

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140105>

УДК 629.584:681.5.017

С 40

DESIGN OF THE SIMULATOR OF THE MOTION OF THE UNMANNED AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE AS A COMPONENT OF THE SIMULATION COMPLEX

РОЗРОБКА СИМУЛЯТОРА РУХУ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА ЯК СКЛАДОВОЇ МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ

Andriy S. Sirivchuk

sirivchuk@mail.ua

ORCID: 0000-0003-2927-2600

А. С. Сірівчук,

асп.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The study of the automatic control system for the autonomous underwater vehicle is a complex and expensive process. Conducting experiments in test pools and open water may cause damage to expensive equipment. Therefore, the use of simulation complexes is a more efficient approach. The article aim is to describe the structure of the simulation complex designed for the study of the quality of the automatic control system. The main component of this complex is the simulator of the motion of the autonomous underwater vehicle. The structure of the simulator of the underwater vehicle allows connecting external software modules of the control of the underwater vehicle model to it. Thus, the change of the structure of the automatic control system for the autonomous underwater vehicle will not affect the operability of the simulator. The simulator of the motion of the autonomous underwater vehicle can be used in the study of the algorithms of the automatic control system, as well as a training simulator for operators of underwater vehicles.

Keywords: simulation; simulator; underwater vehicle; robotics.

Анотація. Проведення експериментів для дослідження системи автоматичного керування є важким та дорогим процесом. Більш ефективним у даному випадку є використання моделюючих комплексів. У статті наведено структуру моделюючого комплексу для дослідження якості системи керування та розроблено симулятор руху автономного підводного апарата.

Ключові слова: моделювання; симулятор; підводний апарат; робототехніка.

Аннотация. Проведение экспериментов для исследования системы автоматического управления является тяжелым и дорогим процессом. Более эффективным в данном случае является использование моделирующих комплексов. В статье представлена структура моделирующего комплекса для исследования качества системы управления и разработан симулятор движения автономного подводного аппарата.

Ключевые слова: моделирование; симулятор; подводный аппарат; робототехника.

REFERENCES

- [1] Bagnitskiy A.V., Inzartsev A.V. Avtomatizatsiya podgotovki missii dlya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v zadachakh obsledovaniya akvatorii [Automation of the preparation of the mission for the unmanned autonomous underwater vehicle in the tasks of the survey of water areas]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika – Underwater Investigations and Robotics*, 2010, no 2, pp. 17–24.
- [2] Lukomskiy Yu.A., Chugunov V.S. *Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi obektami* [Control systems of marine mobile units]. Leningrad, Sudostroenie Publ, 1988. 272 p.
- [3] Gurenko B.V., Fedorenko R.V., Beresnev M.A., Saprykin R.V., Pereverzev V.A. Razrabotka simulyatora avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo aparata (Development of the simulator of the autonomous underwater vehicle). *Inzhenernyy vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2014, no 3. Available at: <http://ivdon.ru/ru>.
- [4] Sirivchuk A.S. Rozrobka modulua keruvannia symulatorom prostorovoho rukhu pidvodnogo aparata [Development of the module for the control of the simulator of the spatial motion of the underwater vehicle]. *Materialy vseukrainskoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia»* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference with International Participation «Underwater Equipment and Technology»]. Mykolaiv, 2012. pp. 141–144.

- [5] Voytkunskiy Ya.I. *Spravochnik po teorii korablya. Tom 1* [Reference book on ship theory. Vol. 1]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 768 p.
- [6] Stavynskiy A.A., Blintsov S.V. Udoskonalennia matematychnoi modeli samokhidnoho pidvodnoho aparata dlia doslidzhennia prostorovoho rukhu [Improvement of the mathematical model of the self-propelled underwater vehicle for the study of a spatial movement]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2004, nr 3, pp. 161–166.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При використанні прив'язних підводних апаратів-роботів робоча зона обмежена кабель-тросом, тому для моніторингу підводної обстановки на великих глибинах або площах найбільш доцільно використовувати автономні ненаселені підводні апарати (АНПА).

До числа найбільш актуальних сфер застосування сучасних АНПА можна віднести:

оглядово-пошукові роботи, включаючи пошук та обстеження затонувлих об'єктів, інспекцію підводних споруджень і комунікацій (трубопроводів, кабелів);

геологорозвідувальні роботи, що включають топографічну й фото-відеозйомку морського дна, акустичне профілювання й картографування рельєфу;

підкригові роботи, у тому числі прокладка кабелю на морському та річковому дні, обслуговування систем спостереження й висвітлення підводної обстановки;

океанографічні дослідження;

роботи військового призначення, що включають, зокрема, розвідку, патрулювання, забезпечення безпеки об'єктів військової техніки, пошук і знешкодження морських мін.

Для такого виду підводної техніки актуальним є створення інтелектуальної системи керування АНПА для виконання задач моніторингу та різних режимів роботи з начіпним обладнанням. Такими режимами роботи можуть бути утримання підводного апарата на заданій точці (позиціонування АНПА), рух з постійною швидкістю тощо. Створення такої системи керування потребує розробки моделюючого комплексу для дослідження руху АНПА при різних режимах роботи системи керування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз публікацій показує, що створення симулятора руху АНПА є невід'ємною частиною при розробці або використанні системи керування АНПА [1, 3]. У роботі [1] симулятор руху призначений для підготовки місії АНПА, виведення маршруту руху в двовимірному та тривимірному просторі, що звільняє оператора від виконання рутинної роботи, а також його можна використовувати як тренажер. Симулятор руху, що наведений в [3], призначений для моделювання функціонування системи автоматичного керування, а також для дослідження роботи всіх модулів АНПА в цілому.

МЕТОЮ СТАТТІ є розробка симулятора руху підводного апарата як складової моделюючого комплексу для дослідження ефективності системи керування АНПА.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розробка системи керування АНПА потребує створення потужного моделюючого комплексу з гнучкою структурою (рис. 1), що дасть змогу вносити корективи та виконувати модернізацію комплексу без необхідності зміни кожного модуля окремо. Це досягається завдяки розділенню задач моделювання на декілька модулів та організації зв'язків між ними зовнішніми інтерфейсами.

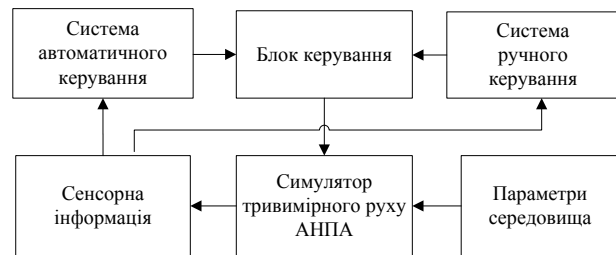


Рис. 1. Структура моделюючого комплексу

Моделюючий комплекс включає в себе шість основних блоків: симулятор тривимірного руху АНПА, модуль задавання параметрів середовища, блок керування АНПА, блок виведення та передачі сенсорної інформації, модуль системи автоматичного керування та систему ручного керування.

Модуль системи автоматичного керування являє собою зовнішній модуль і може бути як окремим програмним продуктом, так і програмним продуктом середовища MATLAB та Simulink, який моделює керуючий сигнал від системи керування, при зворотному зв'язку від симулятора руху.

Модуль задавання параметрів середовища враховує підводну обстановку, в якій функціонує АНПА. У цей модуль закладено дані про кількість, розташування та розміри перешкод, рельєф дна, силу та розподіл течії в просторі. Модуль входить у симулятор тривимірного руху, але також може бути отриманий зовні як допоміжна бібліотека. Внутрішній модуль не може змінювати своїх параметрів без переробки основної програми.

Задачею блока сенсорної інформації є архівування, відображення та передача зовнішнім блокам даних про поточний стан АНПА, що симулюється. Блок сенсорної інформації вбудований в програму «Симулятор руху АНПА» та має інтерфейс зв'язку з зовнішніми блоками.

Блок керування моделює керуючий сигнал симулятора руху АНПА, який впливає на величину напруги живлення гребних двигунів АНПА. Даний блок також частково вбудований в симулятор тривимірного руху, може отримувати дані сигналу керування від системи автоматичного керування або системи ручного керування в залежності від обраного режиму.

Система ручного керування базується на формуванні сигналу керування оператором ПА. У даному модулі оператор відповідно до власного досвіду та даних сенсорної інформації, що подається в графічному вигляді, за допомогою пристроїв введення задає необхідні сигнали керування. Як пристрій введення можливо використовувати клавіатуру або джойстик.

Задачею симулятора руху є розрахунок кінематичних параметрів АНПА під дією сигналів керування та збурень, а також моделювання сенсорних даних.

Структура програми-симулятора руху АНПА (рис. 2) має внутрішні модулі керування двигунами, модуль зовнішніх збурень, модуль розрахунку математичної моделі АНПА і модуль виведення поточної інформації на екран монітора та архівування даних.

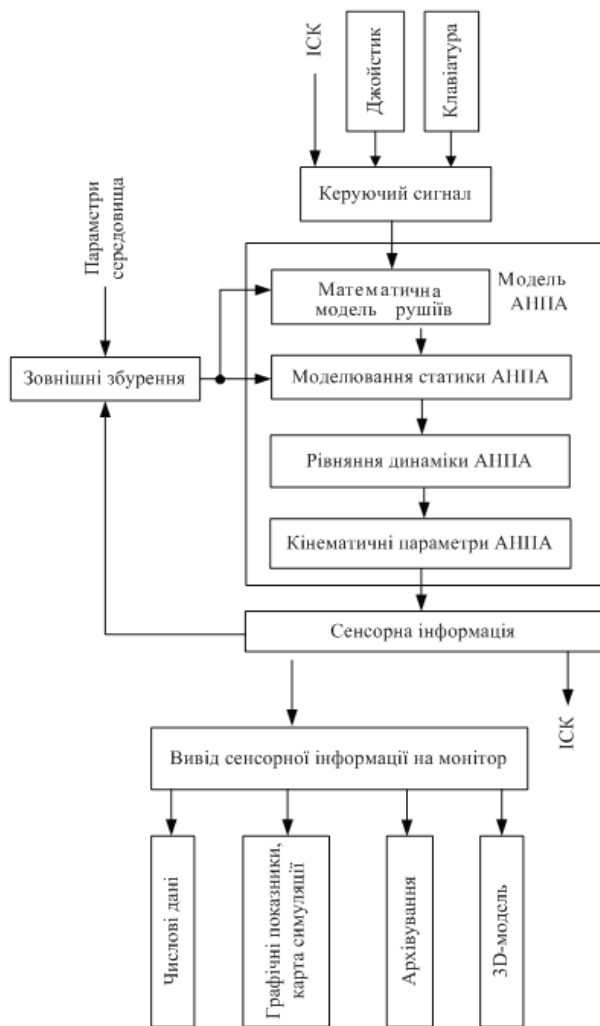


Рис. 2. Структура програми-симулятора АНПА

Наявність усіх необхідних для роботи внутрішніх модулів надає можливість тестувати програму без залучення інших складових моделюючого комплексу.

До складу розробленої програми входить модуль ручного керування рухом АНПА за допомогою джойстика або клавіатури. Даний модуль був розроблений за допомогою бібліотеки *DirectInput* [4], що дає змогу застосовувати пристрої введення, використовуючи їх драйвери. Це дозволяє використовувати пристрої введення без прив'язки до виробника або моделі. У налаштуваннях програми обирається один з трьох варіантів керування: клавіатура, джойстик або зовнішній інформаційний потік.

Зовнішні збурення являють собою суму параметрів середовища та власних кінематичних параметрів АНПА. Як внутрішні параметри середовища генерується декілька перешкод циліндричної форми у випадкових координатах з різними радіусами, а течія в кожній точці простору відсутня. За необхідності задання інших параметрів навколишнього середовища використовується зовнішній файл з набором необхідних параметрів.

Математична модель АНПА складається з декількох підмодулів: математичної моделі рушіїв та математичної моделі корпусу АНПА, що в свою чергу поділяється на три частини – статику, кінематику та динаміку.

Як рушії використовуються електродвигуни (ЕД) постійного струму та гребні гвинти (ГГ) в насадках. Узагальнена математична модель цих елементів АНПА описана в роботі [6]. У роботі використовуються наступні диференціальні рівняння:

$$L_{ep} \frac{di_{ep}}{dt} = K_u u_{ep} - r_{ep} i_{ep} - \frac{c_{ep} \Phi_{ep}}{k_g} \omega_{ep};$$

$$J_{ep} \frac{d\omega_{ep}}{dt} = M_{ep} - Q_{ep};$$

$$M_{em} = c_{ep} \Phi_{ep} i_{ep};$$

$$M_{ep} = \frac{1}{k_g} (M_{em} - Q_r);$$

$$Q_r = 4\mu\pi r^3 \frac{\omega_{ep}}{k_g} \left(\frac{L_r}{r} + \frac{L_r}{2\delta_1} + \frac{r}{4\delta_2} \right);$$

$$J = \frac{2\pi V_{ep}}{\omega_{ep} D_{ep}};$$

$$Q_{ep} = \begin{cases} \frac{K_{op} \rho D_{ep}^5}{4\pi^2} \omega_{ep}^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_g \rho D_{ep}^3 V_{ep}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases}$$

$$F_{ep} = \begin{cases} \frac{K_{fp} \rho D_{ep}^4}{4\pi^2} \omega_{ep}^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_g \rho D_{ep}^2 V_{ep}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1), \end{cases}$$

де L_{ep} – індуктивність якоря ЕД; i_{ep} – миттєве значення електричного струму якоря ЕД; K_u – коефіцієнт підсилення регулятора напруги ЕД; u_{ep} – керуючий сигнал регулятора напруги ЕД; r_{ep} – опір якоря ЕД; c_{ep}, Φ_{ep} – електромагнітні параметри ЕД; k_g – коефіцієнт передачі редуктора; ω_{ep} – частота обертання гребного гвинта; J_{ep} – сумарний момент інерції системи, приведений до ГГ; M_{em} – рушійний момент ЕД; M_{ep} – рушійний момент ЕД, приведений до ГГ; Q_r – гідродинамічний момент опору обертання ротора в маслі, що заповнює ЕД; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості масла; L_r, r – довжина та радіус ротора; δ_1 – зазор між ротором і статором; δ_2 – зазор між торцевими поверхнями ротора і кришками ЕД; J – відносний крок ГГ; V_{ep} – проекція

вектора швидкості переміщення електрорушійного пристрою (ЕРП) відносно води на вісь прямого ходу ЕРП; D_{ep} – діаметр ГГ; Q_{ep} – гальмівний момент ГГ; $K_Q = f(J)$ та $K_q = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують момент гребного гвинта; ρ – питома густина води; F_{ep} – рушійна сила (упор) гребного гвинта; $K_F = f(J)$ та $K_f = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують упор гребного гвинта.

Коефіцієнти K_Q, K_q, K_F, K_f є нелінійними і визначаються із графічних залежностей, які наведені на рис. 3 для ГГ з $P_{ep}/D_{ep} = 1,2$ та $A_E/A_0 = 0,8$, де P_{ep} – крок перерізу лопаті (крок гвинтової координати); A_E – площа випрямленої поверхні лопатей; A_0 – площа диска ГГ [5].

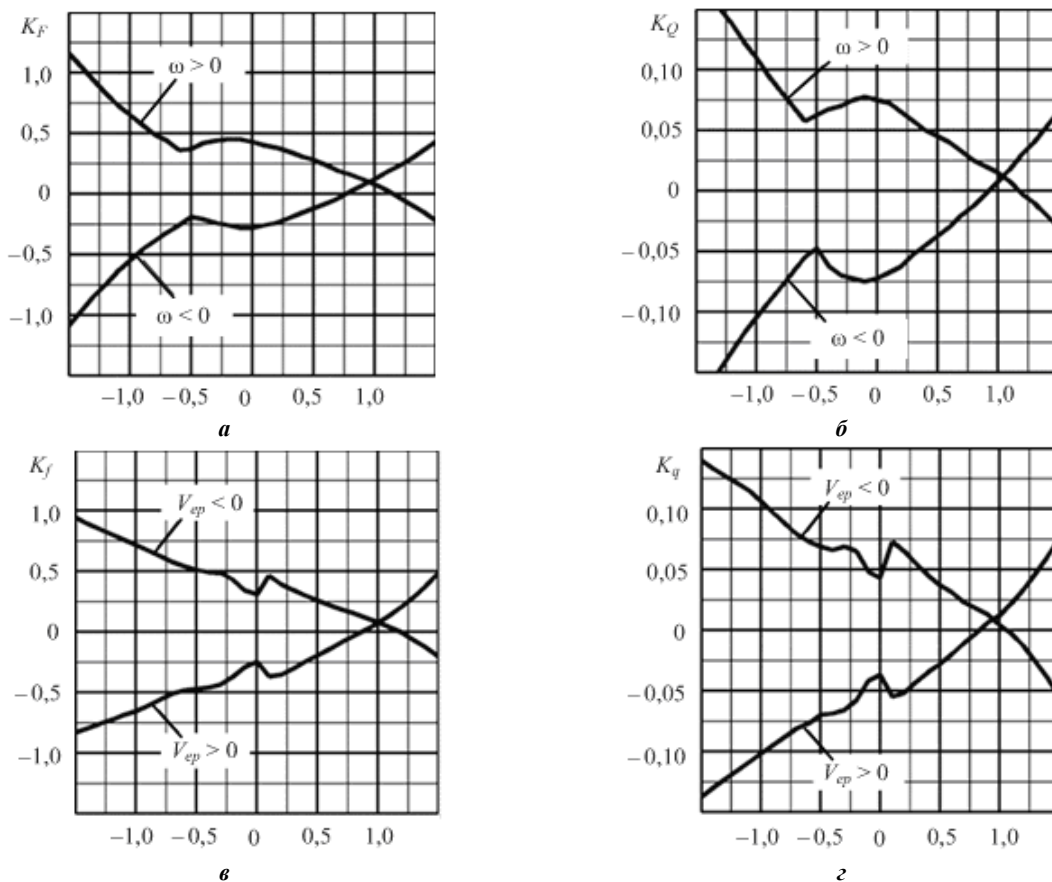


Рис. 3. Криві дії гребного гвинта: а, б – для прямого режиму ЕРП; в, г – для реверсивного режиму ЕРП

Кожна складова вектора керуючої сили $\vec{F}_{ep} = \{F_{epx}, F_{epy}, F_{epz}\}_R$ залежить від відповідного сигналу керування.

Математична модель корпусу АНПА прийнята на основі векторних рівнянь [2]:

$$\frac{d\vec{K}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{K} = \vec{R};$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{L} + \vec{V} \times \vec{K} = \vec{M},$$

де \vec{K} – головний вектор кількості руху АНПА; \vec{L} – головний вектор моменту кількості руху відносно

початку координатної системи; \vec{R} – головний вектор зовнішніх сил, що діють на АНПА; \vec{M} – головний момент зовнішніх сил відносно початку координат; \vec{V} – головний вектор швидкості АНПА; $\vec{\Omega}$ – головний вектор кутової швидкості.

Корпус АНПА має форму еліпсоїда обертання. Сили, що прикладені до корпусу від гребних гвинтів, діють на центр мас апарата, а сили рушіїв мають наступні точки прикладення:

маршові рушії – сила прикладена до кормової частини апарата симетрично по обидва борти та діє вздовж головної осі АНПА;

вертикальний – сила прикладена вертикально до центру мас;

лаговий – сила прикладена до центру мас поперечно дії маршових рушіїв.

Для відображення сенсорної інформації було створено інтерфейс програми-симулятора (рис. 4). Даний інтерфейс має меню налаштування параметрів роботи симулятора, а також мож-

ливість відображення стану АНПА у тривимірному просторі.

У верхній частині вікна знаходяться числові дані про поточний стан АНПА: сигнал керування та миттєві кінематичні параметри. Але ці дані не завжди зручні для сприйняття, а також не можуть надати інформацію про положення АНПА відносно перешкод, тому показання сенсорів дублюються графічно.

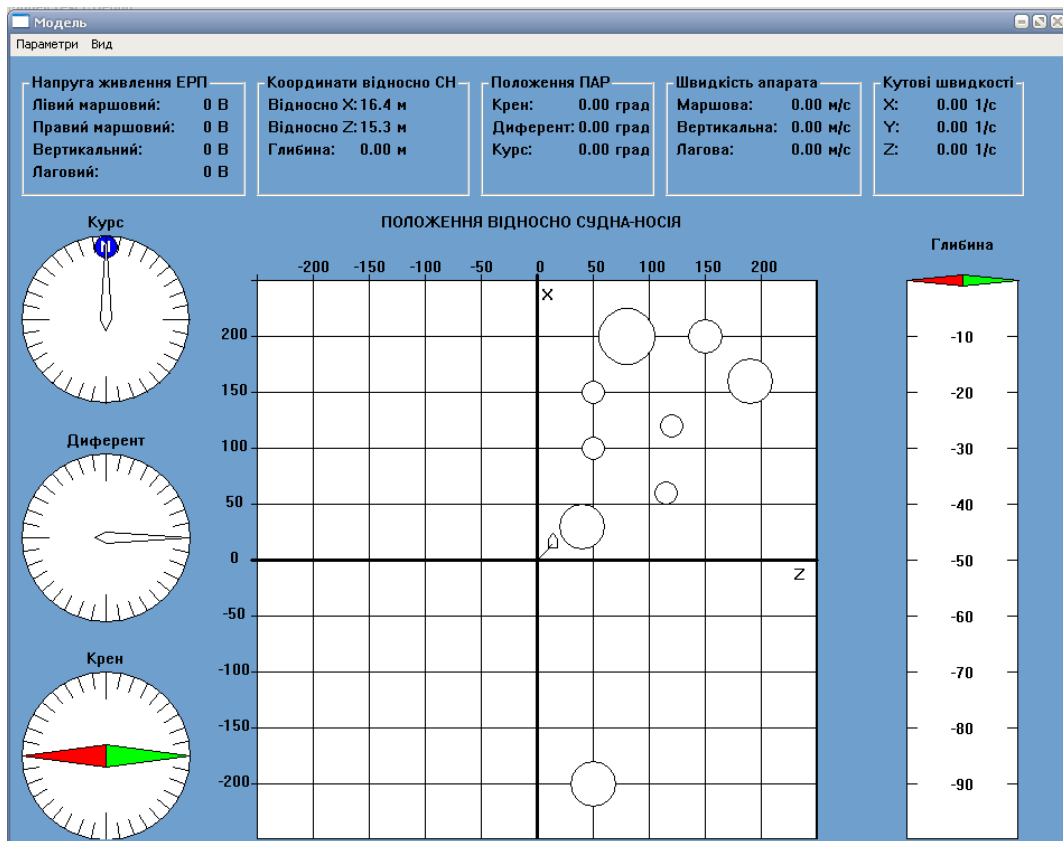


Рис. 4. Інтерфейс програми-симулятора

Показники курсу, крену, диференту та глибини дублюються за допомогою графічних пристроїв, а координати відносно положення точки спуску показуються за допомогою карти.

На карті позначається положення перешкод та АНПА, а також траєкторія його руху. Це дає змогу більш детально та наочно оцінити рух АНПА.

Але для режиму маневрування дане вікно є незручним, оскільки не дає повної візуалізації підводної обстановки. Для цього було розроблено допоміжне вікно (рис. 5), яке за даними кінематичними параметрами буде тривимірне зображення АНПА та його положення відносно зовнішнього середовища.

Дане вікно відображає схематично АНПА з кольоровими позначками на бортах (лівий – червоний, правий – зелений), а також сіткою, що відображає умовний ґрунт. Для орієнтації на ґрунті створена сітка розміром 1×1 м.

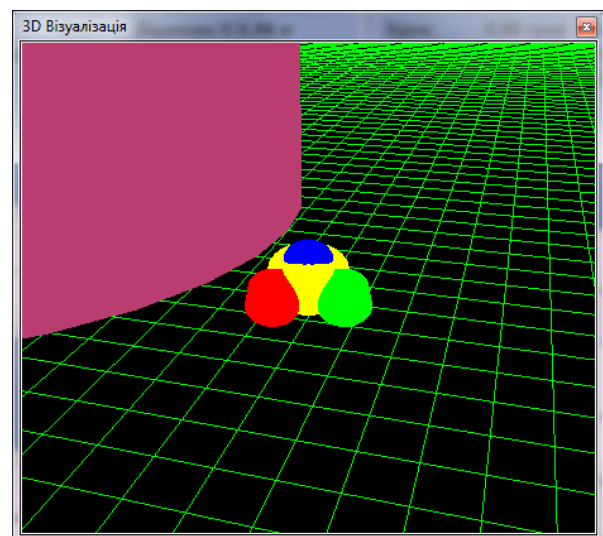


Рис. 5. Тривимірна візуалізація підводної обстановки

Сенсорна інформація про поточний стан АНПА під час роботи архівується в зовнішньому файлі для подальшої обробки даних. Для попередження займання пам'яті багатьма файлами з архівами при повторному запуску програми попередній файл перезаписується.

Також передбачено передачу сенсорних даних у зовнішній потік даних як зворотний зв'язок для системи керування АНПА.

Така структура моделюючого комплексу дає змогу детально оцінити режими руху АНПА як у числовому, так і в графічному вигляді. Симуляція руху проходить у режимі реального часу і може зупинитися

за бажанням користувача, що дає змогу оцінити його миттєвий стан. Точність моделювання руху досягається малим кроком інтегрування (1 мс), а візуалізація – з частотою 50 Гц, що нечутливо для людського ока.

ВИСНОВКИ

Запропоновано структуру моделюючого комплексу для дослідження ефективності роботи системи керування АНПА та розроблено симулятор тривимірного руху автономного ненаселеного підводного апарата. Наведено його структуру та описано графічний інтерфейс.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Багницкий, А. В.** Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий [Текст] / А. В. Багницкий, А. В. Инзарцев // Подводные исследования и робототехника. – 2010. – № 2(10). – С. 17–24.
- [2] **Лукомский, Ю. А.** Системы управления морскими подвижными объектами [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
- [3] Разработка симулятора автономного необитаемого подводного аппарата [Электронный ресурс] / Б. В. Гуренко, Р. В. Федоренко, М. А. Береснев, Р. В. Сапрыкин, В. А. Переверзев // Инженерный вестник Дона : электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru>.
- [4] **Сірівчук, А. С.** Розробка модуля керування симулятором просторового руху підводного апарата [Текст] / А. С. Сірівчук // Підводна техніка і технологія : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 141–144.
- [5] Справочник по теории корабля : в 3 т. [Текст] / под ред. Я. И. Войткунского. – Л. : Судостроение, 1985. – Т. 1. – 768 с.
- [6] **Ставинський, А. А.** Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху [Текст] / А. А. Ставинський, С. В. Блінцов // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2004. – № 3(396). – С. 161–166.

© А. С. Сірівчук

Надійшла до редколегії 17.11.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. В. С. Блінцов

Статтю розміщено у Віснику НУК № 1, 2014