V.S. Osnovy proektirovaniya sledyaschih sistem (Fundamentals of servo system design). Ed: N.A. Lakota. Moscow: Mashinostroenie. 1978, 391 p.
13. Zhirabok A.N., Shumskiy A.E., Solyanik S.P., Suvorov A.Yu. Metod postroyeniya nelineynykh robastnykh diagnosticheskikh nablyudateley (A method for constructing nonlinear robust diagnostic observers). *Avtomatika i telemekhanika*. No. 9. pp. 34-48. September 2017. (in Russian)
14. Utkin V.I. Skolzyaschie rezhimy i ih primenenie v sistemah s peremennoy strukturoy (Sliding modes and their application in systems with variable structure). Moscow: Nauka. 1974. 272 p. (in Russian)
15. Kreyg D.D. Vvedenie v robototekhniku: mekhanika i upravlenie (Introduction to Robotics: Mechanics and Control). Izhevsk: Izhevskiy institut kompyuternykh issledovaniy. 2013. 564 p. (in Russian)

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Филаретов Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией робототехнических систем, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690941, Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: filaretov@inbox.ru

Vladimir F. Filaretov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Laboratory of robotic systems, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690941, Russian Federation, e-mail: filaretov@inbox.ru

Зуев Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории робототехнических систем, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690941, Владивосток, ул. Радио, 5, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных информационных систем для морских роботов, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, e-mail: zuev@dvo.ru

Aleksandr V. Zuev, Ph.D. (Eng.), assistant professor, senior researcher of the Laboratory of robotic systems, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690941, Russian Federation, lead researcher of Laboratory of intellectual information systems for marine robots, Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, 690950, Russian Federation e-mail: zuev@dvo.ru

Тимошенко Александр Алексеевич, научный сотрудник лаборатории интеллектуальных информационных систем для морских роботов, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, e-mail: timoshenko.aal@mail.ru

Aleksandr A. Timoshenko, research associate of Laboratory of intellectual information systems for marine robots, Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, 690950, Russian Federation e-mail: timoshenko.aal@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 06.11.2024.

Научная статья

УДК 629.58

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.087>

Использование визуального управления для динамического позиционирования торпедообразных автономных необитаемых подводных аппаратов

Ляшко А.Д.¹ lyasko.sasha@mail.ru¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. В статье рассматривается задача динамического позиционирования автономных подводных необитаемых аппаратов с системой управления. Используется архитектура визуального управления на основе изображения для динамического позиционирования оснащённого монокулярной видеокамерой. Подход визуального управления на основе изображения использует координаты объекта в плоскости изображения в качестве обратной связи и, таким образом, по своей сути устойчив к ошибкам в калибровке камеры и модели объекта. Одна из основных трудностей при реализации системы управления на основе изображения для подводных аппаратов возникает из-за неопределённостей, связанных как с матрицей Якобиана изображения, так и с динамикой объекта. Задача динамического позиционирования рассматривается для автономного необитаемого подводного аппарата, движущего в горизонтальной плоскости при действии возмущающего воздействия. Управление осуществляется с помощью продольной линейной скорости и угловой скорости рыскания, основанных на данных, получаемых от монокулярной видеокамеры о положении центра тяжести найденного на объекте или центра тяжести выбранных ключевых точек дна, с использованием подхода IBVS. Полученные результаты проиллюстрированы компьютерным моделированием.

Ключевые слова: автономные подводные аппараты, динамическое позиционирование, визуальное управление

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, шифр темы FEFM-2024-0015.

Для цитирования: Ляшко А.Д. Использование визуального управления для динамического позиционирования торпедных автономных подводных необитаемых аппаратов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 91—98. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.087

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.087>

Use visual control for dynamic positioning of torpedo - shaped autonomous uninhabited underwater vehicles

Aleksandr D. Liashko¹ lyasko.sasha@mail¹Sevastopol State University, Russian Federation

Abstract. The article discusses the task of dynamic positioning autonomous underwater vehicles with a control system. The image-based visual control architecture for dynamic positioning equipped with a monocular video camera is used. An image-based visual control approach uses the object coordinates in the image plane as feedback and is thus inherently resistant to errors in camera and object model calibration. One of the main difficulties in implementing an image-based control system for underwater vehicles arises from the uncertainties associated with both the Jacobian matrix of the image and the dynamics of the object. The problem of dynamic positioning is considered for an autonomous underwater vehicle moving in the horizontal plane under the action of a disturbing influence. It is controlled using longitudinal linear velocity and yaw angular velocity based on data obtained from a monocular video camera on the position of the centroid found on the object or the centroid of selected key bottom points, using the IBVS approach. The obtained results are illustrated by computer modeling.

Keywords: autonomous underwater vehicles, dynamic positioning, visual control.

Financial Support: The research is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Topic code FEFM-2024-0015.

For citation: Aleksandr D. Liashko, Use visual control for dynamic positioning of torpedo autonomous uninhabited underwater vehicles. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 91—98. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.087

Введение

В данный момент широко применяются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), способные выполнять различные операции, такие как: картографирование, замена деталей подводного оборудования, наблюдение за трубопроводами, обеспечение спасательных и

водолазных работ, осмотр кабелей, поиск подводных объектов, глубоководных исследований и т.д. [1,2].

Под динамическим позиционированием (ДП) понимается автоматическое удержание АНПА в определенной точке или области с использованием двигателей и системы управления. В литературе широко обсуждаются различные методы решения задач динамического позиционирования АНПА, которые работают вблизи морского дна и в качестве

основного датчика используют видеокамеру для определения относительного перемещения между АНПА и объектом [3,5,10]. Преимущество визуального управления состоит в том, что для обнаружения относительного движения АНПА и заданного объекта могут быть использованы недорогие видеокамеры, а не акустические маяки. Кроме того, видеокамеры имеют более высокое разрешение и частоту обновления по сравнению с акустической системой позиционирования. Отметим основные проблемы, связанные с разработкой системы управления ДП АНПА

1. Искажение подводных изображений, связанные с неравномерностью освещенности подводной среды, мутность воды, рассеивание и преломление света при прохождении через неоднородную среду воздух-вода-стекло, ограничение частотного спектра проходящего света, приводящего к поглощению низкочастотных составляющих (красный, желтый) в большей степени, по сравнению со светом более высоких частот (синий, зеленый).

2. Система управления должна функционировать в условиях действия неконтролируемых возмущений, включающих, в частности, течения и неопределенности в задании математических моделей АНПА.

3. Во многих случаях, морское дно является достаточно однородным и выделения на нем ключевых точек интереса достаточно сложная задача.

4. Информация о положении трехмерного объекта, относительно которого выполняется ДП, содержится только в двумерных координатах центраида на плоскости изображения, полученного с помощью Якобиана изображения, используемого в контуре управления.

В настоящей работе предполагается, что АНПА ММТ-300 с неполным приводом может перемещаться в горизонтальной плоскости (ГП) под действием силы тяги и поворотного момента. В качестве возмущающего воздействия рассматривается неизвестное постоянное течение. Система управления ДП АНПА выполняется с использованием монокулярной видеокамеры, установленной на АНПА на основе IBVS (Image Based Visual Servoing) подхода [1,6].

Постановка задачи

В работе рассматривается АНПА ММТ-300 (рис.1), имеющий 4 движителя в кормовой части и 2 подруливающих в носовой части, а также одну донную монокулярную видеокамеру.

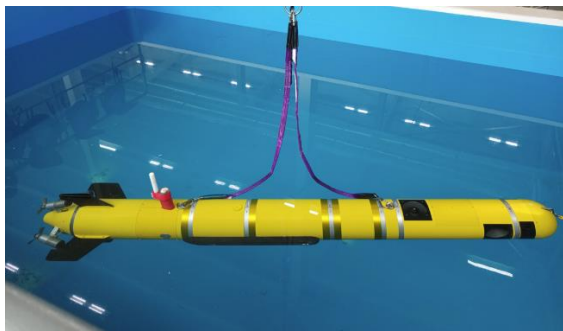


Рис. 1 – АНПА ММТ-300

Модель движения АНПА, перемещающегося под действием силы тяги и поворотного момента в ГП с учетом морского течения, может быть получена используя инерциальную $\{n\}$ и связанную $\{b\}$ системы координат (рис.2). Кинематические и динамические уравнения такой модели описываются уравнениями [7]

$$\dot{\eta} = R(\eta)v, \quad (1.1)$$

$$M \dot{v}_r + C(v_r)v_r + Dv_r = \tau, \quad (1.2)$$

где $\eta = (x, y, \psi)^T$, x, y – координаты центра масс АНПА в $\{n\}$, ψ – курсовой угол, $v = (u, v, r)^T$, u, v, r – продольная, поперечная и угловая скорости АНПА в $\{b\}$, $\tau = (\tau_u, \tau_r)^T$ – вектор управляющих воздействий, $v_r = (u - u_c, v - v_c, r)^T = (u_r, v_r, r)^T$ – скорость АНПА относительно водной среды, u_r, v_r – линейные скорости АНПА относительно течения, u_c, v_c – проекции постоянной скорости течения в $\{b\}$,

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{pmatrix},$$

$$C(v_r) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v_r - m_{23}r \\ 0 & 0 & m_{11}u_r \\ m_{22}v_r + m_{23}r & -m_{11}u_r & 0 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{pmatrix}, s\psi = \sin(\psi), c\psi = \cos(\psi).$$

Рассмотрим АНПА с монокулярной камерой, наблюдающей морское дно (рис.2) и описываемый моделью заданной системой (1). Требуется выбрать управление τ , таким образом чтобы АНПА оставался в окрестности заданной точки в течение произвольного промежутка времени при действии постоянного течения, наблюдая за положением центраида объекта или центраида выбранных ключевых точек на морском дне.

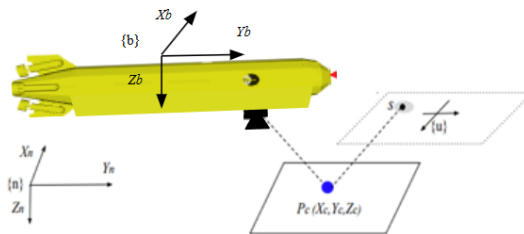


Рис. 2 – АНПА с видеокамерой

Модель АНПА

На кинематическом уровне скорости u_r и r рассматриваются как управляющие воздействия. Задача управления заключается в регулировании координат x, y, ψ , для обеспечения ДП вблизи заданной позиции. Для малогабаритного АНПА,

кинематическая модель может быть адекватна реальному объекту.

Пренебрегая поперечной скоростью V_r , уравнение кинематики (1.1) в скалярной форме могут быть представлены в виде

$$\begin{cases} \dot{x} = c\psi u_r + v_{cx}, \\ \dot{y} = s\psi u_r + v_{cy}, \\ \dot{\psi} = r, \end{cases} \quad (2)$$

где $v_{cx} = u_c c\psi - v_c s\psi$, $v_{cy} = u_c s\psi + v_c c\psi$, $v_c = V_c c(\beta_c - \psi)$, V_c – скорость течения, β_c – угол, определяющий направление течения.

Далее, без ограничения общности, предполагается, что оптический центр камеры совпадает с центром масс АНПА и системы координат камеры $\{q\}$ и связанной $\{b\}$ совпадают. Обозначим координаты центра в начальном положении камеры $s_c = (x_c, y_c)^T$ и s – текущем в $\{q\}$.

$$s = \tilde{R}^T(\psi)(x_c - x, y_c - y)^T = (p, q)^T,$$

где

$$\tilde{R}(\psi) = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi \\ s\psi & c\psi \end{pmatrix}$$

Введем в рассмотрение ошибку на текущем изображении

$$e = s - s_c = (e_x, e_y)^T.$$

Применение метода IBVS [1] для управления продольной и угловой скоростями камеры, в сочетании с пропорционально – интегральным регулятором, обеспечивает

$$\tau = (\tau_u, \tau_r)^T = -L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1, 0)^T), \quad (3.1)$$

$$\dot{\sigma} = e_x, \quad (3.2)$$

где $k_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}) > 0$, $k_i > 0$, – скаляр, Z_c – расстояние от центра изображения до дна (предполагается известным), $L(s, Z_c)$, $L^{-1}(s, Z_c)$ – матрица Якоби изображения и ее обратная, определяемые выражениями

$$L(s, Z_c) = \begin{pmatrix} -1/Z_c & q \\ 0 & -p \end{pmatrix}, \quad L^{-1}(s, Z_c) = -\begin{pmatrix} Z_c & Z_c q/p \\ 0 & 1/p \end{pmatrix}.$$

Преобразовывая (2), (3.1) с помощью замены координат

$$\begin{aligned} x_c - x &= \rho c(\psi + \beta), & y_c - y &= \rho s(\psi + \beta), \\ \rho &= ((x_c - x)^2 + (y_c - y)^2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

Получим

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -u_r c\beta - V_c c(\beta + \psi - \beta_c), \\ \dot{\beta} = -r + u_r s\beta / \rho + V_c s(\beta + \psi - \beta_c) / \rho, \\ \dot{\psi} = r, \end{cases} \quad (5)$$

$$L^{-1}(s, Z_c) = -\begin{pmatrix} Z_c & Z_c \text{tg}\beta \\ 0 & 1/(\rho c\beta) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$e = \begin{pmatrix} \rho c\beta - x_c \\ \rho s\beta - y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Используя векторно-матричные обозначения в (5-7), получим замкнутую систему

$$\dot{z} = A(z)L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1, 0)^T) + \xi(z)V_c, \quad (8.1)$$

$$\dot{\sigma} = e_x, \quad (8.2)$$

где $z = (\rho, \beta, \psi)^T$,

$$A(z) = \begin{pmatrix} -c\beta & 0 \\ \frac{1}{\rho} s\beta & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \xi(z) = \begin{pmatrix} -c(\psi + \beta - \beta_c) \\ \frac{1}{\rho} s(\psi + \beta - \beta_c) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Из вида правых частей системы (8) и соотношений

$$\begin{aligned} e_x^d &= \rho_d c\beta_d - x_c = 0, & e_y^d &= \rho_d s\beta_d - y_c = 0, \\ \psi_d &= \beta_c + \pi \end{aligned} \quad (9)$$

следует, что при $v_c = 0$, $\sigma = 0$ она имеет решение, обеспечивающее ДП АНПА

$$\rho_d = (x_c^2 + y_c^2)^{1/2}, \quad \beta_d = \arctg(y_c / x_c),$$

Таким образом, управление (3) должно обеспечивать небольшие значения или стремление к нулю отклонений $|\rho - \rho_c|$, $|\beta - \beta_c|$, $|\psi - \beta_c + \pi|$ при $t \rightarrow \infty$.

Рассмотрим динамическую модель торпедообразного АНПА ММТ-300 с носкорма симметрией, с учетом действия постоянного течения. Система уравнений (1) в скалярной форме с M и D диагональными матрицами [7], дополненная интегратором может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -u_r c\beta - v_r s\beta - V_c c(\beta - \psi - \beta_c), \\ \dot{\beta} = -r + \frac{u_r}{\rho} s\beta - \frac{v_r}{\rho} c\beta + \frac{V_c}{\rho} s(\beta + \psi - \beta_c), \\ \dot{\psi} = r, \\ \dot{\sigma} = e_x, \\ \dot{v}_r = a_v v_r + c_2 r u_r + c_3 u_r v_r, \\ \dot{u}_r = a_u u_r + c_1 r v_r + b_u \tau_u, \\ \dot{r} = a_r r + c_4 u_r v_r + b_v \tau_r. \end{cases} \quad (10)$$

Применяя векторно-матричные обозначения, представим (10) в следующей эквивалентной форме

$$\begin{cases} \dot{z} = A(z)q + \tilde{\xi}(z)v_r + \xi(z)V_c, \\ \dot{\sigma} = e_x, \\ \dot{v}_r = a_v v_r + c_2 r u_r + c_3 u_r v_r, \\ \dot{u}_r = a_u u_r + c_1 r v_r + b_u \tau_u, \\ \dot{r} = a_r r + c_4 u_r v_r + b_v \tau_r, \end{cases} \quad (11)$$

где

$$q = (u_r, r)^T, \quad z = (\rho, \beta, \psi)^T, \\ z = (\rho, \beta, \psi)^T, \quad A(z) = \begin{pmatrix} -c\beta & 0 \\ \frac{1}{\rho} s\beta & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ \xi(z) = \begin{pmatrix} -c(\psi + \beta - \beta_c) \\ \frac{1}{\rho} s(\psi + \beta - \beta_c) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\xi}(z) = \begin{pmatrix} -s\beta \\ \frac{1}{\rho} c\beta \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим систему (10) под действием управления

$$\tau = (\tau_u, \tau_r)^T = \frac{1}{\varepsilon} \{ L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1,0)^T - (u_r, r)^T) \}' \quad (12)$$

где $\varepsilon > 0$ – малый параметр.

Нас интересуют условия устойчивости решения

$$\rho_d = (x_c^2 + y_c^2)^2, \quad \beta_d = \arctg\left(\frac{y_c}{x_c}\right), \\ \psi_d = \beta_c + \pi, \quad u_{rd} = 0, \quad v_{rd} = 0 \quad (13)$$

замкнутой системы (11) при управлении (12).

Подставляя (12) в (11), получим замкнутую сингулярно возмущенную систему

$$\begin{cases} \dot{z} = A(z)q + \tilde{\xi}(z)v_r + \xi(z)V_c, \\ \dot{\sigma} = e_x \\ \dot{v}_r = a_v v_r + c_2 r u_r + c_3 u_r v_r, \\ \varepsilon \begin{pmatrix} \dot{u}_r \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \varepsilon \begin{pmatrix} a_u u_r \\ a_r r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_u & 0 \\ 0 & b_t \end{pmatrix} * \\ * \{ L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1,0)^T - (u_r, r)^T) \} + \varepsilon F_{ur}. \end{cases} \quad (14)$$

Для этой системы выполняются условия теоремы Тиханова на бесконечном интервале времени [9]. Полагая в (14) $\varepsilon = 0$, получим вырожденную систему

$$\begin{cases} \dot{z} = A(z)q + \tilde{\xi}(z)v_r + \xi(z)V_c \\ \dot{\sigma} = e_x \\ \dot{v}_r = a_v v_r + c_2 r u_r + c_3 u_r v_r \\ 0 = \{ L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1,0)^T - (u_r, r)^T) \}. \end{cases} \quad (15)$$

Откуда находим

$$(u_r, r)^T = L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1,0)^T). \quad (16)$$

Уравнения пограничного слоя для системы (10) определяются выражениями

$$\begin{pmatrix} \frac{du_r}{dv} \\ \frac{dv}{dr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_u & 0 \\ 0 & b_t \end{pmatrix} \left\{ L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1,0)^T - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_r \\ r \end{pmatrix} \right\}, \quad (17)$$

которая имеет экспоненциально устойчивое решение (16), если $b_u > 0$, $b_r > 0$.

Подставляя (16) в (15), получим систему пониженного порядка

$$\begin{cases} \dot{z} = A(z)L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1,0)^T + \\ + \tilde{\xi}(z)v_r + \xi(z)V_c, \\ \dot{\sigma} = e_x, \\ \dot{v}_r = a_v v_r + F_v(z, v_r), \end{cases} \quad (18)$$

где $F_v(z, v_r) = o(x)$, $x \rightarrow 0$, $x = (z^T, v_r)^T$. Докажем, что ее решение.

$$\rho_d = (x_c^2 + y_c^2)^2, \quad \beta_d = \psi_d + \arctg\left(\frac{y_c}{x_c}\right), \\ \psi_d = \beta_c + \pi, \quad \sigma_d = \tilde{\rho}, \quad v_{rd} = 0 \quad (19)$$

экспоненциально асимптотически устойчиво при $V_c = 0$.

Система () в отклонениях от желаемого движения может быть выражена следующим образом

$$\begin{cases} \dot{q} = \bar{A}(z_d)q + \tilde{\xi}(z_d)v_r + \xi(z_d)V_c + F(q), \\ \dot{v}_r = a_v v_r + \tilde{F}_v(q, v_r), \end{cases} \quad (20)$$

где $q = (\rho, \beta, \psi, \sigma)^T$,

$$\bar{A}(z_d) = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{pmatrix}, \quad A_{11} = \bar{A}(z_d), \\ A_{12} = -V_c(s\beta, \frac{c\beta}{\rho}, 0)^T, \quad A_{21} = k_2(\frac{tg\beta}{\rho}, k_2, 0),$$

$$\xi(z_d) = \begin{pmatrix} c\beta_d \\ -s\beta_d / \rho_d \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\xi}(z_d) = \begin{pmatrix} -s\beta_d \\ \frac{1}{\rho_d} c\beta_d \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$F(q) = o(\|q\|), \quad q \rightarrow 0.$$

$$\tilde{F}_v(q, v_r) = o(x), \quad x \rightarrow 0, \quad x = (q^T, v_r)^T.$$

Теперь предположим, что управление в (11) задается следующим выражением.

$$\tau = (\tau_u, \tau_r)^T = L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1, 0)^T). \quad (21)$$

Подстановка (21) в (11) дает

$$\begin{cases} \dot{z} = A(z)q + \tilde{\xi}(z)v_r + \xi(z)V_c, \\ \dot{\sigma} = e_x, \\ \dot{v}_r = a_v v_r + c_2 r u_r + c_3 u_r v_r, \\ \begin{pmatrix} \dot{u}_r \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_u u_r \\ a_r r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_u & 0 \\ 0 & b_r \end{pmatrix} L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma(1, 0)^T). \end{cases} \quad (22)$$

Вводя замену $p = ((z - z_d)^T, \sigma - \sigma_d, v_r, u_r, r)^T$, представим систему (34) в виде

$$\dot{p} = A(p_d)p + F(p) + bV_c, \quad (23)$$

где

$$A = A(p_d) = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & A_3 & 0 \\ A_4 & A_5 & A_6 \end{pmatrix},$$

$$F(p) = o(\|p\|), \quad p \rightarrow 0,$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & -V_c s\beta & -V_c s\beta \\ -V_c \frac{s\beta}{\rho^2} & -V_c \frac{c\beta}{\rho} & V_c c\beta \frac{1}{\rho} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} -c\beta & -s\beta & 0 \\ \frac{s\beta}{\rho} & \frac{c\beta}{\rho} & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A_3 = (c\beta, -\rho s\beta, 0),$$

$$A_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ - (Z_c(k_1 c^2 \beta + k_2 s^2 \beta)) / \rho & Z_c \rho s\beta (k_1 - k_2) \\ -k_2 \tan \beta / \rho & -k_2 \end{pmatrix},$$

$$B = \text{diag}(b_u, b_v),$$

$$A_6 = (0, k_i Z_c, 0)^T, \quad A_4 = \text{diag}(a_v, a_u, a_r),$$

$$b = \begin{pmatrix} -s\beta_d \\ \frac{1}{\rho_d} c\beta_d \\ 0_{5 \times 1} \end{pmatrix}.$$

Сделаем замену переменных

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} = -\bar{A}^{-1}(z_d) \begin{pmatrix} c\beta_d \\ -s\beta_d / \rho_d \end{pmatrix} V_c + \begin{pmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{p}_2 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

приводящую систему к однородной форме. Из вида правых частей (23), после замены (24), вытекают условия устойчивости нулевого решения при $V_c = 0$ по первому приближению и следующее утверждение. Для построения закона управления (21) необходима только информация о положении центраида объекта и значение курсового угла.

Результаты моделирования

Для исследования предложенного метода динамического позиционирования с визуальным управлением АНПА было проведено математическое моделирование. Для этого в среде MATLAB была разработана модель, описывающая кинематику и динамику АНПА в соответствии с моделью (1). Параметры АНПА, характеристики, регулятора, камеры, координаты центраида приведены в таблице 1. Предполагается, что в начальный момент времени носовая часть АНПА направлена под некоторым углом к течению и направление течения примерно известно.

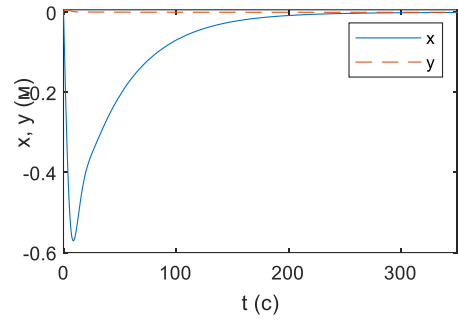


Рис. 3 – Координаты АНПА

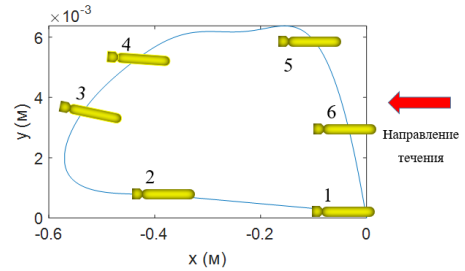


Рис. 4 - Траектория движения АНПА и его ориентация относительно течения (при $\beta = 180^\circ$)

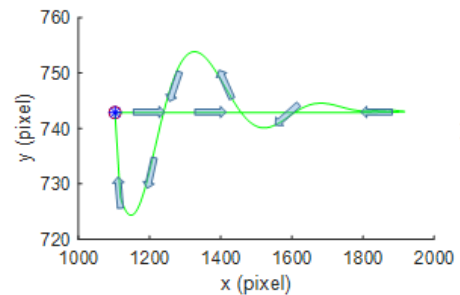


Рис.5 - Траектория движения центраида на изображении (при $\beta = 180^\circ$)

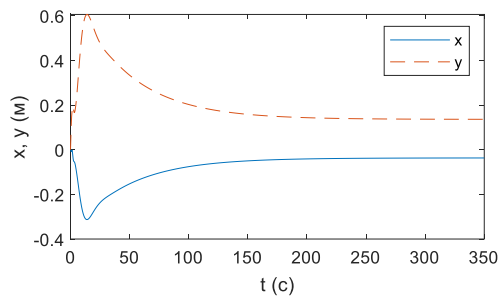


Рис. 6 – Координаты АНПА

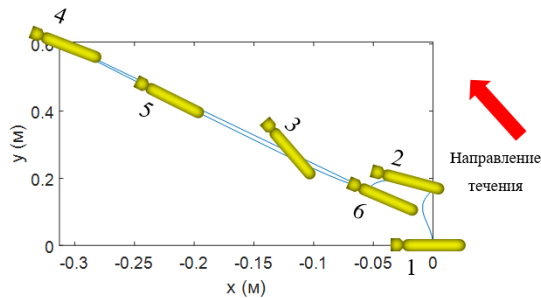


Рис.7 - Траектория движения АНПА и его ориентация относительно течения (при $\beta = 105^\circ$)

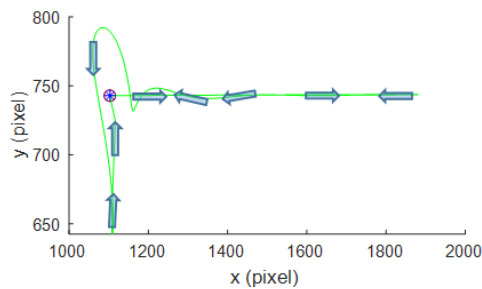


Рис.8 - Траектория движения центра на изображении (при $\beta = 105^\circ$)

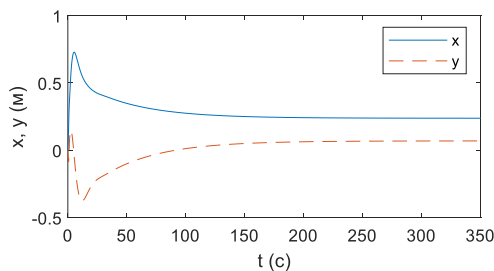


Рис. 9 – Координаты АНПА

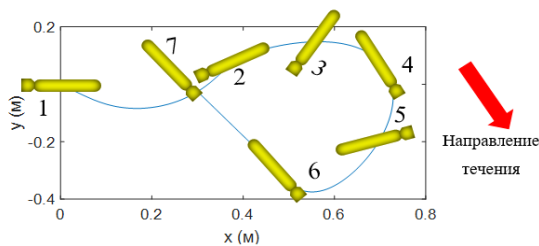


Рис.10 - траектория движения АНПА и его ориентация относительно течения (при $\beta = -50^\circ$)

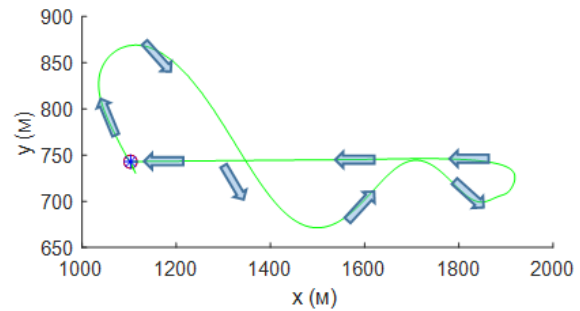


Рис.11 - Траектория движения центра на изображении (при $\beta = 105^\circ$)

На рисунках 3-11 представлены результаты моделирования с использованием управления (21). Исходя из рисунков 3-8, АНПА подвояжая воздействию подводного течения, совершает маневр с целью вернуться в исходное положение и удерживать центр на изображении, не совершая при этом разворота. Даже при значительных изменениях направления течения на 62 и -50 градусов от противоположного направления относительно продольной оси и носа АНПА, система управления обеспечивает динамическое позиционирование, возвращая АНПА в исходную точку пиксельной системы координат камеры. После завершения переходного процесса, продолжительностью около 30 секунд, расстояние до центра в инерциальной системе координат возвращается к исходному значению, а нос АНПА направлен навстречу течению.

Таблица 1.

Параметры для моделирования.

Модель АНПА ММТ-300	$m_{11} = 165, m_{22} = 360,58, m_{33} = 286.05, m_{23} = 0, m_{32} = 0, d_{11} = 3.24, d_{22} = 2.42, d_{33} = 100.1, d_{23} = 0, d_{32} = 0.$
Параметры камеры	Размер пикселя - $\Delta = 5.6e - 6$ м; координаты центра изображения - (600, 960); фокусное расстояние - $f = 8$ мм.
Координаты центра	(0.1, 0.7, 1) м.
Параметры регулятора и скорость течения	$k_{p1} = 5, k_{p2} = 100, k_i = 0.3 ; v_c = 0.4$ м/с.
Длина АНПА	$L = 3,081$ м.
Радиус АНПА	$r = 0,147$ м.
Масса АНПА	$m = 150$ кг.

Заключение

Рассмотрена задача ДП АНПА с неполным приводом в ГП при действии постоянного течения. Разработаны и исследованы алгоритмы управления продольной скоростью и угловой скоростью рыскания, основанные на данных, поступающих от монокулярной видеокамеры о положении центра целевого объекта или центра выделенных ключевых точек дна, с применением метода IBVS. Управление действует таким образом, чтобы после окончания переходного процесса текущие и

начальные координаты АНПА совпадали в плоскости изображения, а его носовая часть была направлена навстречу течению. Такое поведение АНПА обеспечивается существованием решения замкнутой нелинейной системы управления, которая включает кинематику, динамику АНПА и представление матрицы Якоби изображения, необходимых для динамического позиционирования.

Предложенные алгоритмы не требуют измерения или оценки величины и направления течения с использованием наблюдателей. Показано, что для компенсации действия постоянного течения (точнее, его проекций на координатные оси) достаточно использовать комбинацию матрицы Якоби с пропорциональным регулятором, включающим только один интегратор.

Литература

1. Sørensen A.J. A survey of dynamic positioning control systems // Annual Reviews in Control. Trondheim. Norway, 2011. Vol. 35 (1). P. 123–136.
2. Chao-Lin K., Long-Yi C., Ying-Che K., Chia-Hung L., Kuei-Mei L. Visual servo control for the underwater robot station-keeping // International Conference on Applied Electronics. Kaohsiung, Taiwan. 2017. P.1 – 4
3. Gao J., Proctor A., Bradley C. Adaptive neural network visual servo control for dynamic positioning of underwater vehicles // Neurocomputing. 2015. Vol. 167. P.604–613.
4. Caccia V., Vision-based ROV horizontal motion control: Near-seafloor experimental results. Control Eng. Pract. 2007. 15(6). P. 703-714.
5. Hua M.D., Allibert G., Krupinski S., Hame T.I. Homography-based visual servoing for autonomous underwater vehicles. Proceedings of the 19 th IFAC World Congress. 2014. Vol. 19, P.5726-5733.
6. Chaumette F., Hutchinson S. Visual servo control. I. Basic approaches // IEEE Robotics Automation Magazine. 2006. Vol.13(4). P. 82–90.
7. Fossen T.I., Marine Control Systems, Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles // Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, 2002. P. 570.
8. Agular A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents, International Journal of Control. 80(7): 1092-1108, 2007.
9. Lobry C., Sari T. and Touhami A., On Tykhonov's theorem for convergence of solutions of slow and fast systems, Electronic J. Differential Equat. 1998. No. 19. PP 1-22.
10. Zaopeng D., Wan L., Yueming L. Point Stabilization for an Underactuated AUV in the Presence of Ocean Currents // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. Vol. 12(7).

References

1. Sørensen A.J. A survey of dynamic positioning control systems // Annual Reviews in Control. Trondheim. Norway, 2011. Vol. 35 (1). P. 123–136.
2. Chao-Lin K., Long-Yi C., Ying-Che K., Chia-Hung L., Kuei-Mei L. Visual servo control for the underwater robot station-keeping // International Conference on Applied Electronics. Kaohsiung, Taiwan. 2017. P.1 – 4
3. Gao J., Proctor A., Bradley C. Adaptive neural network visual servo control for dynamic positioning of underwater vehicles // Neurocomputing. 2015. Vol. 167. P.604–613.
4. Caccia V., Vision-based ROV horizontal motion control: Near-seafloor experimental results. Control Eng. Pract. 2007. 15(6). P. 703-714.
5. Hua M.D., Allibert G., Krupinski S., Hame T.I. Homography-based visual servoing for autonomous underwater vehicles. Proceedings of the 19 th IFAC World Congress. 2014. Vol. 19, P.5726-5733.
6. Chaumette F., Hutchinson S. Visual servo control. I. Basic approaches // IEEE Robotics Automation Magazine. 2006. Vol.13(4). P. 82–90.
7. Fossen T.I., Marine Control Systems, Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles // Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, 2002. P. 570.
8. Agular A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents, International Journal of Control. 80(7): 1092-1108, 2007.
9. Lobry C., Sari T. and Touhami A., On Tykhonov's theorem for convergence of solutions of slow and fast systems, Electronic J. Differential Equat. 1998. No. 19. PP 1-22.
10. Zaopeng D., Wan L., Yueming L. Point Stabilization for an Underactuated AUV in the Presence of Ocean Currents // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. Vol. 12(7).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ляшко Александр Дмитриевич, аспирант, кафедры информатики и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 Университетская ул., 33, e-mail: lyasko.sasha@mail.ru

Liashko D. Aleksandr, postgraduate student, Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol State University, 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 Universitetskaya str., 33, e-mail: lyasko.sasha@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 17.12.2024.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 532.5:519.63

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.084>

Моделирование влияния неоднородности стратификации на поле внутренних волн в океане

Князьков Д.Ю.¹ knyaz@ipmnet.ru

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Аннотация. В работе исследуется распространение внутренних гравитационных волн в идеальной стратифицированной жидкости, порождаемых взаимодействием течения с подводным препятствием. Рассмотрен случай переменной по глубине стратификации. Разработан численный алгоритм и компьютерная программа, позволяющие рассчитывать поля скоростей, смещений, давление в толще жидкости. Компьютерная программа верифицировалась путем сравнения результатов расчетов с известными асимптотиками дальнего поля для случаев движения массового источника в однородно стратифицированной жидкости горизонтально (B. Voisin) или под углом к горизонту (M.M. Scase, S.B. Dalziel). С помощью разработанной компьютерной программы исследуется влияние неоднородности стратификации на поле внутренних волн. Рассмотрен случай, когда значение стратификации в некотором горизонтальном слое в несколько раз отличается от стратификации в остальной области, при этом этот скачок стратификации задается сглаженной ступенчатой функцией. С помощью аналитически заданной функции моделировалось непрерывное распределение стратификации, когда зависимость стратификации от глубины имела форму сезонного термоклина. Было показано, что наличие слоя скачка стратификации существенно ослабляет поле внутренних волн в случае, когда источник возмущения находится ниже, а плоскость наблюдения выше этого слоя. Были проведены расчеты для переменной по глубине стратификации, когда вид профиля зависимости частоты плавучести от глубины задавался на основе данных натурных измерений. Было установлено сильное влияние неоднородности стратификации на картину распространения внутренних гравитационных волн.

Ключевые слова: гравитационные волны, стратифицированная жидкость, идеальная жидкость, поле скоростей, внутренние волны в океане, термоклин, обтекание, численное моделирование

Благодарности: автор выражает благодарность Шамееву А.С. и Байдулову В.Г. за постановку задачи и полезные обсуждения. Часть расчетов выполнялась с использованием вычислительных кластеров Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (МСЦ РАН), г. Москва. Автор выражает глубокую признательность руководству и сотрудникам МСЦ РАН, предоставившим возможность и техническую поддержку этих расчетов

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-61-00025, <https://rscf.ru/project/24-61-00025/>

Для цитирования: Князьков Д.Ю. Моделирование влияния неоднородности стратификации на поле внутренних волн в океане. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 99—106. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.084

Research article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.084>

Modelling the effect of the heterogeneity of stratification on the field of internal waves in the ocean

Dmitri I.U. Knyazkov¹ knyaz@ipmnet.ru

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers the propagation of internal gravitational waves in an ideal stratified fluid generated by the interaction of a current with an underwater obstacle. The case of a variable in depth stratification is considered. The numerical algorithm and the computer program have been developed that allow calculating velocity fields, displacements, and pressure in the thickness of the fluid. The computer program is verified by comparing the calculation results with known far-field asymptotics for the cases of motion of a mass source in a homogeneously stratified fluid horizontally (B. Voisin) or at an angle to the horizon (M.M. Scase, S.B. Dalziel). Using the developed computer program, the influence of the heterogeneity of stratification on the field of internal waves is investigated. The case is considered when the value of stratification in a certain horizontal layer differs several times from stratification in the rest of the region, while this jump in stratification is set by a smoothed step function. A continuous distribution of stratification is modeled using an analytically defined function, when the dependence of stratification on depth took the form of a seasonal thermocline. It has been shown that the presence of a stratification jump layer significantly weakens the field of internal waves in the case when the source of the disturbance is below and the observation plane is above this layer. Calculations are carried out for the variable in depth stratification, where the profile of the dependence of the buoyancy

frequency on the depth is set based on field measurements. The strong influence of the heterogeneity of stratification on the pattern of propagation of internal gravitational waves has been established.

Keywords: gravitational waves, stratified fluid, ideal fluid, velocity field, internal waves in the ocean, thermocline, flow around, numerical simulation

Acknowledgments: the author expresses deep gratitude to Shamaev A.S. and Baydulov V.G. for setting the problem and useful discussions. Some calculation results were obtained with the use of computing clusters of the Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences (JSCC RAS). The author expresses deep gratitude to the management and staff of JSCC RAS

Financial Support: The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 24-61-00025, <https://rscf.ru/en/project/24-61-00025/>

For citation: Dmitri I.U. Knyazkov. Modelling the effect of the heterogeneity of stratification on the field of internal waves in the ocean. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 99—106. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.084

Введение

Одним из активно развивающихся направлений в задаче томографии океана [1] является получение информации о процессах в толще воды по результатам активного или пассивного радиозондирования его поверхности. Характеристики подводных источников возмущений (неровностей дна, подводных кабелей или трубопроводов, косяков промысловых рыб) могут быть найдены по влиянию порожденных ими гравитационных волн на распределение солёности в толще жидкости [2] или на поверхностное ветровое волнение [3, 4], изменение которого в свою очередь может быть зафиксировано средствами радиозондирования [1, 5]. Важным элементом в решении задачи томографии океана является разработка и реализация численных методов моделирования распространения внутренних волн в толще океана.

Распространения внутренних волн исследуется в большом количестве работ аналитически [6–8], численно [6, 9, 10], экспериментально [11]. Как правило в этих работах жидкость считается равномерно стратифицированной (частота плавучести постоянна), однако экспериментальные исследования океана показывают, что частота плавучести непостоянна по глубине, меняется от сезона к сезону на данном участке океана, зависит от текущих профилей солёности и температуры воды, от наличия загрязнений [12–14]. Таким образом, при моделировании распространения гравитационных волн в океане важное значение имеет возможность моделировать жидкость с произвольной по глубине стратификацией.

1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу моделирования распространения внутренних гравитационных волн в стратифицированной идеальной жидкости. Считаем, что изменения плотности жидкости по отношению к базовой стратификации малы, поэтому для записи уравнения движения можно воспользоваться приближением Буссинеска, и уравнение на внутренний потенциал $\psi(x, t)$ примет вид [6, 15]

$$\Delta \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + N(z)^2 \Delta_{xy} \psi = f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0 - \mathbf{V}t), \quad \mathbf{x} \in \Omega \quad (1)$$

в декартовой системе координат $Oxyz$, в области $\Omega = [x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}] \times [-H, H]$ с граничным условием

$$\psi = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega, \quad (2)$$

где $\mathbf{V} = (a, b, c)$ — скорость движения источника возмущения, $N(z)$ — частота плавучести, $\Delta_{xy} = \partial_x^2 + \partial_y^2$. Функция f , определяющая массовый источник в правой части (1), задана следующим образом:

$$f(x, y, z) = \frac{BA^3}{\sqrt{\pi^3}} e^{-A^2(x^2+y^2+z^2)},$$

где A, B — некоторые константы. Заметим, что $\int_{\mathbb{R}^3} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = B$. В начальный момент времени

$$\psi|_{t=0} = 0 \quad (3)$$

Задача (1)–(3) корректна [16], точные утверждения о существовании и единственности классических решений для случая $N = \text{const}$ можно найти в [17]. Зная внутренний потенциал $\psi(\mathbf{x}, t)$, можно найти давление $P(\mathbf{x}, t)$,

$$P = -\rho_0 \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + N^2 \right) \frac{\partial}{\partial t} \psi, \quad (4)$$

вертикальное смещение жидкости $\zeta(\mathbf{x}, t)$,

$$\zeta = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial z} \psi, \quad (5)$$

скорость жидкости $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$:

$$\mathbf{v} = \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla + N^2 \nabla_{xy} \right) \psi, \quad (6)$$

где $\nabla_{xy} = (\partial_x, \partial_y, 0)$.

2. Описание метода решения

2.1 Численная схема

Для решения краевой задачи (1)–(3) в области Ω используется неявная разностная схема на равномерной расчетной сетке, состоящей из $N_x \times N_y \times N_z$ узлов. Обозначим

$$\psi_{m,n,k}^s = v_z(x_{\min} + h(m-1), y_{\min} + h(n-1), -H + h(k-1), qs),$$

$$f(m, n, k, s) = f(x_{\min} + h(m-1), y_{\min} + h(n-1), -H + h(k-1), qs),$$

где $m = 1, \dots, N_x$, $n = 1, \dots, N_y$, $k = 1, \dots, N_z$, $s = 2, \dots, T/q$, h — шаг по пространству, q — шаг по времени. На каждом шаге по времени s решается система линейных алгебраических уравнений

$$Q\psi^{s+1} = r^s \quad (7)$$

для неизвестных $\psi_{m,n,k}^{s+1}$, $m = 1, \dots, N_x$, $n = 1, \dots, N_y$, $k = 1, \dots, N_z$. Для аппроксимации вторых производных по времени и по пространственным переменным в (1) используются центральные разности:

$$\frac{\Delta_{xyz}\psi(q(s+1)) - 2\Delta_{xyz}\psi(qs) + \Delta_{xyz}\psi(q(s-1))}{q^2} + \Delta_{xy}\psi(qs) = f(m, n, k, s).$$

Здесь Δ_{xyz} , Δ_{xy} — соответствующие разностные операторы по пространственным переменным. Таким образом, внутри области Ω , то есть для $1 < m < N_x$, $1 < n < N_y$, $1 < k < N_z$ имеем:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h^2 q^2} (\psi_{m-1,n,k}^{s+1} + \psi_{m+1,n,k}^{s+1} + \psi_{m,n-1,k}^{s+1} + \\ & + \psi_{m,n+1,k}^{s+1} + \psi_{m,n,k-1}^{s+1} + \psi_{m,n,k+1}^{s+1} - 6\psi_{m,n,k}^{s+1}) = \\ & = -\frac{2\Delta_{xyz}\psi(qs) + \Delta_{xyz}\psi(q(s-1))}{q^2} - \Delta_{xy}\psi(qs) + \\ & + f(m, n, k, s) \end{aligned} \quad (8)$$

На границе области $\partial\Omega$, то есть для $m = 1$, $m = N_x$, $n = 1$, $n = N_y$, $k = 1$, $k = N_z$ из условия (2) имеем:

$$\psi_{m,n,k}^{s+1} = 0 \quad (9)$$

Коэффициенты матрицы Q системы (4) определяются левыми частями соотношений (8) и (9), а вектор правой части r^s — правыми частями этих соотношений.

2.2 Компьютерная реализация метода

Для решения задачи (1)–(3) на языке программирования C++ была написана компьютерная программа. Эта программа позволяет моделировать распространение гравитационных волн от движущегося источника, рассчитывать изменение во времени вертикального смещения (5), давления (4), скорости жидкости (6). Для решения получающейся на каждом шаге по времени системы линейных уравнений (7) используется обобщенный метод минимальной невязки (Generalized minimal residual method, GMRES) [18]. Матрица системы Q разреженная, в каждой ее строке не более семи ненулевых элементов. На рис. 1 показан пример уменьшения невязки $e(s, j)$ в процессе итерационного решения системы (4) на s -ом шаге по времени:

$$e(s, j) = \frac{\|Q\psi^{s+1,j} - r^s\|}{\|r^s\|},$$

где $\psi^{s+1,j}$ — j -ое приближение к ψ^{s+1} , $j = 1, \dots, j_{max}$. Из графика видно, что после пяти итераций невязка падает на порядок, а дальнейшее уменьшение невязки в два раза требует еще пяти итераций, то есть в два раза большего времени счета. В практических расчетах, результаты которых приведены ниже, на каждом шаге по времени как правило выполнялось от $j_{max} = 5$ до $j_{max} = 10$ итераций метода минимальной невязки. Расчет одного шага по времени на сетке $300 \times 300 \times 300$ занимает 7–10 минут на одном вычислительном узле суперкомпьютера Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН. Весь такой расчет (до выхода источника за пределы области) занимал до двух суток. На каждом шаге по времени, после расчета текущего потенциала $\psi(x, s)$, рассчитывались и сохранялись в выходные файлы функции давления $P(x, s)$, вертикального смещения

$\zeta(x, s)$ и скорости жидкости $v(x, s)$, в соответствии с формулами (4), (5) и (6). В программе была реализована возможность сохранения полного текущего состояния расчетов (в первую очередь матрицы решения ψ на текущей и нескольких предыдущих итерациях по времени) и возобновления счета из сохраненного состояния. Такая возможность полезна, если общая продолжительность счета превышает допустимый квант времени счета на суперкомпьютере. Результаты завершившегося расчета скачивались на персональный компьютер, где происходила их постобработка, в частности, с использованием утилиты gnuplot строились графики полученных решений. Для реализации элементарных операций с разреженными матрицами и решения систем линейных уравнений в программе используется пакет GNU Scientific Library (GSL) [19], <http://www.gnu.org/software/gsl/>. Исходный код программы доступен в интернете по адресу <https://bitbucket.org/Jclash/inwaves>.

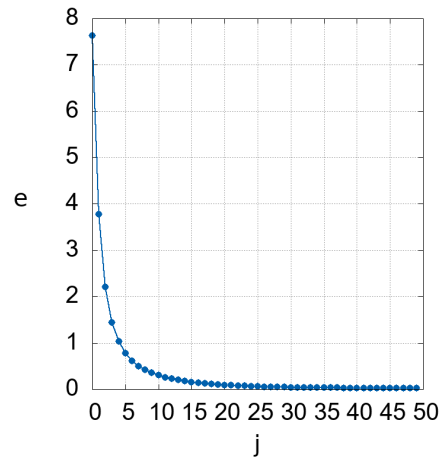


Рис. 1. Уменьшение относительной ошибки $e(s, j)$, $j = 1, \dots, 50$ на шаге по времени $s = 95$. Выполнено 50 итераций метода GMRES

3. Верификация компьютерной программы

Для верификации описанного выше метода результаты моделирования распространения гравитационных волн сравнивались с известными результатами для случая однородной стратификации ($N = const$). Результаты расчета вертикального смещения жидкости $\zeta(x, t)$, для случая, когда возмущение создается равномерно горизонтально движущимся массовым источником, оказались качественно сходными с результатами экспериментов по обтеканию сферы потоком стратифицированной жидкости [11]. Рассчитанные с помощью описанного выше метода поля скоростей жидкости $v(x, t)$ сравнивались с известными асимптотиками дальнего поля для случаев, когда источник возмущения движется равномерно горизонтально [7] или под фиксированным углом к горизонту [8].

В случае, когда источник движется горизонтально прямолинейно и с постоянной скоростью, скорость жидкости в дальнем поле $r_1 \gg V/N$ для $x > 0$ может быть вычислена с использованием следующей формулы [7] в сферической системе координат

(r_1, ξ, φ) с центром в точке текущего положения точечного источника $\mathbf{r}(t)$:

$$v(x, y, z) = H(x_1) \frac{NQ}{2\pi V r_1} \frac{\sqrt{\sin^2 \xi + \cos^2 \xi \cos^2 \varphi}}{\sin \xi} \frac{W}{|W|} \cos\left(\frac{N}{V} r_1 |\sin \varphi|\right) \quad (10)$$

Здесь

$$\mathbf{W} = (-r_1 \tan \xi \sin \xi, r_1 \sin \xi \cos \varphi, r_1 \sin \xi \sin \varphi),$$

$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x} - \mathbf{r}$, $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$ — вектор из точки текущего положения источника O_1 в точку M с координатами (x, y, z) в которой рассчитывается поле скоростей, $r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$, $\xi = \arccos(x_1/r_1)$, $\varphi = \arccos(y_1/\sqrt{y_1^2 + z_1^2})$, $H(x)$ — функция Хевисайда,

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x < 0, \\ 1/2, & x = 0, \\ 0, & x > 0. \end{cases}$$

Аналогичная асимптотика может быть выписана в случае, когда источник возмущения движется равномерно под фиксированным углом γ к горизонту, то есть $\mathbf{U} = (V \cos \gamma, 0, V \sin \gamma)$. Асимптотика дальнего поля для скорости в точке M в системе координат (r_1, θ, ϕ) с центром в точке текущего положения источника O_1 имеет следующий вид [8]:

$$\mathbf{v} = \frac{NQ}{2\pi c_g} \frac{(R_z^2 + R_y^2)^{1/2}}{R^2} \frac{\mathbf{R}}{R} \frac{\cos(N|R_z|/c_g + \pi H(A)/2)}{|A|^{1/2}}, \quad (11)$$

где

$$\mathbf{c}_g = \mathbf{V} \cdot \left(\frac{\mathbf{R}}{R} - \frac{R}{R_z} \mathbf{e}_z \right) \frac{\mathbf{R}}{R}, \quad A = -\left(\frac{\mathbf{V}}{c_g} \times \frac{\mathbf{R}}{R} \right)^2 + 2 \frac{\mathbf{V}}{c_g} \cdot \frac{\mathbf{R}}{R_z} \mathbf{e}_z,$$

$$\mathbf{R} = r_1 \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \cos^2 \alpha + \sin \alpha \sin \beta \tan \eta - \sin \alpha \cos \alpha \cos \theta \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \sin^2 \alpha + \cos \alpha \sin \beta \tan \eta - \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta \cos \phi \end{pmatrix},$$

$\overline{OM} = (x_1, y_1, z_1)$, $\theta = \arccos(z_1/r_1)$, $\phi = \arccos(x_1/\sqrt{y_1^2 + x_1^2})$, $\alpha = 90^\circ - \gamma$, и тригонометрические функции углов β , ω и η находятся из следующих соотношений:

$$\cot \beta = \frac{\sin \theta \cos \phi \sin \alpha + \cos \theta \cos \alpha}{\sqrt{\sin^2 \theta \sin^2 \phi + (\cos \theta \sin \alpha - \sin \theta \cos \phi \cos \alpha)^2}}$$

$$\cos \omega = \frac{(\cos \theta \sin \alpha - \sin \theta \cos \phi \cos \alpha) \sin \alpha}{\sqrt{\sin^2 \theta \sin^2 \phi + (\cos \theta \sin \alpha - \sin \theta \cos \phi \cos \alpha)^2}}$$

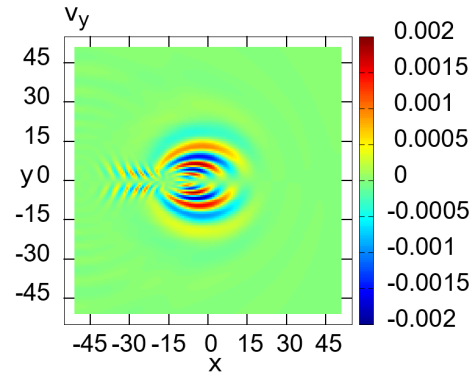
$$\tan^3 \eta + \left(\frac{\cos \omega}{\cos \alpha} \cot \beta + 2 \right) \tan \eta + \frac{\cos \omega}{\cos \alpha} - \cot \beta = 0 \quad (12)$$

Поле скоростей (11) вычисляется как сумма волн, соответствующих действительным корням кубического уравнения (12), при которых выполнено двустороннее неравенство $0 < \tau_s < T$, где T — полное время движения,

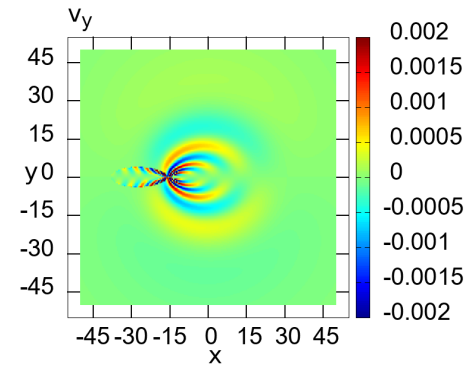
$$\tau_s = T - \frac{r \sin \beta}{V \cos^2 \eta} \cdot \frac{\cos \alpha \tan \eta + \cos \omega}{\cos \omega \tan \eta - \cos \alpha}$$

Результат расчета скорости по асимптотическим формулам (10) и (11) сравнивался с результатом численного моделирования, то есть решения задачи (1)–(3) и расчета скорости жидкости согласно (6) в области Ω . Поскольку асимптотики (10), (11)

выписаны в неограниченной области, граничное условие (2) нефизично, для корректности такого сравнения размер области Ω выбирался достаточно большим, чтобы условия на ее границе не влияли на значения поля скорости в интересующей нас подобласти, где происходит сравнение. Пример такого сравнения показан на рис. 2. Здесь показано значение компоненты скорости v_y в горизонтальной плоскости $z = 20$ м в момент времени $t = 78.8$ с. Возмущение создается массовым источником, движущимся прямолинейно с постоянной скоростью 1 м/с под углом 30° к горизонту из точки с координатами $(-50, 0, 0)$. Было установлено, что результаты моделирования хорошо согласуются с асимптотиками на достаточном расстоянии от источника и линии движения.



а)



б)

Рис. 2. Моделирование возмущения от массового источника, движущегося под фиксированным углом к горизонту. Показан (а) результат численного решения задачи (1)–(3) и (б) результат расчета по асимптотической формуле (11). Показана компонента скорости $v_y(x, y, 20)$ в горизонтальной плоскости $z=20$ м

4. Моделирование распространения внутренних волн в неоднородно стратифицированной среде

Предлагаемый метод моделирования распространения внутренних волн в стратифицированной жидкости позволяет проводить расчеты в средах с произвольной зависимостью частоты плавучести N от вертикальной координаты z , см. (1). Ранее моделировалось распространение внутренних гравитационных волн в идеальной жидкости, где стратификация менялась скачкообразно [20]. В настоящей работе были проведены расчеты, где этот скачок сглаживался

(при этом результаты расчетов сходились к результатам расчетов для разрывной функции, задающей частоту плавучести, когда радиус сглаживания стремился к нулю). В текущем разделе будут приведены результаты по моделированию распространения гравитационных волн в среде со

слоем скачка, заданным экспоненциальной зависимостью, и в среде с профилем зависимости частоты плавучести от глубины, взятым из натурного эксперимента по замерам частоты Брента — Вайсяля в океане [12].

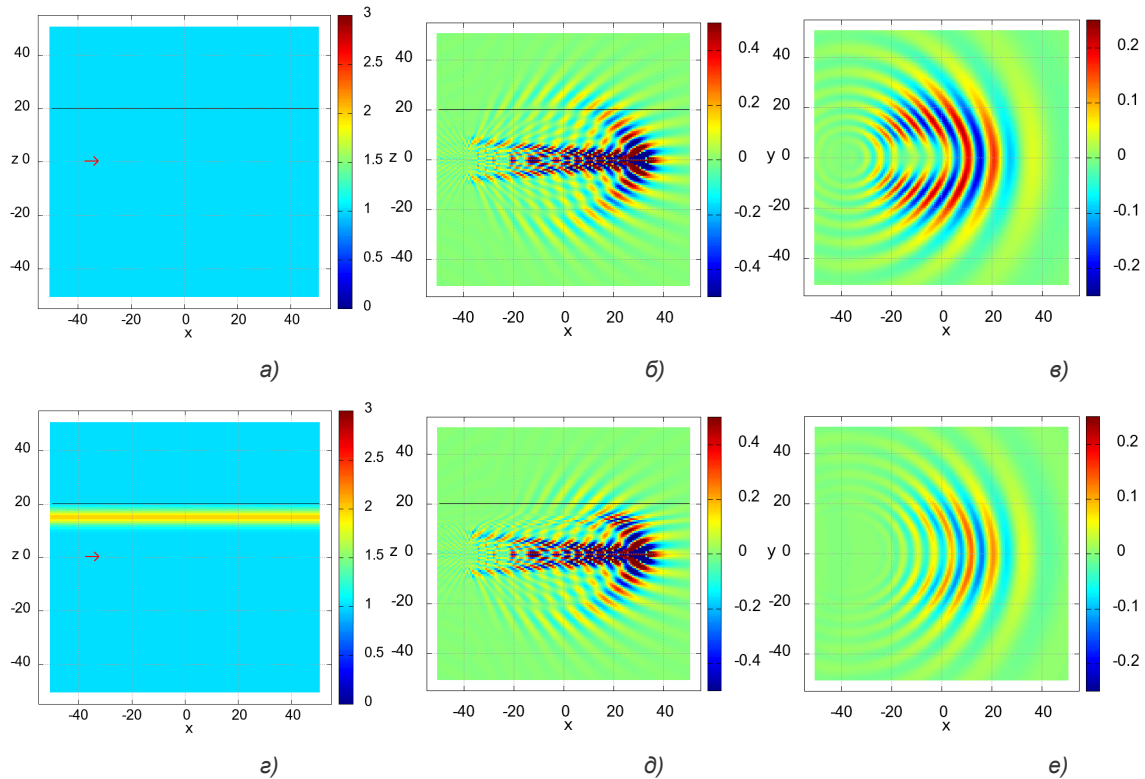


Рис. 3. Моделирование распространения внутренних волн в случае равномерной стратификации (сверху, а–в) и в случае непрерывного двукратного изменения стратификации в слое скачка (снизу, г–е). Внутренние волны возбуждаются горизонтально движущимся вдоль оси Ox массовым точечным источником. Показаны распределение частоты плавучести по глубине (а, г), вертикальное смещение жидкости в вертикальном сечении $y = 1$ (б, д), вертикальное смещение жидкости в горизонтальной плоскости наблюдения $z = 20$ м (в, е) в момент времени $t = 71.6$ с.

4.1 Моделирование скачка стратификации

Рассмотрим модельный случай, где зависимость частоты плавучести от глубины z , $z \in [z_{min}, z_{max}]$, определяется следующим образом:

$$N(z) = N_0 + (N_{max} - N_0)e^{-\frac{(z-z_m)^2}{D^2}}. \quad (13)$$

Такая зависимость описывает резкое увеличение значения N от значения N_0 до значения N_{max} на отрезке длины $\approx 2\sqrt{\pi}D$ с центром в точке z_m , в остальной области $N(z)$ близко к N_0 (см. пример такого распределения $N(z)$ на рис. 3г). Такая функция $N(z)$ описывает наличие слоя температурного скачка (термоклина), где градиент температуры (а вместе с ним и частота плавучести) резко возрастает по отношению к слоям, лежащим выше или ниже. Приведем пример моделирования, иллюстрирующий как наличие такого слоя влияет на распространение гравитационных волн. Сначала решим задачу (1)–(3) для случая, где $N(z) = N_0 = 1$. Результаты такого расчета приведены на рис. 3 а–в. Показаны (а) распределение частоты плавучести по глубине, (б) рассчитанное согласно (5) вертикальное смещение жидкости $\zeta(x, 1, z)$ в плоскости $y = 1$, (в) вертикальное смещение

жидкости $\zeta(x, y, 20)$ в горизонтальной плоскости наблюдения $z = 20$ м в момент времени $t = 71.6$ с; в этот момент времени положение источника $x = 34.1$ м. На рис. 3 г–е приведены результаты расчета для случая, где частота плавучести определяется формулой (13) с $z_m = 15$, $D = 5/\sqrt{\pi} \approx 2.8$. Функция (13) с такими значениями параметров задает скачок значения N в слое $10 \leq z \leq 20$, см. рис. 3 г. На рис. 3 д показано значение функции $\zeta(x, 1, z)$ в плоскости $y = 1$, на рис. 3 е — значение функции $\zeta(x, y, 20)$ в горизонтальной плоскости $z = 20$ м. Видно, как слой скачка деформирует картину распространения внутренних волн (ср. рис. 3 б и рис. 3 д), при этом интенсивность волн выше слоя скачка существенно падает (рис. 3 е) по сравнению со случаем равномерной стратификации (рис. 3 в).

4.2 Моделирование непрерывного изменения стратификации по глубине

Был проведен ряд расчетов распространения гравитационных волн в среде с произвольной зависимостью $N(z)$. Приведем пример такого расчета. Пусть профиль зависимости частоты плавучести от глубины такой, как изображено на рис. 4 а. Такой вид профиля изменения частоты

плавучести по глубине взят из работы [12] (Тихий океан, участок №8 20–25°N, 145–150°E, зима). Заметим, что функция $N(z)$, определяющая частоту плавучести непрерывна и имеет три локальных максимума в плоскостях $z = -17$, $z = -1$ и $z = 14$, см. рис. 4 а. Результат решения задачи (1)–(3) приведен на рис. 4 б. Здесь показано вертикальное смещение жидкости $\zeta(x, 1, z)$ в вертикальном сечении $y = 1$ в момент времени $t = 68.4$ с. Источник возмущения движется горизонтально из точки с координатами $(-37.5, 0, 0)$ с постоянной скоростью 1 м/с в положительном направлении оси Ox . На рис. 4 б видно, как распространяющееся от движущегося источника возмущение деформируется при прохождении через слои с различной стратификацией. Таким образом, картина вертикального смещения жидкости в случае произвольной стратификации существенно отличается от случая однородно стратифицированной жидкости (ср. рис. 4 б и, например, рис. 3 б).

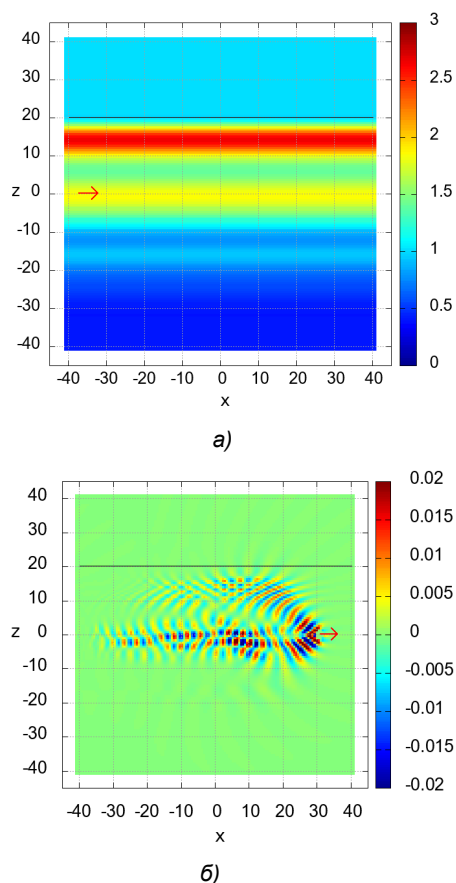


Рис. 4. Моделирование распространения внутренних гравитационных волн в среде с неоднородной стратификацией. Момент времени $t = 68.4$ с, положение источника $x = 30.9$ м. Показаны значения частоты плавучести (а) и вертикальное смещение жидкости (б)

Заключение

В настоящей работе решалась задача моделирования распространения внутренних гравитационных волн в стратифицированной жидкости. Жидкость считалась невязкой, для вывода определяющих уравнений на внутренний потенциал использовалось приближение Буссинеска. На языке программирования C++ была написана программа, которая моделирует распространение гравитационных волн от движущегося массового источника и рассчитывает изменение во времени вертикального смещения, давления, скорости жидкости. Для решения задачи используется неявная разностная схема на равномерной по трем пространственным координатам сетке.

Для верификации достоверности счета моделировалось распространение внутренних волн от массового источника, движущегося в однородно стратифицированной жидкости с постоянной скоростью горизонтально или под фиксированным углом к горизонту. Результаты расчета показали хорошее совпадение с аналитическими результатами из [7] и [8], где строятся асимптотические решения этой задачи в приближении дальнего поля, и качественное согласие с результатами экспериментов по обтеканию сферы, движущейся равномерно и прямолинейно в стратифицированной жидкости [11]. Разработанная программа позволяет проводить расчеты распространения гравитационных волн от массового источника в среде с произвольным профилем зависимости частоты плавучести от глубины. При этом картина возмущения жидкости достоверно рассчитывается, в том числе вблизи источника. Были проведены расчеты для среды со скачкообразным изменением частоты плавучести, заданным аналитически с помощью экспоненты, а также для среды, где вид профиля изменения частоты плавучести от глубины был взят из результатов натурных измерений. Такие результаты не могут быть получены с использованием асимптотических методов, где жидкость предполагается однородно стратифицированной.

Литература

1. Нестеров С.В., Шамаев А.С., Шамаев С.И. Методы, процедуры и средства аэрокосмической компьютерной радиотомографии приповерхностных областей Земли. М., изд. «Научный мир», 1996, 272 с.
2. Baydulov V.G., Knyazkov D., Shamaev A.S. Motion of mass source in stratified fluid // J. Phys.: Conf. Ser. V. 2224. 2021 2nd Int. Symp. on Automation, Information and Computing (ISAIC 2021) December 03 – 06 2021 Online. P. 012038-1–8. 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2224/1/012038

3. Баханов В. В., Таланов В. И. Преобразование нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование. Н. Новгород, «Ин-т прикладной физики РАН», 1999. Т. 2. С. 81–107.
4. Зарубин Н.А., Шамаев А.С. Исследование взаимодействия поверхностных ветровых волн с течением // Морские интеллектуальные технологии. 2023. Т. 3. № 4. С. 93–99.
5. Ulaby F.T., Long D.G. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. Izd. «Artech», 2015, 1116 p.
6. Bulatov V.V., Vladimirov Yu.V. Wave Dynamics of Stratified Mediums. M., «Nauka», 2012, 584 p.
7. Voisin B. Internal wave generation in uniformly stratified fluids. Part 2. Moving point sources // J. Fluid Mech. 1994. V. 261. P. 333–374.
8. Scase M.M., Dalziel S.B. Internal wave fields and drag generated by a translating body in a stratified fluid // J. Fluid Mech. 2004. V. 498. P. 289–313.
9. Матюшин П.В. Процесс формирования внутренних волн, инициированный началом движения тела в стратифицированной вязкой жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 3. С. 83–97.
10. Князьков Д.Ю., Байдулов В.Г., Савин А.С., Шамаев А.С. Прямые и обратные задачи динамики поверхностного волнения, вызванного обтеканием подводного препятствия // ПММ. 2023. Т. 87. Вып. 3. С. 442–453. DOI: 10.31857/S0032823523030074
11. Чашечкин Ю.Д., Гуменник Е.В., Сысоева Е.Я. Трансформация плотностного поля трехмерным телом, движущимся в непрерывно стратифицированной жидкости // ПМТФ. 1995. № 1. С. 20–32.
12. Emery W.J., Lee W.G., and Magaard L. Geographic and Seasonal Distributions of Brunt-Väisälä Frequency and Rossby Radii in the North Pacific and North Atlantic. 1984. V. 14: Issue 2. P. 294–317.
13. Schuler K.H., Tortell P.D. Impacts of vertical mixing and ice-melt on N₂O and CH₄ concentrations in the Canadian Arctic Ocean // Continental Shelf Research. 2023. V. 269. 105124. DOI: 10.1016/j.csr.2023.105124
14. Venkataramana V., Mishra R.K., Sabu P., Anilkumar N., Sarkar A., Naik R.K., Soares M.A., Gawade L. Stratification governs the plankton community structure and trophic interaction in the Southwestern tropical Indian Ocean during boreal summer // Regional Studies in Marine Science. 2021. V. 48. 101987. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101987
15. Мировпольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л., изд. «Гидрометеиздат», 1981, 302 с.
16. Демиденко Г.В., Успенский С.В. Уравнения и системы, не разрешенные относительно старшей производной. Новосибирск, изд. «Научная книга», 1998, 436 с.
17. Габов С.А., Свешников А.Г. Линейные задачи нестационарных внутренних волн. М., изд. «Наука», 1990, 344 с.
18. Saad Y., Schultz M.H. GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems // SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing 1986. V. 7:3. P. 856–869.
19. Galassi M., Davies J., Theiler J. et al. GNU Scientific Library Reference Manual (3rd Ed.). Network Theory Ltd, 2009. 592 p.
20. Knyazkov D., Shamaev A. Rectilinear motion of mass source in non-uniformly stratified fluid. AIP Conf. Proc. 2024. V. 3094(1). P. 500028-1–4. DOI: 10.1063/5.0210166

References

1. Nesterov S.V., Shamaev A.S., Shamaev S.I. Metody, procedury i sredstva aerokosmicheskoy komp'yuternoj radiotomografii pripoверхnostnyh oblastej Zemli [Methods, procedures and means of aerospace computer radiotomography of near-surface areas of the Earth]. M., izd. «Nauchnyj mir», 1996, 272 p.
2. Baydulov V.G., Knyazkov D., Shamaev A.S. Motion of mass source in stratified fluid // J. Phys.: Conf. Ser. V. 2224. 2021 2nd Int. Symp. on Automation, Information and Computing (ISAIC 2021) December 03 – 06 2021 Online. P. 012038-1–8. 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2224/1/012038
3. Bakhanov V.V., Talanov V.I. Preobrazovaniye nelineynykh poverkhnostnykh voln v pole neodnorodnykh techeniy [Transformation of nonlinear surface waves into a field of inhomogeneous flows] // Priповерхностnyy sloj okeana. Fizicheskiye protsessy i distantsionnoye zondirovaniye. N. Novgorod, «Institut prikladnoy fiziki RAN», 1999. V. 2. P. 81–107.
4. Zarubin N.A., Shamaev A.S. Investigation of the model of interaction of wind waves with the sea current, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 93–98. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.070
5. Ulaby F.T., Long D.G. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. Izd. «Artech», 2015, 1116 p.
6. Bulatov V.V., Vladimirov Yu.V. Wave Dynamics of Stratified Mediums. M., «Nauka», 2012, 584 p.
7. Voisin B. Internal wave generation in uniformly stratified fluids. Part 2. Moving point sources // J. Fluid Mech. 1994. V. 261. P. 333–374.
8. Scase M.M., Dalziel S.B. Internal wave fields and drag generated by a translating body in a stratified fluid // J. Fluid Mech. 2004. V. 498. P. 289–313.
9. Matyushin P.V. Process of the formation of internal waves initiated by the start of motion of a body in a stratified viscous fluid // Fluid Dyn. 2019. V. 54. № 3. P. 374–388. DOI: 10.1134/S0015462819020095
10. Knyazkov D.Y., Baydulov V.G., Savin A.S., Shamaev A.S. Direct and inverse problems of the dynamics of surface waves caused by the flow around an underwater obstacle // Fluid Dyn. 2023. V. 58. P. 1725–1733. DOI: 10.1134/S0015462823603030
11. Chashechkin Y., Gumennik E., Sysoeva E. Transformation of a density field by a three-dimensional body moving in a continuously stratified fluid // J. Appl. Mech.&Tech. Phys. 1995. V. 36. P. 19–29.
12. Emery W.J., Lee W.G., and Magaard L. Geographic and Seasonal Distributions of Brunt-Väisälä Frequency and Rossby Radii in the North Pacific and North Atlantic. 1984. V. 14: Issue 2. P. 294–317.

13. Schuler K.H., Tortell P.D. Impacts of vertical mixing and ice-melt on N₂O and CH₄ concentrations in the Canadian Arctic Ocean // Continental Shelf Research. 2023. V. 269. 105124. DOI: 10.1016/j.csr.2023.105124
14. Venkataramana V., Mishra R.K., Sabu P., Anilkumar N., Sarkar A., Naik R.K., Soares M.A., Gawade L. Stratification governs the plankton community structure and trophic interaction in the Southwestern tropical Indian Ocean during boreal summer // Regional Studies in Marine Science. 2021. V. 48. 101987. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101987
15. Miropol'sky Y.Z. Dynamics of internal gravity waves in the ocean. Springer Science. 2001. 423 p.
16. Demidenko G.V., Uspenskiy S.V. Uravneniya i sistemy, ne razreshennyye otnositelno starshey proizvodnoy [Equations and systems that are not resolved with respect to the highest derivative]. Novosibirsk, izd. «Nauchnaya kniga», 1998, 436 p.
17. Gabov S.A., Sveshnikov A.G. Lineynyye zadachi nestatsionarnykh vnutrennikh voln [Linear Problems of Theory of Transient Internal Waves]. Moscow, izd. "Nauka", 1990, 344 p.
18. Saad Y., Schultz M.H. GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems // SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing 1986. V. 7:3. P. 856–869.
19. Galassi M., Davies J., Theiler J. et al. GNU Scientific Library Reference Manual (3rd Ed.). Network Theory Ltd, 2009. 592 p.
20. Knyazkov D., Shamaev A. Rectilinear motion of mass source in non-uniformly stratified fluid. AIP Conf. Proc. 2024. V. 3094(1). P. 500028-1–4. DOI: 10.1063/5.0210166

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Князьков Дмитрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики управляемых систем Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: knyaz@ipmnet.ru

Dmitri I.U. Knyazkov, Ph.D. (Phys & Math), senior researcher at the Laboratory of Control of Mechanical Systems at Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS. Prospekt Vernadskogo 101-1, Moscow, 119526, Russia., e-mail: knyaz@ipmnet.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 00.00.2024.

Научная статья

УДК 62-539

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.085>**Вывод дифференциального уравнения для определения сопротивлений шланга при эксплуатации подводного оборудования**Городников О.А.¹ Gorodnikov.O@vvsu.ru, Петрашев С.В.² petrashov@msun.ru¹Владивостокский государственный университет, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Проведение работ в толще воды с применением различного размера шлангов влечет за собой ряд затруднений в точности расчетов, так как шланги являются основной проблемой создавая дополнительные утяжеления конструктивных элементов и сопротивления в процессе своего движения. Для определения сопротивлений необходимо учитывать такие факторы, как обтекание шлангов, сопротивление в толще воды, подводные течения, вес конструкции. На данный момент не существует универсального способа расчета данных параметров, что затрудняет проведение подготовительных работ и проведения расчетов в первых приближениях. Полученное уравнение позволяющее определить элементарный момент сопротивления шланга позволит упростить проведение расчетов и экспериментов с данного типа оборудованием. Эксперимент по определению основных параметров движения шланга в толще воды проводился на примере подводного аппарата для нанесения сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Подводный аппарат имеет шлаг длиной 150 метров, что позволяет проводить расчеты данного типа.

Ключевые слова: обтекание поверхности, сопротивление, подводный аппарат, изгиб, шланг, траектория движения, массовый расход, скорость жидкости.

Для цитирования: Городников О.А., Петрашев С.В. Вывод дифференциального уравнения для определения сопротивлений шланга при эксплуатации подводного оборудования. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 107—113. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.085

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.085>**Derivation of a differential equation for determining hose resistance when operating subsea equipment**Oleg A. Gorodnikov¹ Gorodnikov.O@vvsu.ru, Sergey V. Petrashev² petrashov@msun.ru¹Vladivostok State University, ²Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University

Annotation. Carrying out work in the water column using different sizes of hoses entails a number of difficulties in the accuracy of calculations, since hoses are the main problem, creating additional weighting of structural elements and resistance during their movement. To determine resistance, it is necessary to take into account factors such as flow around hoses, resistance in the water column, underwater currents, and weight of the structure. Now, there is no universal way to calculate these parameters, which makes it difficult to carry out preparatory work and carry out calculations in first approximations. The resulting equation, which allows us to determine the elementary moment of resistance of the hose, will simplify calculations and experiments with this type of equipment. An experiment to determine the main parameters of hose movement in the water column was carried out using the example of an underwater vehicle for applying sorbents during the cleanup of emergency oil and petroleum product spills. The underwater vehicle has a hose, 150 meters long, which allows for calculations of this type.

Key words: flow around a surface, drag, underwater vehicle, bending, hose, trajectory, mass flow, fluid speed.

For citation: Oleg A. Gorodnikov, Sergey V. Petrashev Derivation of a differential equation for determining hose resistance when operating subsea equipment. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 4, P. 107—113. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.085

Введение

Нефтегазодобывающая промышленность является одной из ключевых сфер современной экономики большинства стран. Добыча нефти в основном отделяется от суши, а бурение скважин, их разработка и эксплуатация ведется на шельфе. Данные процессы напрямую связаны с возникновением утечек нефти, которые наносят вред окружающей флоре и фауне.

Для оперативной ликвидации утечек нефти используется подводное устройство, разработанное для применения на судах любого типа, работающее в связки с элементами судовых энергетических

установок, позволяющее осуществлять работы в любых погодных условиях, в независимости от наличия течения, льда, и ледяной шуги.

При проведении начальных стадий экспериментов и апробации данного устройства возникали проблем с возникающими сопротивлениями, создаваемыми шлангом для осуществления движения устройства и подачи активного вещества.

Цель исследования является определение возможности движения подводного устройства в толще воды и подбор наиболее оптимальных параметров для преодоления сопротивлений в толще воды.

Основные задачи, решаемые при проведении исследования:

- определение сопротивлений устройства при поперечном обтекании шланга;
- определение сопротивления движению судового устройства при продольном обтекании;
- вывод дифференциального уравнения сопротивления движению подводного устройства.

Результата проведения расчетов и исследования в дальнейшем поможет сократить время на решение задач аналогичного типа и подбора размеров шлангов, применяемых в толще воды и объектов различной формы и размеров [1].

Применение системы «подводное устройство – судовая энергетическая установка»

Утечки нефти и нефтепродуктов неизбежны при добыче, бурении, эксплуатации объектов нефтедобычи и транспортировки нефти танкерным флотом.

Например, в 2010 году было обнаружено множество частей шлейфа пораженных нефтью до 16 км в длину и до 5 км в ширину, а также до 90 метров в толщину.

В результате нефтяного разлива пострадали 1770 километров береговой линии, был введен запрет на рыбалку, и более трети акватории Мексиканского залива закрыли для промысла. Все прибрежные штаты США, расположенные у Мексиканского залива, понесли убытки, однако наибольший ущерб был причинен Луизиане, Алабаме, Миссисипи и Флориде. На побережье Мексиканского залива было найдено 6814 мертвых животных.

Для решения задачи оперативной ликвидации нефтяных пятен предлагается использование подводного устройства, использующего мощности судовых энергетических установок для осуществления движения и распыления активного вещества в толще воды под аварийными разливами.

Основные характеристики системы для введения активного вещества в толщу воды (рисунок 1).

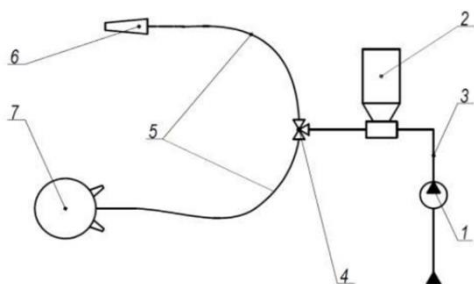


Рис. 1. Схема системы подачи активного вещества в зону загрязнения

1 – насос заборной воды; 2 – смесительное устройство; 3 – трубопровод; 4 – кран распределитель; 5 – гибкий рукав; 6 – гидромонитор; 7 – подводное устройство-распылитель

Пожарный насос забирает воду за бортом (1), в это время смесительное устройство (2) подает сорбирующее вещество в трубопровод (3) и через распределительное устройство (4) поступает по гибкому рукаву (5) в подводное устройство (7), возможна подача в гидромонитор (6).

Подводное устройство погружается в толщу воды

при помощи гидрореактивной тяги начинает свое движение к месту разлива нефти. Движение происходит при выходе напора воды через два сопла, при включении подачи в одно из сопел (левое или правое) устройство устремится в сторону, при подаче в оба сопла одновременно устройство двигается вперед. Данная система создания напора позволяет маневрировать подводному устройству и направлять его под нефтяное пятно [2].

Определение сопротивления подводного устройства при поперечном обтекании шланга

Траектория движения подводного устройства при обработке нефтяного пятна возможно движение в двух вариантах – «маятниковом» (а) и возвратно-поступательном (б) (рисунок 2).

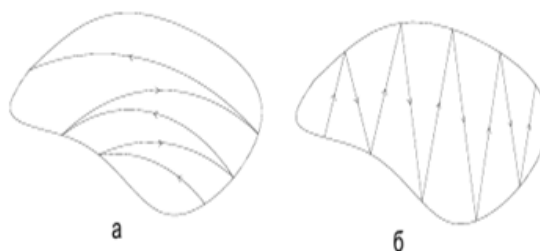


Рис. 2. Траектория движения подводного аппарата

Для проведения расчетов необходимо определить силы, действующие на корпус аппарата и гибкий трубопровод.

При движении подводного устройства силы сопротивления, действующие на аппарат и гибкий трубопровод представлены рисунке 3.

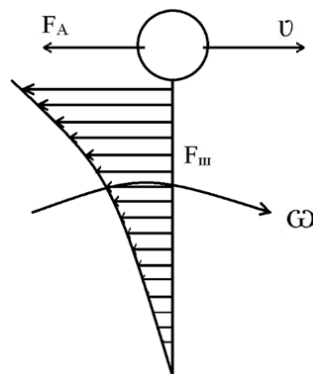


Рис. 3. Схема действующих сил сопротивления при поперечном обтекании шланга

Отсюда среднюю скорость движения на каждом из 100 участков можно определить по формуле (4):

$$v_i = \omega \cdot R_i, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость, рад/с [6];

R_i – радиус движения участка (формула (5)).

$$R_i = \frac{l}{2} + l(n-1). \quad (5)$$

Силу, действующую на участок трубопровода при поперечном обтекании, необходимо определить по формуле (6):

$$F_i = \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{v_i^2}{2} \cdot S, \text{ Н}; \quad (6)$$

где ε – коэффициент сопротивления трубопровода;
 ρ – плотность морской воды, кг/м³;
 v_i – скорость движения шланга на i -ом участке, м/с;
 S – площадь поперечного сечения трубопровода, м².

Момент силы сопротивления движению шланга при поперечном обтекании рассчитывается по формуле (7):

$$M = \sum F_i \cdot R_i. \quad (7)$$

Для каждого участка рассчитаем среднюю скорость, силу и момент силы сопротивления при скорости движения подводного устройства 0,5 м/с, и угловой скорости 0,0033 рад/с.

Производим аналогичные расчеты при скорости

движения подводного устройства 1 м/с, угловая скорость 0,0067 рад/с [7].

Расчет участка 1:

$$R_1 = \frac{l}{2} = \frac{1.5}{2} = 0,75 \text{ м.}$$

$$v_1 = \omega_1 \cdot R_1 = 0,0033 \cdot 0,75 = 0,0025 \text{ м/с.}$$

$$F_1 = \varepsilon \rho \frac{v_1^2}{2} S = 1,7 \cdot 1025 \cdot \frac{0,0025^2}{2} \cdot 0,048 = 26 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

$$M_1 = F_1 \cdot R_1 = 0,00026 \cdot 0,75 = 0,0002 \text{ Н·м.}$$

По аналогичному принципу, производим расчет для 100 полученных участков, и действующих на него нагрузок.

На основании полученных данных составлена диаграмма изменения основных показателей. Диаграмма представлена на рисунке 4.

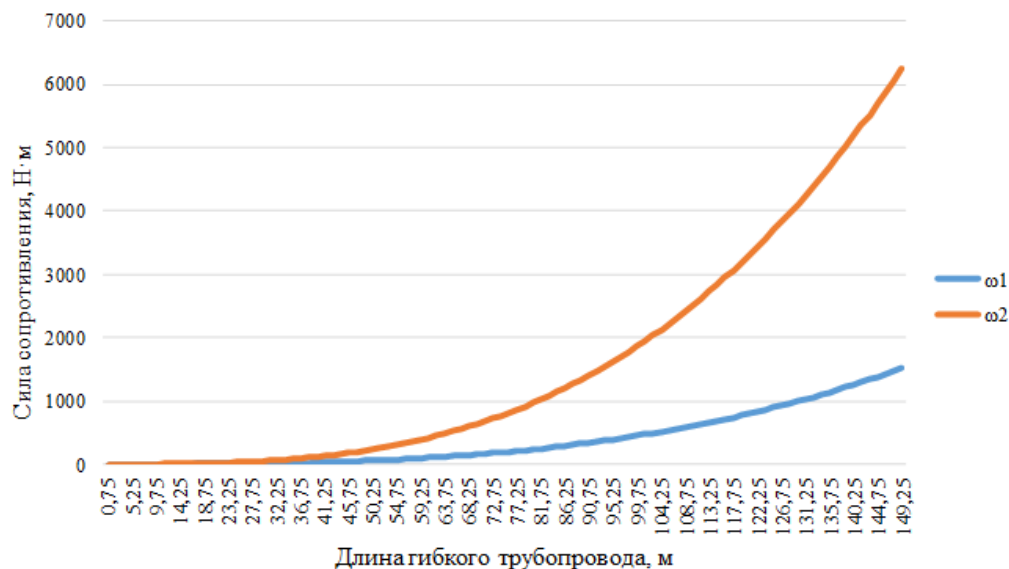


Рис. 4. Диаграмма зависимости момента силы сопротивления движению шланга при поперечном обтекании

По результатам расчетов определены суммарные значения моментов:

$$\sum M_{1i} = 38424,12 \text{ Н·м.}$$

$$\sum M_{2i} = 158389,25 \text{ Н·м.}$$

Сила полного эквивалентного сопротивления трубопровода [8]:

$$F_{1\sum} = \frac{\sum M_{1i}}{L} = \frac{38424,12}{150} = 256,16 \text{ Н.}$$

$$F_{2\sum} = \frac{\sum M_{2i}}{L} = \frac{158389,25}{150} = 1055,9 \text{ Н.}$$

Определение сопротивления движению судового устройства при продольном обтекании

Вычислим сопротивление аппарата при разных значениях скорости:

$$F_{a1} = \varepsilon \rho \frac{v_1^2}{2} S = 0,7 \cdot 1025 \cdot \frac{0,5^2}{2} \cdot 0,056 = 10,045 \text{ Н.}$$

$$F_{a2} = \varepsilon \rho \frac{v_2^2}{2} S = 0,7 \cdot 1025 \cdot \frac{1^2}{2} \cdot 0,056 = 20,09 \text{ Н.}$$

Отсюда суммарное сопротивление системы «шланг – аппарат»:

$$\sum F_{сис1} = F_{\sum 1} + F_{a1} = 256,16 + 10,45 = 266,61 \text{ Н.}$$

$$\sum F_{сис2} = F_{\sum 2} + F_{a2} = 1055,9 + 20,09 = 1075,99 \text{ Н.}$$

По результатам расчета силы сопротивления комплекса «шланг – аппарат» можно сделать вывод, что сопротивления шланга составляет основную долю общего сопротивления, так как $F_{a1} < F_{\sum 1}$ ($10,45 < 256,16$), $F_{a1} < F_{\sum 2}$ ($20,09 < 1055,9$), траектория движения ПУ в толще воды наиболее оптимальным с учетом возникающих сопротивлений будет возвратно-поступательное движение (рисунок 6).

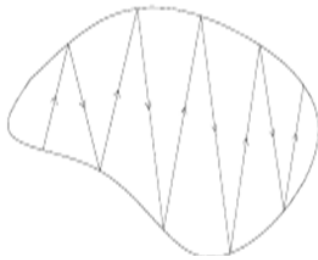


Рис. 6. Возможные траектории движения подводного аппарата

Для того чтобы определить мощность насоса необходимо найти объемный расход жидкости и давления насоса [9].

Внутренний диаметр трубопровода: $d = 0,025$ м.

Плотность воды: $\rho = 1025$ кг/м³.

Для того чтобы обеспечить необходимый напор принимаем скорость жидкости в трубопроводе: $u = 8$ м/с.

Площадь поперечного сечения трубопровода определяем по формуле (8):

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ м}^2. \quad (8)$$

Определяем расход жидкости, проходящий через поперечное сечение трубопровода по формуле (9):

$$Q = S \cdot V \text{ м}^3/\text{с}. \quad (9)$$

Часовой объемный расход определяем по формуле (10):

$$Q_h = Q \cdot 3600 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (10)$$

Мощность на выходе насоса или гидравлическая мощность, сообщаемая насосом жидкой среде по формуле (11):

$$N_{гидр} = 0,001 \cdot Q \cdot P \text{ Вт}. \quad (11)$$

Общий КПД насосов представляет собой произведение коэффициентов полезного действия: объемного гидравлического и механического. КПД насоса характеризует степень конструктивного его совершенства, как в механическом, так и гидравлическом отношении. КПД для малых насосов до 0,6...0,7 и менее.

Мощность, потребляемая насосом или действительная мощность на валу насоса, сообщаемая ему электродвигателем по формуле

(12):

$$N = \frac{N_{гидр}}{\eta} \text{ Вт}. \quad (12)$$

Чтобы установить размеры сопел найдем массовый расход жидкости по формуле (13):

$$G = \rho \cdot Q \text{ кг/с}. \quad (13)$$

Диаметры сопел на входе определим по формуле (14):

$$d_1 = d_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot S}{\pi}} \text{ м}. \quad (14)$$

Действительная скорость жидкости на входе в сопло по формуле (15):

$$v_{вх} = \frac{Q}{S_{вх}} \text{ м/с}. \quad (15)$$

Реактивная сила должна обеспечивать тягу, тогда:

$$F_{реак} = F_{тяги} = 190 \text{ Н}.$$

Реактивная сила определяется по формуле (16):

$$F_{реак} = G \cdot v \text{ Н}. \quad (16)$$

Отсюда найдем необходимую скорость жидкости на выходе из сопла по формуле (17):

$$v_{вых} = \frac{F_{реак}}{G} \text{ м/с}. \quad (17)$$

Площадь каждого из сопел на выходе по формуле (18):

$$S_{вых} = \frac{Q}{v_{вых}} \text{ м}^2. \quad (18)$$

Тогда диаметры сопел на выходе по формуле (19):

$$d_1 = d_2 = \sqrt{\frac{2S}{\pi}} = 0,025 \text{ м}. \quad (19)$$

Диаметр применяемых шлангов $d = 25$ мм.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчетов

№	Наименование параметра	Обозначение	Значение	Ед. измерения
1	Площадь поперечного сечения трубопровода	S	0,0056	м ²
2	Расход жидкости	Q	0,004	м ³ /с
3	Часовой объемный расход	Q _h	14,4	м ³ /ч
4	Мощность насоса	N	4	кВт
5	Мощность, потребляемая насосом	N _{потр}	6,7	кВт
6	Массовый расход жидкости	G	4,1	кг/с
7	Действительная скорость жидкости на входе в сопло	v _{вх}	8	м/с
8	Скорость жидкости на выходе из сопла	v _{вых}	47,2	м/с
9	Диаметры сопел	d	0,008	м

Сопла подводного устройства для подачи сорбирующего вещества являются съемными, что позволяет их замену в случае необходимости. Установка сопел большего диаметра внутреннего проходного сечения позволит увеличить напор, тем самым увеличить скорость и количество распыляемого сорбента.

Вывод дифференциального уравнения сопротивления движению подводного устройства

Силу сопротивления участка шланга определяем по формуле (20) [10]:

$$F_{\text{шл}} = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\omega_a^2}{2} S H; \quad (20)$$

где $\varepsilon_{\text{шл}}$ – коэффициент сопротивления при поперечном обтекании шланга;
 ω_a – скорость движения подводного устройства, м/с;
 S – площадь поперечного сечения подводного устройства, 0,048 м².

Из уравнения 20 выводим элементарное сопротивление элементарного участка шланга (21):

$$dR_{\text{ш}} = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} dS_{\text{ш}} (\omega dr)^2; \quad (21)$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр шланга, м;
 dr – элементарное изменение радиуса, м.
 Следовательно, получим площадь

$$\begin{aligned} M_{\Sigma} &= \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \omega_a^2 \int_0^r \frac{dr^3}{r} = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \omega_a^2 \left(\int_0^r \frac{r^2 dr}{r^2} + \int_0^r \frac{r^2 dr}{r^2} + \int_0^r \frac{r^2 dr}{r^2} \right) = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \omega_a^2 \left(\int_0^r dr + \int_0^r dr + \int_0^r dr \right) = \\ &= \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \omega_a^2 \left(r \Big|_0^r + r \Big|_0^r + r \Big|_0^r \right) = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \omega_a^2 \cdot 3r \Big|_0^r \end{aligned} \quad (27)$$

В уравнение подставим необходимые значения для получения суммарного сопротивления шланга получим уравнение (28):

$$M_{\Sigma} = 0,4 \cdot 63,04 + 1,7 \cdot \frac{1025}{2} \cdot 0,025 \cdot 1,005^2 \cdot 3 \cdot 0,4 \cdot \Big|_0^{150} = 6629,93 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (28)$$

Сила эквивалентного сопротивления трения поверхности подводного устройства и шланга для маятникового типа движения (29):

$$R_{\text{мн1}} = \frac{M_{\Sigma}}{dR_{\text{ш}}} = \frac{6629,93}{150} = 44,2 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (29)$$

$$R_{\text{мн2}} = \varepsilon_{\text{мн}} \frac{\rho \cdot v_{\text{ш}}^2}{2} S = 0,01 \cdot \frac{1025 \cdot 1^2}{2} \cdot 15,332 = 78,57 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (30)$$

где S – площадь смоченной поверхности, 15,332 м²;
 $\varepsilon_{\text{тп}}$ – коэффициент трения поверхности шланга, 0,01.

Для нахождения коэффициента трения о поверхность требуется рассчитать число Рейнольдса по формуле (31):

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_{\text{ш}} \cdot d}{\mu} = \frac{1025 \cdot 1 \cdot 0,025}{0,00131} = 19561; \quad (31)$$

где d – внутренний диаметр шланга, 0,025 м;

элементарного участка шланга по формуле (22):

$$dS_{\text{ш}} = d_{\text{ш}} dr. \quad (22)$$

Уравнение (21) примет вид (23):

$$dR_{\text{ш}} = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} dr (\omega dr)^2. \quad (23)$$

Из этого следует, что уравнение для определения элементарного момента сопротивления шланга примет вид формул (24 и 25):

$$M_{\text{с.шл.1}} = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \cdot \frac{\omega_a^2}{R^2} dr^3 r \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (24)$$

$$M_{\text{с.шл.2}} = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \cdot \frac{\omega_a^2}{R^2} dr^3 r \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (25)$$

Из траектории движения подводного устройства следует, что суммарный элементарный момент сопротивления шланга (26):

$$M_{\Sigma} = \int_0^r \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \frac{\omega_a^2}{r} dr^3 = \varepsilon_{\text{шл}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ш}} \omega_a^2 \int_0^r \frac{dr^3}{r} \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (26)$$

Полученное уравнение подставляем в формулу для нахождения элементарного момента сопротивления шланга (27):

где $dR_{\text{ш}}$ – радиус движения подводного устройства, 150 м.

Далее рассчитываем силу сопротивления трения поверхности подводного устройства и шланга для возвратно-поступательного типа движения (30):

μ – коэффициент динамической вязкости морской воды, 0,001307 Па·с.

Коэффициент трения поверхности шланга находим по формуле Прантля-Шлихтинга (32):

$$\zeta_{\text{мн}} = \frac{0,455}{(\lg \text{Re})^{2,58}} = \frac{0,455}{(\lg(19606))^{2,58}} = 0,01. \quad (32)$$

Площадь смоченной поверхности шланга и подводного устройства и шланга (33):

$$S = S_e + S_{ш} = 0,26 + 15,072 = 15,332 \text{ м}^2. \quad (33)$$

Площадь смоченной поверхности подводного устройства по формуле (34):

$$S_e = \pi R^2 \cdot 2 = 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 2 = 0,26 \text{ м}^2. \quad (34)$$

Площадь смоченной поверхности шланга по формуле (35):

$$S_{ш} = 2\pi \cdot R \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,016 \cdot 150 = 15,072 \text{ м}^2; \quad (35)$$

где R – внутренний радиус шланга, 0,016 м.

Из проведенных расчетов можно сделать вывод, что при возвратно-поступательном движении сила сопротивления трения о воду меньше по формуле (36):

$$R_{мп1} > R_{мп2} \\ 88,4 > 78,57 \quad (36)$$

По результатам полученных результатов строим диаграмму зависимости сил сопротивления трения от длины участка шланга при разной длине шланга, представленную на рисунке 7.

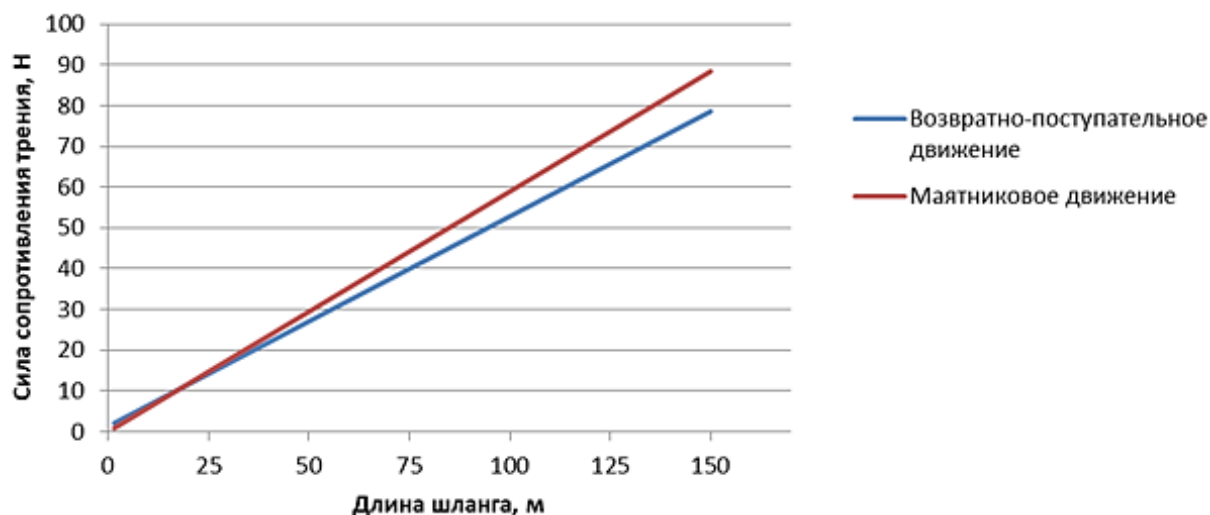


Рис. 7. Диаграмма зависимости сил сопротивления трения от длины участка шланга при разной длине шланга

Вывод

Определены параметры элементов системы подачи активного вещества на нефтяное пятно активного вещества. Представлена схема подключения к судовой системе на судне.

Шланг, для проведения расчетов разбит на сто одинаковых участков по полтора метра. Определены сопротивления по длине шланга в толще воды с учетом возникающих продольных и поперечных сопротивлениями действующих на шланг.

Расчет проводился для двух возможных вариантов движения подводного устройства –

маятниковое и возвратно-поступательное. При скорости движения 0,5 и 1 м/с. Определена наиболее оптимальная траектория движения подводного судового устройства – возвратно-поступательная.

Рассчитаны затраты судовой энергетической установки для обеспечения движения устройства в толще воды – 6,7 кВт. Исходя из результатов расчетов и данных полученных при сравнении движения аппарата, следует вывод, что использование схемы возвратно-поступательного движения позволит уменьшить сопротивления при движении и сократить количество времени при его движении.

Литература

1. Артемов А.В. Современные технологии очистки нефтяных загрязнений / А.В. Артемов // Нефть. Газ. Промышленность. – М.: Недра, 2008. – №2. – 340 с.
2. Городников О.А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О.А. Городников, С.В. Петрашев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2016. – № 3. – С. 15-17.
3. Воронович Н.А. Теоретическая механика. Учебно-методическое пособие для студентов машиностроительных, строительных, транспортных, приборостроительных специальностей заочной формы обучения / Сост. Н.А. Воронович, М.А. Осипенко, Р.М. Подгаец. – Перм. гос. техн. ун-т., Пермь. 2006, 138 с.
4. Латипов К.Ш. Гидравлика, гидромашины, гидроход. – Ташкент: Укитувчи, 1992. – 375с.
5. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости: учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е., перераб. и доп. / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
6. Калицун В.И. Основы гидравлики и аэродинамики / В.И. Калицун, Е.В. Дроздов. М.: Стройиздат, 1980. – 247 с.
7. Калякин А.М. Гидравлические расчеты трубопроводов. Истечение жидкости через отверстия и насадки. Гидродинамическое моделирование. Ч. 4. Конспект лекций / А.М. Калякин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. – 56 с. ISBN 5-7433-1281-8.

8. Киселев П.Г. Гидравлика: Основы механики жидкости: учеб. пособие для вузов. / П.Г. Киселев. М.: Энергия, 1980. – 360 с.
9. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П.Г. Киселева. Изд. 5-е. М., «Энергия», 1974. – 312 с. с ил.
10. Кудинов В.А. Гидравлика: учебн. пособие для студентов, обучающихся в обл. техн. и технологии. – М.: Высш. шк., 2007. – 199 с.: ил.

References

1. Artemov A.B. Sovremennye tekhnologii oчитki neftnykh zagryazneniy / A.B. Artemov // Neft'. Gaz. Promyshlennost'. – М.: Nedra, 2008. – №2. – 340 s.
2. Gorodnikov O.A. Sposob rasporyeniya sorbentov pri likvidatsii avariynkh razlivov nefti s pomoshch'yu podvodnogo apparata / O.A. Gorodnikov, S.V. Petrashev // Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse. – 2016. – № 3. – S. 15-17.
3. Voronovich N.A. Teoreticheskaya mekhanika. Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov mashinostroitel'nykh, stroitel'nykh, transportnykh, priborostroitel'nykh spetsial'nostey zaochnoy formy obucheniya / Sost. N.A. Voronovich, M.A. Osipenko, R.M. Podgaets. – Perm. gos. tekhn. un-t., Perm'. 2006, 138 s.
4. Latipov K.Sh. Gidravlika, gidromashiny, gidrokhod. – Tashkent: Ukituvchi, 1992. – 375с.
5. Al'tshul' A.D. Gidravlika i aerodinamika. Osnovy mekhaniki zhidkosti: ucheb. posobie dlya vuzov. Izd. 2-e., pererab. i dop. / A.D. Al'tshul', P.G. Kiselev. М.: Stroyizdat, 1975. – 323 s.
6. Kalitsun V.I. Osnovy gidravliki i aerodinamiki / V.I. Kalitsun, E.V. Drozdov. М.: Stroyizdat, 1980. – 247 s.
7. Kalyakin A.M. Gidravlicheskie raschety truboprovodov. Istechenie zhidkosti cherez otverstiya i nasadki. Gidrodinamicheskoe modelirovanie. Ch. 4. Konspekt lektsiy / A.M. Kalyakin. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2004. – 56 s. ISBN 5-7433-1281-8.
8. Kiselev P.G. Gidravlika: Osnovy mekhaniki zhidkosti: ucheb. posobie dlya vuzov. / P.G. Kiselev. М.: Energiya, 1980. – 360 s.
9. Spravochnik po gidravlicheskim raschetam. Pod red. P.G. Kiseleva. Izd. 5-e. М., «Energiya», 1974. – 312 s. s il.
10. Kudinov V.A. Gidravlika: uchebn. posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya v obl. tekhn. i tekhnologii. – М.: Vyssh. shk., 2007. – 199 s.: il.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Городников Олег Александрович, старший преподаватель кафедры нефтегазового дела, Владивостокский государственный университет, 690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: Gorodnikov.O@vvsu.ru.

Oleg A. Gorodnikov, Senior Lecturer of the Department of Oil and Gas Engineering, Vladivostok State University, 690014, Vladivostok, Gogol str., 41, e-mail: Gorodnikov.O@vvsu.ru.

Петрашев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры теории и устройства судна, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: petrashov@msun.ru.

Sergey V. Petrashev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ship Theory and Design, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, e-mail: petrashov@msun.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2024.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте **www.morintex.ru**
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор в WORD.

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются НОВЫЕ научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации в 2024г. 19500 рублей по выставляемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**