УДК 004

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В СФЕРІ ВИРОБНИЦТВА, НАВЧАННЯ, ТРЕНУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ПЛАВЗАСОБІВ, ПЛАТФОРМ ТА СИСТЕМ

Яворський Д.К.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Технічний директор, Компанія «MPS Development»
ORCID: 0009-0009-9467-3444

Анотація. *Сформовані основні принципи побудови математичних моделей безпілотних плавзасобів, платформ та систем. Розглянуті та проаналізовані основні проблеми та складності в математичному моделюванні в галузі виробництва, навчання та експлуатації безпілотних плавзасобів, платформ та систем.*
Ключові слова**:** *Безпілотні плавзасоби; симулятори; моделювання; БпЛА, архітектура.*

Вступ. В сфері безпілотних літальних комплексів симуляційні технології дуже просунулись за останні кілька років та вийшли на рівень майже повного покриття потреб виробництва та підготовки екіпажів. У світі існує більше ніж 50 симуляторів БпЛА від безкоштовних до тих, що коштують сотні тисяч доларів.

В сфері безпілотних човнів, великих чи малих, не так багато симуляторів здатних математично змоделювати рух безпілотників.

Дуже важливою різницею з БпЛА симуляторами є моделювання умов руху, як над водой так і під водою які, коректна робота бортові систем, сенсорів, маніпуляторів, графіка має бути вкрай схожою на реальну (забруднення, мала видимість тощо а не ідеальні умови), моделювання гідродинаміки (буйноватість, вплив води, погоди, хвиль, течій тощо).

Симулятори край важливі для даних типів систем через те, що тестування реальних систем небезпечно та коштовне [1], також дуже важливо правильно симулювати умови роботи систем. [2-3]

Мета дослідження. Проаналізувати існуючі рішення на по симуляторам надводних та підводних безпілотних систем, знайти найкращу архітектуру побудови симуляторів для даних типів БС.

Основний текст. Одним із ефективних та дієвих інноваційних підходів, які сьогодні починають широко використовуватись для підготовки військових фахівців це симуляційні технології, які побудовані на наступних базових принципах та поняттях: симуляція це метод, який використовує модель протягом тривалого часу, імітація операцій реального процесу, операції або системи.

Моделювання і симуляція це використання моделей, серед яких емулятори, прототипи, для створення інформаційного образу як підґрунтя для навчання та тренування імітації дій, а також формування і прийняття рішень. У більшості випадків ці терміни вживають в однаковому значенні. Модель це фізичне, математичне, або логічне відображення системи, явища, адміністративної структури, процесу, операції та тощо. Симулятор (тренажер) це пристрій, комп’ютерна програма або система, яка і створює симуляцію для навчання, формування та тренування умінь і навичок, машина яка на екрані створює візуально ситуацію наближену до реальності з використанням зображення, звуку, руху, запаху моделі транспортного засобу, зброї, обладнання, технічної платформи, безпілотних та роботизованих систем та тощо.

Основним інструментарієм моделювання є математичне моделювання (ММ), це метод аналізу поведінки реальних об'єктів та процесів за допомогою їх математичного опису, який називається математичною моделлю. ММ включає побудову моделі об'єкта на основі його вибраних характеристик та подальше її дослідження з використанням математичних методів (аналітичних, чисельних, імітаційних), а також інтерпретацією одержаних результатів для симуляції і прогнозування поведінки реальної системи.

Автор проаналізував надводні та підводні системи по видам робіт які вони можуть виконувати.

Оглядово-пошукові роботи, це інспекція підводних споруд та комунікацій (кабелі, трубопроводи, палі, дамби), огляд корпусів суден і причалів, пошук затонулих об’єктів, підводна археологія.

Геологорозвідувальні та гідрографічні роботи, забезпечують топографічну зйомку, профілювання дна, картографування рельєфу і грунтів, вимірювання течій і стратифікації, картографування під льодом, інспекція льодових споруд і підльодових комунікацій, прокладання та обслуговування кабелів і трубопроводів у полярних умовах.

Науково-дослідні та екологічні дослідження для відбору проб води й донних відкладів, моніторинга забруднень (нафта, сміття), випробування сенсорів.

Військові операції такі як патрулювання акваторій, розвідка, пошук і знешкодження підводних мін , охорона портів і гідротехнічних споруд, протидиверсійні дії.

Інспекційно-ремонтні та сервісні роботи, контроль конструкцій, локальні ремонти/заміни вузлів, обслуговування підводних станцій і докінг-станцій, приєднання й тестування кабелів/труб.

Пошуково-рятувальні та аварійні роботи, такі як пошук людей та об’єктів, огляд місць аварій, оцінка пошкоджень, доставка рятувальних засобів, ретрансляція зв’язку в районах НС.

Логістичні та мережеві функції: ретрансляція зв’язку, стан-кіперінг як навігаційний маяк/плавбаза, буксирування датчиків і сонара.

Інспекція узбережжя та критичної інфраструктури, контроль берегової лінії, дамб і мостів, платформ і причалів, виявлення розливів і витоків, спостереження за об’єктами КІ.

Навчально-тренувальні та випробувальні місії для відпрацювання процедур керування, докінг і заряджання, підтвердження алгоритмів уникнення перешкод, тестування COLREG(Convention on the International Regulations for Preventing Collisions)s.

На основі основних задач систем, автор проаналізував існуючі симулятори у світі, починаючи з комерційних. Ship Sim 3 моделює широкий спектр суден з детальними гідродинамічними та аеродинамічними силами (включаючи вплив лопатей гвинта, хвильові сили тощо) та підтримує стандартні інтерфейси автопілота. Він симулює датчики з налаштовуваними помилками та дозволяє апаратно-ін-текстове керування надводними та підводними транспортними засобами, що дозволяє повноцінно тестувати системи керування в лабораторних умовах. AUV Sim зосереджений на підводних транспортних засобах, він надає основу для створення та налаштування власного AUV/ROV (від невеликих торпед до ROV робочого класу) шляхом складання компонентів корпусу, рушіїв, керуючих поверхонь тощо. Потім конструктори можуть оцінити стійкість, маневреність і навіть підключити модель транспортного засобу до автопілота для апаратних випробувань перед будь-яким розгортанням у реальних умовах. Ці симулятори в основному використовуються для інженерного проектування, тестування та навчання операторів з розробки безпілотних суден. [5-6] PaleBlue ROV Trainer це промисловий тренажер із повною фізикою ROV/маніпуляторів,

множинними камерами/течіями, сценаріями навчання; орієнтація на сертифікаційний та операційний тренінг [7]

Розглянемо з відкритим кодом (Open source). Існує декілька симуляторів з відкритим кодом, які базуються на відомих системах та протоколах, які використовуються в симуляторах БпЛА: ROS, ROS2, Gazebo [8-11] , багаті фізичні плагіни й сценарії, багато напрацювання спільнотою, дозволяють інтегрувати різні системи в симулятор, робити кастомізацію під потреби виробника тощо. При тому вони більш прості, базова візуалізація відстають від високорівневих графічних рушіїв, складні гідроакустичні ефекти треба моделювати окремо. UUV Simulator по суті пакети плагінів до Gazebo + вузли ROS, 6-DOF динаміка з гідродинамікою, тягові установки, течії, сенсори (IMU/камери), мультиагентні місії. Добре підходить для контролю, навігації, інтервенцій під водою [8]. Virtual RobotX (VRX) simulator від Open Robotics це високоякісна симуляція USV моделі гідродинамічного опору/доданої маси, вітру, хвиль, рушіїв тощо; Ідеальний полігон для алгоритмів і COLREGs-сценаріїв [9]

Розглянемо спеціалізовані модулі/бібліотеки, які можна використовувати як окремий модуль в системі. StoneFish побудований на C++ бібліотека, використовує Bullet physics для морської робототехніки з розширеною гідродинамікою, широким парком сенсорів (у т.ч. оновлення 2025 р. для ML-досліджень). Можна використовувати для точного моделювання гідродинаміки у вигляді окремого модуля. Інтеграція через ROS та сценарії XML

Наступний тип симуляторів з відкритим кодом та з просунутою графікою. HoloOcean Базований на Unreal Engine 4, мульти агентність, набір підводних сенсорів, реалістична модель іміджинг-сонара, плюс проста Python-API. [12]

Розглянемо також симулятори навчання з підкріпленням (Reinforcement learning). MarineGym Побудований на базі Isaac Sim від NVIDIA, він робить акцент на прискореному паралельному моделюванні на графічному процесорі. MarineGym вирішує проблему браку підводних симуляторів, сумісних з RL, забезпечуючи тисячі кроків моделювання паралельно, досягаючи на порядок швидшого, ніж у реальному часі, навчання. [13]

***Висновки*:** Розглянуті основні проблеми та складності в математичному моделюванні в галузі виробництва, навчання та експлуатації надводних та підводних систем. Для експлуатації цих коштовних та складних систем вкрай важливо правильно та інтенсивно навчати майбутніх користувачів, а це краще за все робити спочатку на симуляторах і вже потім на реальних зразках В розрозці симуляторів треба використовувати комбінований підхід з використанням доступних графічних рушіїв, які дають гарну та реалістичну картинку (Unreal Engine 5) та гнучку комерційну модель. Сама складна задача в даному випадку це моделювання та візуалізація гідродинаміки, в даному випадку варто використовувати Unreal engine Fluid Flux plugin [14]. Для надводного човна його можна використовувати майже без додаткових налаштувань, а ось для підводного тільки для надводного використання та для візуалізації, рух під водою треба моделювати окремо (можна використовувати StoneFish з інтеграцією через ROS). Симуляція сенсорів теж робиться окремо на основі даних о поверхні, погодних умовах тощо. Дуже важливою рисою сучасних просунутих симуляторів є навчання з підкріпленням, яке дозволяє автоматизувати процеси тренування моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Potokar, A., та ін. (2022). HoloOcean Simulator. Robotics Institute, Carnegie Mellon University. https://www.ri.cmu.edu/app/uploads/2022/10/Potokar22icra.pdf

[2] Unmanned Surface Vehicle Simulator with Realistic Environmental Disturbances. (2019). Sensors, (19). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30832355
[3] A comprehensive study on modelling and control of autonomous underwater vehicle. (2023). arXiv. https://arxiv.org/html/2312.02690v2
[4] Британія робить ставку на морські безпілотники для боротьби з мінами. (2025). USM.Media.
https://usm.media/brytanija-robytj-stawku-na-morsjki-bezpilotnyky-dlia-borotjby-z-minamy
[5] Dynautics. Marine Simulator Ship SIM 3. https://www.dynautics.com/products/vessel-simulators/ship-sim-3
[6] Dynautics. AUV Sim. https://www.dynautics.com/products/vessel-simulators/auv-sim
[7] PaleBlue. ROV Trainer Simulator. https://pale.blue/solutions/rov-trainer-simulator
[8] Open source UUV Simulator. UUV Simulator Project. https://uuvsimulator.github.io
[9] Virtual RobotX (VRX) Simulator. (2021). RoboNation. https://robonation.org/app/uploads/sites/2/2021/09/VirtualRobotX2022_Technical-Guide_v1.0.pdf
[10] Project DAVE. (б. д.). ROS 2 Simulation Project. https://dave-ros2.notion.site
[11] MarineGym: An open-source marine robotics simulation environment. (2024). arXiv. https://arxiv.org/html/2410.14117v1
[12] Cieslac, P. (2019). StoneFish: An open-source simulation tool for marine robotics. University of Girona. https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/17075/Stonefish-CieslacPatryk.pdf
[13] Gazebo. Hydrodynamics Theory. https://gazebosim.org/api/sim/9/theory_hydrodynamics.html
[14] Imaginary Blend. (2025). Unreal plugin Fluid Flux: Documentation. https://imaginaryblend.com/2025/01/10/fluid-flux-documentation

Yavorskyi D.K.

Mathematical modeling in the field of production, education, training, and operation of unmanned vessels, platforms, and systems

Abstract. *The fundamental principles for constructing mathematical models of unmanned marine vehicles, platforms, and systems have been established. The main problems and challenges in the mathematical modeling of unmanned marine vehicles, platforms, and systems—across their design, training, and operation—have been examined and analyzed.*

Keywords: *Unmanned marine vehicles; simulators; modelling; UAV; architecture.*