

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Грудініна Ганна Сергіївна

УДК 681.5:629.58

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ РУХУ
АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА

Спеціальність 05.13.03 – системи та процеси керування

Галузь знань 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Грудініна Г. С.

Науковий керівник
Блінцов Сергій Володимирович,
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Грудініна Г. С. Удосконалення системи стабілізації швидкості руху автономного ненаселеного підводного апарата. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи та процеси керування (15 – Автоматизація та приладобудування). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерство освіти і науки України, Харків, 2023.

Об'єктом дослідження є процес стабілізації швидкості руху автономного ненаселеного підводного апарата в косому потоці води.

Предметом дослідження є корекція швидкості руху автономного ненаселеного підводного апарата, коли рушійно-кермовий пристрій працює у косому потоці води.

В результаті проведених досліджень в роботі представлено аналіз існуючих проектів автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА), визначено конструктивні та функціональні особливості АНПА, типові режими руху підводних апаратів. Розроблено структуру регуляторів швидкістю руху підводного апарату у складі системи автоматичного керування.

Застосовано математичну модель динаміки АНПА як складову частину системи автоматичного керування швидкістю руху апарату.

Математичну модель АНПА доповнено рівняннями рушійно-кермових пристроїв (РКП) типу «гвинт – кермо», «гребний гвинт – поворотна насадка» та «поворотна гвинтова колонка» у якості об'єктів керування.

Доведено працездатність синтезованої моделі АНПА з рушійно-кермовим пристроєм.

Розроблено оптимальний за швидкодією регулятор швидкості руху підводного апарата.

Синтезовано в системі Simulink Matlab розроблений регулятор на базі штучної нейронної мережі.

Проведено дослідження залежності упору рушійно-кермового пристрою від кута набігання потоку, методом комп'ютерного моделювання.

Розроблено структуру САК АНПА з регулятором швидкості руху апарату та регулятором стабілізації упору РКП при роботі в косому потоці.

Представлено результати моделювання плоского криволінійного руху АНПА з розробленими моделями РКП.

Представлено результати Computational Fluid Dynamics (CFD) моделювання роботи: гвинта в напрямній насадці (типу PN160-1) у косому потоці; гвинта в поворотній насадці (типу PN160-2) з заданими кутами перекладки насадки; поворотної гвинтової колонки.

Представлено результати моделювання роботи системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА з стабілізацією упору РКП при плоскому криволінійному русі підводного апарата.

З представлених графіків видно, що розроблена САК ефективно компенсує відхилення упору рушійного пристрою. Результати моделювання зведені до таблиць, за якими можна оцінити ефективність роботи САК при різних режимах руху АНПА.

Наведено порівняльну характеристику роботи оптимального за швидкодією регулятора швидкістю руху АНПА та класичного ПД регулятора.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних та експериментальних досліджень здобувачем вперше:

- вперше на основі математичної моделі динаміки автономного ненаселеного підводного апарату розроблено оптимальну за швидкодією систему автоматичного керування, яка дає змогу змінювати швидкість руху підводного апарата з будь-якої початкової на будь-яку кінцеву за мінімальний проміжок часу з компенсацією дії зовнішнього збурення;

- удосконалено оптимальну за швидкодією систему автоматичного керування швидкістю руху АНПА шляхом застосування штучної нейронної мережі у якості регулятора ступінчатою зміною швидкості апарата, що дає змогу зменшити час на прийняття рішення;

– вперше на основі розробленої математичної моделі АНПА отримано діаграми залежності упору гребного гвинта від швидкості та кута потоку води, які за характером впливу дії косого потоку на рушійно-кермовий пристрій повністю відповідають результатам, отриманим експериментальним шляхом у дослідних басейнах, що утворює теоретичну основу для синтезу високоточної системи автоматичного керування рухом АНПА при плоскому криволінійному русі;

– вперше методом апроксимації експериментальних даних на базі штучної нейронної мережі синтезовано автоматичну систему стабілізації швидкості руху АНПА, підвищення точності роботи якої досягається за рахунок стабілізації упору рушійного пристрою під час функціонування рушія в косому потоці води.

Практичне застосування отриманих у дисертації наукових результатів, зокрема, синтезованої системи автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата, з уточненням значення упору рушія, що працює у косому потоці води, утворює теоретичну основу для побудови та серійного виробництва автономних ненаселених підводних апаратів.

Математичну модель динаміки автономного ненаселеного підводного апарата, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води, використано у курсовому та дипломному проектуванні магістрів за освітньо-професійною програмою «Морська робототехніка» спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Наукові положення і результати, викладені в дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані особисто здобувачкою. Серед них: визначення мети, постановки завдань досліджень; аналіз існуючих проектів автономних ненаселених підводних апаратів; розробка структури регуляторів, що входять до складу системи автоматичного керування; синтез в Simulink регулятора швидкості на базі математичної моделі динаміки АНПА, розробленої науковою школою «Підводна техніка» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова; вибірка даних для навчання нейронної мережі у складі оптимального за швидкодією регулятора; модель динаміки АНПА з рівняннями

рушійно-кермових пристроїв типу «гвинт – кермо», «гребний гвинт – поворотна насадка» та «поворотна гвинтова колонка».

Особисто здобувачем розроблено імітаційну модель для моделювання плоского криволінійного руху АНПА. Шляхом математичного моделювання проведено дослідження гідродинамічних параметрів застосованих типів рушійно-кермових пристроїв при плоскому криволінійному русі. Виконано оцінку працездатності розроблених моделей за результатами CFD моделювання застосованих в роботі типів РКП. Розроблено та реалізовано в системі Simulink структуру САК АНПА з регулятором швидкості руху апарату та регулятором стабілізації упору РКП при роботі в косому потоці.

Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на конференціях: Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю «Електротехніка і електромеханіка» (2008 р., м. Миколаїв); Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів, молодих вчених «Інформаційно-керуючі системи і комплекси» (2009 р., 2010 р., м. Миколаїв); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів» (2009 р., 2010 р., м. Миколаїв); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» (2015 р., 2018 р., м. Миколаїв); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Підводна техніка та технології» (2015 р., 2016 р., 2021 р., м. Миколаїв); Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (2017 р., 2020 р., 2021 р., м. Миколаїв); X Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології» (2018 р., м. Херсон); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Автоматика та електротехніка» (2021 р., м. Миколаїв).

Основні результати дисертації опубліковано в 22 працях, у тому числі у 7 статтях наукових видань України, з них 4 статті у фахових виданнях, 1 стаття у журналі, який включено до наукометричної бази Scopus.

Ключові слова: математичне моделювання, автономний ненаселений підводний апарат, рушійно-кермовий пристрій «гвинт – кермо», «гребний гвинт – поворотна насадка», гвинтова поворотна колонка, система автоматичного керування, стабілізація швидкості.

Список наукових праць здобувачки за темою дисертації:

1. Блінцов С. В., Грудініна Г. С. Застосування математичної моделі руху підводного апарата для побудови оптимальної за швидкодією системи керування з компенсацією зовнішніх збурень. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2008. – №3(420). – С. 77-83.

2. Алоба Л. Т., Блінцов, С. В., Грудініна Г. С. Математичне моделювання динаміки автономного підводного апарата на плоскій циркуляції. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2017. – №4. – С. 53-60.

3. Aloba L. T., Burunina Z. Y., Hrudinina H. S. Mathematical modeling of the automatic control system for an autonomous underwater vehicle as a group agent. Shipbuilding and marine infrastructure. – Миколаїв: НУК, 2018. – №1(9). – Р. 29-35.

4. Блінцов В. С., Грудініна Г. С. Особливості керування стабілізованим рухом автономним ненаселеним підводним апаратом в умовах дії зовнішніх збурень. Інформаційні системи, механіка та керування. Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – №19. – С. 122-137.

5. Hrudinina H. S. Mathematical modeling of an autonomous uninhabited underwater vehicle dynamics with propeller in the rotary nozzle. Shipbuilding and marine infrastructure. – Миколаїв: НУК, 2018, №2 (10). Р. 144-153.

6. Blintsov V. S., Hrudinina H. S. Mathematical modeling of autonomous underwater vehicle propulsion and steering complex operation in oblique (beveled) water flow. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Харків: ПП «Технологічний Центр», 2019. № 4/9 (100). Р. 19-26.

7. Блінцов В. С., Буруніна Ж. Ю., Грудініна Г. С. та Надточий А. В. Удосконалення системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарату. Журнал «Вчені записки Таврійського

національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки». – Київ: Видавничий дім «Гельветика», 2022, Том 33 (72) № 4, С. 56-65.

8. Блінцов С. В., Грудініна Г. С. Побудова оптимальної по швидкодії системи керування підводним апаратом в умовах невизначеності його параметрів. Електротехніка і електромеханіка: Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2008. – С. 193-195.

9. Блінцов С. В., Грудініна Г. С. Застосування штучної нейронної мережі для побудови оптимального за швидкістю регулятора швидкості руху підводного апарата. Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 54-56.

10. Грудініна Г. С. Розробка ПІД-регулятора швидкості руху підводного апарата. Інформаційно-керуючі системи і комплекси: Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів, молодих вчених. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 88-90.

11. Блінцов С. В., Грудініна Г. С. Особливості апроксимації даних за допомогою штучних нейронних мереж для побудови оптимальної системи керування швидкістю руху підводного апарата. Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 78-80.

12. Грудініна Г. С. Синтез гібридної системи керування рухом самохідного підводного апарата. Інформаційно-керуючі системи і комплекси: Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів, молодих вчених. – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 86-87.

13. Грудініна Г. С. Аналіз методів дослідження динаміки просторового руху АПА. Підводна техніка і технологія: Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 9-12.

14. Грудініна Г. С. Проблематика створення систем керування просторовим рухом в умовах нестаціонарності параметрів об'єкту керування. Сучасні

проблеми автоматики та електротехніки: Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 51-52.

15. Грудініна Г. С. Удосконалення математичної моделі рушійно-стернового комплексу (РСК) АНПА при роботі в косому потоці. Підводна техніка і технологія: Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 68-72.

16. Блінцов С. В., Бурунін, А. П., Грудініна Г. С. Математична модель для дослідження динаміки автономного підводного апарата на плоскій циркуляції. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: VIII Міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв: НУК, 2017. – С. 335-336.

17. Грудініна Г. С. Математичне моделювання динаміки АНПА з гребним гвинтом в поворотній насадці. Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: Всеукраїнська науково-технічна конференція. – Миколаїв: НУК, 2018. – С. 93-94.

18. Грудініна Г. С. Розробка математичної моделі для дослідження динаміки АНПА з гребним гвинтом в поворотній насадці. Сучасні інформаційні та інноваційні технології: X Міжнародна науково-практична конференція. – Херсон: Херсонська морська державна академія, 2018. – С. 193-195.

19. Грудініна Г. С. Дослідження сили упору рушійно-рульового комплексу АНПА в косому потоці води методом комп'ютерного моделювання. *Автоматика та електротехніка*: Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. – Миколаїв: НУК, 2021. – С. 11-14.

20. Грудініна Г. С. Овсянников В. М. Підвищення точності стабілізації швидкості АНПА при плоскому криволінійному русі. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: XII Міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв: НУК, 2021. – С. 380-383.

21. Грудініна Г. С. Удосконалення системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА. Підводна техніка і технологія: XI Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2021. – С. 113-118.

22. Блінцов В. С., Грудініна Г. С., Король Ю. М., Надточий А. В. Дослідження роботи рушійно-рульового комплексу підводного апарата в косому потоці води методами математичного моделювання. Підводна техніка і технологія: XI Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2021. – С. 13-27.

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

ABSTRACT

Hrudinina H. S. Improvement of an autonomous underwater vehicle speed (velocity) stabilization system. Manuscript copyright.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.03 – control systems and processes (15 – Automation and instrumentation). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2023.

The object of research – is the speed stabilization process of movement of an autonomous unmanned underwater vehicle in an oblique water flow.

The subject of research – is the autonomous unmanned underwater vehicle speed correction when the propulsion and steering device works in an inclined water flow.

As a result of the conducted research, the work presents an analysis of existing projects of autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs), defines the structural and functional features of AUVs, and typical modes of movement of underwater vehicles. The structure of speed regulators of the underwater vehicle as part of the automatic control system (ACS) has been developed.

A mathematical model of the dynamics of the AUVs was applied as a component of the system of automatic control of the speed of the apparatus.

The mathematical model of the AUVs is supplemented with the equations of propulsion and steering devices (PSD) of the type «propeller – rudder», «propeller – rotating nozzle» and «rotating screw column» as control objects.

The operability of the synthesized model of the AUVs with a propulsion and steering device has been proven.

The speed regulator of the speed of movement of the underwater vehicle has been developed.

The controller developed on the basis of an artificial neural network was synthesized in the Simulink Matlab system.

The study of the dependence of the stop of the propulsion and steering device on the angle of attack of the flow was carried out by the method of computer simulation.

The structure of the AUVs ACS with the regulator of the movement speed of the apparatus and the regulator of stabilization of the PSD stop when working in an oblique flow has been developed.

The results of modeling the plane curvilinear motion of the AUVs with the developed PSD models are presented.

The results of Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling of the operation of: a screw in a guide nozzle (type PN160-1) in an oblique flow are presented; a screw in a rotary nozzle (type PN160-2) with specified nozzle translation angles; rotary screw column.

The results of the simulation of the automatic control of the speed of the AUVs with the stabilization of the PSD stop during the flat curvilinear movement of the underwater vehicle are presented.

It can be seen from the presented graphs that the developed ACS effectively compensates the deviation of the stop of the propulsion device. The simulation results are summarized in tables, according to which it is possible to evaluate the effectiveness of the ACS in different modes of movement of the AUVs.

The comparative characteristics of the operation of the speed-optimal regulator with the speed of the AUVs movement and the classic PID regulator are given.

The scientific novelty of the obtained results lies in the fact that on the basis of theoretical and experimental studies by the recipient for the first time:

- based on a mathematical model of the rectilinear movement of an autonomous uninhabited underwater vehicle, an automatic control system optimal in terms of speed was developed, which allows changing the speed of the underwater vehicle from any initial to any final speed in a minimum period of time with compensation for the effect of external disturbances;

- the speed-optimized system of automatic control of the speed of the AUV was improved by using an artificial neural network as a regulator with a step change in the speed of the device, which makes it possible to abandon the use of a mathematical model and not waste time on decision-making;

- on the basis of the developed simulation model of flat curvilinear movement of the AUV, we obtained the thrust diagrams of the propulsion device, which, by the nature of the influence of the oblique flow on the PSD, fully correspond to the results obtained experimentally in experimental basins, which forms the theoretical basis for the synthesis of a high-precision system of automatic control of the movement of the AUV in flat curvilinear movement;

- an automatic system of stabilization of the speed of movement of the AUV was synthesized, the improvement of the accuracy of which is achieved due to the stabilization of the general thrust of the PSD during the operation of the mover in an oblique flow of oncoming water.

The practical application of the scientific results obtained in the dissertation, in particular, the synthesized system of automatic control of the speed of movement of an underwater vehicle, with clarification of the thrust value of the thruster operating in an oblique flow of water, forms a theoretical basis for the construction and serial production of autonomous uninhabited underwater vehicles.

The mathematical model of the dynamics of an autonomous uninhabited underwater vehicle, the propulsion and steering device of which functions in an oblique flow of water, was used in the course and diploma design of masters in the educational and professional program «Marine Robotics» specialty 141 – «Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics».

The scientific propositions and results presented in the dissertation work and submitted for defense were obtained personally by the applicant. Among them: definition of the goal, setting research tasks; analysis of existing projects of autonomous unmanned underwater vehicles; development of the structure of regulators included in the automatic control system; synthesis in Simulink of the speed regulator based on the mathematical model of the AUVs dynamics, developed by the scientific school «Underwater Technology» of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding; sampling of data for learning a neural network as part of a speed-optimized regulator; the model of the dynamics of the AUVs with the equations of

propulsion and steering devices of the type «propeller – rudder», «propeller - rotating nozzle» and «rotating screw column».

The acquirer personally developed a simulation model for simulating the plane curvilinear motion of the AUVs. By means of mathematical modeling, a study of the hydrodynamic parameters of the applied types of propulsion and steering devices during plane curvilinear motion was carried out. The performance of the developed models was evaluated based on the results of CFD modeling of the types of PSD used in work. The structure of the AUVs ACS with the regulator of the speed of the apparatus and the regulator of the stabilization of the PSD stop when working in an oblique flow was developed and implemented in the Simulink system.

The main scientific and practical results of the work were published and discussed at conferences: All-Ukrainian scientific and technical conference of students, postgraduates, young scientists with international participation «Electrical engineering and electromechanics» (2008, Mykolaiv); International scientific and technical conference of students, postgraduates, young scientists «Information and control systems and complexes» (2009, 2010, Mykolaiv); International scientific and technical conference «Problems of automation and electrical equipment of vehicles» (2009, 2010, Mykolaiv); All-Ukrainian scientific and technical conference with international participation «Modern problems of automation and electrical engineering» (2015, 2018, Mykolaiv); All-Ukrainian scientific and technical conference with international participation «Underwater equipment and technologies» (2015, 2016, 2021, Mykolaiv); International Scientific and Technical Conference «Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering» (2017, 2020, 2021, Mykolaiv); X International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Innovative Technologies» (2018, Kherson); All-Ukrainian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists «Automatics and electrical engineering» (2021, Mykolaiv).

The main results of the dissertation were published in 22 papers, including 7 articles in scientific publications of Ukraine, including 4 articles in specialized publications, 1 article in a journal included in the Scopus scientometric database.

These publications contain the results of the direct work of the acquirer at separate stages of the research, fully reflect the main provisions and conclusions of the work. Authorship of the recipient in published scientific works is agreed with the co-authors.

Keywords: mathematical modeling, autonomous underwater vehicle, propulsion-steering device «propeller – rudder», «propeller – rotary nozzle», screw rotary column, automatic control system, speed stabilization.

List of published works on the topic of the dissertation:

1. Blintsov S. V., Hrudinina H. S. Zastosuvannia matematychnoi modeli rukhu pidvodnogo aparata dlia pobudovy optymalnoi za shvydkodiieiu systemy keruvannia z kompensatsiieiu zovnishnikh zburen. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia im. admiral Makarova. – Mykolaiv: NUK, 2008. – № 3(420). – S. 77-83.

2. Aloba L. T., Blintsov S. V., Hrudinina H. S. (2017). Matematyчне modeliuвання динаміки автонічного неаселеного підводного апарата на площі тиску. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia im. admiral Makarova – Mykolaiv: NUK, 2017. – № 4. – S. 53-60.

3. Burunina Zh. Yu, Aloba L. T., & Hrudinina H. S. (2018). Mathematical Modeling of the Automatic Control System for an Autonomous Underwater Vehicle as a Group Agent. Shipbuilding and Marine Infrastructure. NUOS, 2018. № 1(9). P. 29-35.

4. Blintsov V. S., Hrudinina H. S. Osoblyvosti keruvannia stabilizovanykh rukhom ANPA v umovakh dii zovnishnikh zburen. Informatsiini systemy, mekhanika ta keruvannia. Kyiv: KPI, 2018. – № 19. – S. 122-137

5. Hrudinina, H. S. Mathematical modeling of an autonomous uninhabited underwater vehicle dynamics with propeller in the rotary nozzle. Shipbuilding and Marine Infrastructure. NUOS 2018. № 2 (10). P. 144-153.

6. Blintsov V. S, Hrudinina H. S. Mathematical modeling of autonomous underwater vehicle propulsion and steering complex operation in oblique (beveled) water flow. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. № 4/9 (100). P. 19-26.

7. Blintsov V. S., Hrudinina H. S., Burunina Zh. Yu., ta Nadtochyi A. V. Udoskonalennja systemy avtomatychnoho keruvannia shvydkistiu rukhu avtonomnoho nenaselenoho pidvodnoho aparatu. Zhurnal «Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky». 2022. Tom 33 (72) № 4, S. 56-65.

8. Blintsov S. V., Hrudinina, H. S. Pobudova optymalnoi po shvydkodii systemy keruvannia pidvodnym aparatom v umovakh nevyznachenosti yoho parametriv. Elektrotehnika i elektromekhanika: materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv, molodykh vchenykh z mizhnarodnoiu uchastiu. – Mykolaiv: NUK, 2008. – S. 193-195.

9. Blintsov S. V., Hrudinina H. S. Zastosuvannia shtuchnoi neironnoi merezhi dlia pobudovy optymalnoho za shvydkodiieiu rehuliatora shvydkosti rukhu pidvodnoho aparata. Problemy avtomatyky ta elektroobladnannia transportnykh zasobiv: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. – Mykolaiv: NUK, 2009. – S. 54-56.

10. Blintsov S. V., Hrudinina H. S. Rozrobka PID-rehuliatora shvydkosti rukhu pidvodnoho aparata. Informatsiino-keruiuchi systemy i komplekсы: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv, molodykh vchenykh. – Mykolaiv: NUK, 2009. – S. 88-90.

11. Blintsov S. V., Hrudinina H. S. Osoblyvosti aproksymatsii danykh za dopomohoiu shtuchnykh neironnykh merezh dlia pobudovy optymalnoi systemy keruvannia shvydkistiu rukhu pidvodnoho aparata. Problemy avtomatyky ta elektroobladnannia transportnykh zasobiv: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. – Mykolaiv: NUK, 2010. – S. 78-80.

12. Blintsov S. V., Hrudinina H. S. Syntez hibrydnoi systemy keruvannia rukhom samokhidnoho pidvodnoho aparata. Informatsiino-keruiuchi systemy i komplekсы: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv, molodykh vchenykh. – Mykolaiv: NUK, 2010. – S. 86-87.

13. Hrudinina H. S. Analiz metodiv doslidzhennia dynamiky prostorovoho rukhu APA. Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia: materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu. – Mykolaiv: NUK, 2015. – S. 9-12.

14. Hrudinina H. S. Problematyka stvorennia system keruvannia prostоровym rukhom v umovakh nestatsionarnosti parametriv ob'ektu keruvannia. Suchasni problemy avtomatyky ta elektrotekhniki: Materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu. – Mykolaiv: NUK, 2015. – S. 51-52.

15. Hrudinina H. S. Udoskonalennia matematychnoi modeli rushiino-kermovoho kompleksu ANPA pry roboti v kosomu pototsi. Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia: materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu. – Mykolaiv: NUK, 2016. – S. 68-72.

16. Blintsov S. V., Hrudinina H. S., Burunin, A. P. Matematychna model dlia doslidzhennia dynamiky avtonomnogo pidvodnogo aparata na ploskii tsyrkuliatsii. Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. – Mykolaiv: NUK, 2017. – S. 335-336.

17. Hrudinina H. S. Matematyчне modeliuвання dynamiky ANPA z hrebnym hvyntom v povorotnii nasadtsi. Suchasni problemy avtomatyky ta elektrotekhniki: materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsiia. – Mykolaiv: NUK, 2018. – S. 93-94.

18. Hrudinina H. S. Rozrobka matematychnoi modeli dlia doslidzhennia dynamiky ANPA z hrebnym hvyntom v povorotnii nasadtsi. Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnolohii: materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Kherson: Khersonska derzhavna morska akademiia, 2018. – S. 193-195.

19. Hrudinina H. S. Doslidzhennia syly uporu rushiino-rulovoho kompleksu ANPA v kosomu pototsi vody metodom kompiuternoho modeliuвання. Avtomatyka ta elektrotekhnika: materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh. – Mykolaiv: NUK, 2021. – S. 11-14.

20. Hrudinina H. S. Ovsjannikov V. M. Pidvyshchennia tochnosti stabilizatsii shvydkosti ANPA pry ploskomu kryvoliniinomu rusi. Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: XII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia. – Mykolaiv: NUK, 2021. – S. 380-383.

21. Hrudinina H. S. Udoskonalennia systemy avtomatychnoho keruvannia shvydkistiu rukhu ANPA. Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia: XI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia z mizhnarodnoi uchashti. – Mykolaiv: NUK, 2021. – S. 113-118.

22. Blintsov V. S., Korol Yu. M., Nadtochy A. V., Hrudinina H. S. Doslidzhennia roboty rushiino-rulovoho kompleksu pidvodnoho aparata v kosomu pototsi vody metodamy matematychnoho modeliuvannia. Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia: XI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia z mizhnarodnoi uchashti. – Mykolaiv: NUK, 2021. – S. 13-27.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ.....	13
1.1 Загальна характеристика автономних ненаселених підводних апаратів.....	13
1.2 Аналіз типових режимів керованого руху АНПА	17
1.3 Принципи побудови сучасних систем керування АНПА	22
1.4 Аналіз напрямків удосконалення систем керування АНПА	33
1.5 Постановка задачі дослідження.....	39
Висновки до розділу 1.....	41
РОЗДІЛ 2	
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	43
2.1 Постановка задачі математичного моделювання руху АНПА для дослідження ефективності систем керування	43
2.2 Застосування математичної моделі динаміки АНПА у складі системи автоматичного керування	44
2.3 Моделюючий комплекс для комп'ютерного дослідження гідродинамічних параметрів РКП при криволінійному русі	70
2.4 Попередня верифікація отриманих шляхом математичного моделювання коефіцієнтів моменту та упору РКП в косому потоці води.....	77
Висновки до розділу 2.....	81

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ АНПА ЗІ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ УПОРУ РКП.....	83
3.1 Розробка системи стабілізації швидкості руху АНПА з компенсацією зовнішнього збурення	83
3.2 Синтез системи стабілізації швидкості руху автономного підводного апарата в умовах невизначеності його параметрів	89
3.3 Моделювання руху АНПА з рушійно-кермовим пристроєм	98
3.4 Розробка структури системи керування швидкістю АНПА з корегуванням упору РКП при криволінійному русі.....	108
Висновки до розділу 3.....	110

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИНТЕЗОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ АНПА МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	112
4.1 Конструктивні особливості рушійно-кермових пристроїв, що досліджувались.....	112
4.2 Дослідження працездатності розроблених моделей.....	115
4.3 Комп'ютерне моделювання роботи розробленої САК швидкістю руху АНПА підвищеної точності.....	128
Висновки до розділу 4.....	134
ВИСНОВКИ.....	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
ДОДАТКИ.....	152