

## РЕФЕРАТ

**Актуальність теми.** Автономні підводні апарати відіграють критично важливу роль у дослідженні океану, моніторингу морського середовища, пошуково-рятувальних операціях та промислових застосуваннях. Однак підводне середовище характеризується високим рівнем невизначеності, що створює значні виклики для систем навігації та управління. Традиційні підходи до навігації AUV, такі як методи на основі моделей, часто виявляються недостатньо ефективними в умовах змінних течій, комунікаційних затримок, шумів датчиків та інших збурень. Тому застосування методів глибокого навчання з підкріпленням для створення більш адаптивних та завадостійких систем навігації є перспективним напрямом досліджень, який потенційно може вирішити зазначені проблеми.

**Об'єктом дослідження** є процес навігації безпілотних підводних апаратів в умовах стохастичних збурень та невизначеності навколишнього середовища.

**Предметом дослідження** є методи глибокого навчання з підкріпленням (зокрема алгоритм Proximal Policy Optimization), а також підходи зменшення "прогалини в реальності" (Domain Randomization та Curriculum Learning) для забезпечення робастності навігаційних систем.

**Мета роботи:** розробка способу робастної навігації безпілотних підводних апаратів, здатного ефективно компенсувати вплив непередбачуваних гідродинамічних збурень (течій) та похибок навігаційних сенсорів, шляхом інтеграції алгоритмів глибокого навчання з підкріпленням та методології Sim-to-Real.

**Наукова новизна** полягає в наступному:

1. Розвиток методології Sim-to-Real для систем навігації підводних дронів шляхом адаптації комбінованого підходу

Domain Randomization та Curriculum Learning до специфіки підводного середовища.

2. Проведено систематичний аналіз та кількісну валідацію поведінки DRL-агентів при їх перенесенні з ідеалізованих симуляційних умов у стохастичні середовища.

**Практична цінність** одержаних результатів полягає у створенні реалістичного імітаційного середовища для безпілотних підводних апаратів, яке враховує нелінійні гідродинамічні ефекти, стохастичні течії та шум сенсорів. На його основі може бути розроблено робастний спосіб навігації з використанням глибокого навчання з підкріпленням та рандомізації домену, який дозволяє ефективно долати розрив між симуляцією та реальністю (Sim-to-Real gap). Запропонований підхід забезпечує формування плавної та енергоефективної політики керування, що є критично важливим для економії заряду батареї під час експлуатації реальних платформ.

**Апробація роботи.** Основні положення і результати роботи були представлені та обговорювались на науковій конференції магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютинг» ПМК-2025 (Київ, 19-21 листопада 2025 р.). Також результати досліджень були опубліковані у журналі категорії “Б” “Таврійський науковий вісник”, серія “Технічні науки” випуск 6, 2025 рік.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська дисертація складається з вступу, трьох розділів та висновків.

У *вступі* подано загальну характеристику роботи, зроблено оцінку сучасного стану проблеми, обґрунтовано актуальність напрямку досліджень, сформульовано мету і задачі досліджень, показано наукову новизну отриманих результатів і практичну цінність роботи, наведено відомості про апробацію результатів і їхнє впровадження.

*У першому розділі* розглянуто існуючі методи автономного управління дронами, способи розробки подібних систем та їх застосування у реальних задачах. Проведено аналіз, який дає змогу визначити основні переваги та недоліки цих навчальних посібників.

*У другому розділі* описано та обґрунтовано обрані методи розробки системи навігації для автономних підводних дронів.

*У третьому розділі* описано розроблену систему та функціонал усіх її компонентів.

*У висновках* представлені результати проведеної роботи.

Робота представлена на 92 аркушах, містить посилання на список використаних літературних джерел.

**Ключові слова:** безпілотний підводний апарат (БППА), агент штучного інтелекту, глибинне навчання, Sim-to-Real, завадостійка навігація.

## ABSTRACT

**Relevance of the topic.** Autonomous underwater vehicles play a critical role in ocean exploration, marine environment monitoring, search and rescue operations, and industrial applications. However, the underwater environment is characterized by a high level of uncertainty, which creates significant challenges for navigation and control systems. Traditional approaches to AUV navigation, such as model-based methods, often prove to be insufficiently effective in conditions of variable currents, communication delays, sensor noise, and other disturbances. Therefore, the application of deep reinforcement learning methods to create more adaptive and noise-resistant navigation systems is a promising research direction that can potentially solve these problems.

**The object of research** is the process of navigation of unmanned underwater vehicles under conditions of stochastic disturbances and environmental uncertainty.

**The subject of research** is deep reinforcement learning methods (in particular, the Proximal Policy Optimization algorithm), as well as approaches to reducing the "reality gap" (Domain Randomization and Curriculum Learning) to ensure the robustness of navigation systems.

**Purpose of the work:** development of a method for robust navigation of unmanned underwater vehicles, capable of effectively compensating for the influence of unpredictable hydrodynamic disturbances (currents) and navigation sensor errors, by integrating deep reinforcement learning algorithms and Sim-to-Real methodology.

**The scientific novelty** is as follows:

1. Development of a Sim-to-Real methodology for underwater drone navigation systems by adapting the combined approach of Domain Randomization and Curriculum Learning to the specifics of the underwater environment.

2. A systematic analysis and quantitative validation of the behavior of DRL agents when transferred from idealized simulation conditions to stochastic environments was carried out.

**The practical value** of the results obtained lies in the creation of a realistic simulation environment for unmanned underwater vehicles, which takes into account nonlinear hydrodynamic effects, stochastic flows and sensor noise. On its basis, a robust navigation method using deep reinforcement learning and domain randomization can be developed, which allows effectively overcoming the gap between simulation and reality (Sim-to-Real gap). The proposed approach ensures the formation of a smooth and energy-efficient control policy, which is critically important for saving battery power during the operation of real platforms.

**Approbation of the work.** The main provisions and results of the work were presented and discussed at the scientific conference of master's and postgraduate students "Applied Mathematics and Computing" PMK-2025 (Kyiv, November 19-21, 2025). The research results were also published in the category "B" journal "Tavria Scientific Bulletin", series "Technical Sciences" issue 6, 2025.

**Structure and scope of work.** The master's thesis consists of an introduction, three chapters, and conclusions.

*The introduction* provides a general description of the work, assesses the current state of the problem, justifies the relevance of the research direction, formulates the goal and objectives of the research, shows the scientific novelty of the results obtained and the practical value of the work, and provides information on the testing of the results and their implementation.

*The first section* examines existing methods of autonomous drone control, how to develop such systems, and how to apply them in real-world applications. An analysis is conducted to identify the main advantages and disadvantages of these training manuals.

*The second section* describes and justifies the selected methods for developing a navigation system for autonomous underwater drones.

*The third section* describes the developed system and the functionality of all its components.

*The conclusions* present the results of the work carried out.

The work is presented on 92 pages and contains references to the list of literary sources used.

**Keywords:** unmanned underwater vehicle (UUV), artificial intelligence agent, deep learning, Sim-to-Real, jamming-resistant navigation.