

Є. О. Золотарьов¹, – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8805-5169>,
Н. І. Бурау², – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-816X>

ПОХИБКИ ПЕРЕДАЧІ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РУХУ АВТОНОМНОГО БЕЗПЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

Ua

У роботі розглядаються питання, пов'язані з розробкою навігаційного комплексу для маневрених автономних безпілотних підводних апаратів, на основі інтеграції систем забезпечення руху (функцій навігації та керування) з системами збору та передачі інформації у режимі візуалізації інформації та, за необхідності, дистанційного керування. Проводиться аналіз похибок передачі та візуалізації навігаційних параметрів і положення апарату при його русі за коловою траєкторією зі сталою швидкістю. Розглянуто затримку передачі даних у гідроакустичній системі зв'язку та її вплив на точність і своєчасність відображення навігаційної інформації. За результатами моделювання колового руху апарату отримано залежності похибок передачі та візуалізації даних про кут курсу, горизонтальну швидкість та місце положення апарату на площині руху для різних швидкостей руху та значень часової затримки. Результати моделювання показали, що затримка передачі даних у гідроакустичному каналі зв'язку призводить до відставання відображеної навігаційної інформації від фактичних даних руху апарата, що потребує врахування та зменшення похибок передачі даних при розробці інтегрованих навігаційних комплексів для маневрених безпілотних підводних апаратів.

En

The paper considers issues related to the development of a navigation complex for maneuverable autonomous unmanned underwater vehicles, based on the integration of motion support systems (navigation and control functions) with information collection and transmission systems in the information visualization mode and, if necessary, remote control. An analysis of errors in the transmission and visualization of navigation parameters and the position of the vehicle when it moves along a circular trajectory at a constant speed is carried out. The delay in data transmission in the hydroacoustic communication system and its influence on the accuracy and timeliness of displaying navigation information are considered. Based on the results of modeling the circular motion of the vehicle, the dependences of the errors in the transmission and visualization of data on the course angle, horizontal speed and the location of the vehicle on the plane of movement for different speeds of movement and time delay values are obtained. The simulation results showed that the delay in data transmission in the hydroacoustic communication channel leads to a lag of the displayed navigation information from the actual vehicle movement data, which requires taking into account and reducing data transmission errors when developing integrated navigation systems for maneuverable unmanned underwater vehicles.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

Вступ

Сучасний розвиток автономних безпілотних підводних апаратів (АБПА) спрямований на розширення їх функціональних можливостей, виконання довготривалих автономних місій, забезпечення високої маневреності, підвищення надійності та енергоефективності [1]. Необхідність функціонування в умовах складного підводного середовища із непередбачуваними збуреннями, недоступністю сигналів Глобальної системи позиціонування (*GPS*), значним згасанням та розмиттям оптичних сигналів висуває у якості вирішального завдання у розвитку технологій АБПА розробку високоточних систем навігації та локалізації [1, 2].

Для забезпечення навігації та локалізації АБПА використовуються методи інерціальної навігації (інтегрування даних, отриманих від гіроскопів та акселерометрів), метод числення шляху на основі поєднання інформації про швидкість та напрямок руху (інтеграція доплерівських вимірювачів швидкості, гірокомпасів та датчиків глибини), методи позиціонування та картографування [3]. Для зменшення похибок позиціонування у неструктурованих та обмежених підводних середовищах, що виникають за окремого використання зазначених методів, у [4, 5] запропоновано інтеграцію інерціальних навігаційних систем (ІНС), доплерівських вимірювачів швидкості (ДВШ), а також різноманітних алгоритмів фільтрації на основі фільтра Калмана.

Нова стратегія навігації за методом числення шляху без використання даних ДВШ, розроблена та описана у [6], здатна забезпечити АБПА відмовостійкими навігаційними системами, які можуть спиратися на надлишкову комбінацію, як стандартних фізичних моделей, так і моделей, заснованих на глибокому навчанні, для підвищення точності доступного навігаційного рішення. Розроблена стратегія є придатною для безпосереднього використання на АБПА без додаткового спеціального процесора.

Розвиток гідробатичних АБПА [7, 8], як швидкісних динамічних об'єктів, здатних виконувати гнучкі та складні маневри у обмежених зонах підводного середовища і мати високу ефективність за показниками швидкості та радіусу дії, також вимагає високої точності та швидкодії систем навігації та локалізації, особливо для малорозмірних АБПА, сенсорна система яких побудована на основі мікроелектромеханічних датчиків. А вдосконалення існуючих систем забезпечення руху (енергозабезпечення, стабілізації, навігації та керування) шляхом їх інтеграції із кібер-фізичними системами, які містять мережу датчиків і виконавчих механізмів, пов'язаних із обчислювальним і комунікаційним ядром, як показано у [9], забезпечить такі функціональні можливості АБПА, як планування місій, навігації та керування, можливості віртуального моніторингу стану функціональних систем, зворотного зв'язку у реальному часі та/або дистанційного керування.

Таким чином, у разі створення сучасних малорозмірних динамічних АБПА важливим завданням є інтеграція систем забезпечення руху (зокрема, функцій навігації та керування) із системами збору та передачі інформації у режимі реального часу, зберігання та візуалізації інформації для подальшого аналізу та, за необхідності, дистанційного керування. Призначенням такого інтегрованого навігаційного комплексу є не тільки визначення поточних координат місцезнаходження АБПА та навігаційних параметрів для планування та виконання місії, а й визначення, передача та відображення на борту судна-носія інформації про поточне місцезнаходження АБПА для забезпечення можливості моніторингу функціонального стану АБПА та його систем, а також, за необхідності, реалізації дистанційного керування апаратом [10]. Створення таких комплексів для малорозмірних гідробатичних апаратів потребує комплексного вирішення завдань орієнтації, навігації, прийому-передачі та візуалізації інформації. Причому, точність відображення положення та складного руху АБПА на борту судна-носія у режимі реального часу буде залежати, як від точності визначення параметрів орієнтації та навігації, так і від характеристик системи передачі інформації про визначені параметри.

У роботі [11] обґрунтовано вирішено завдання візуалізації руху АБПА на основі комплексного підходу, відповідно до якого система візуалізації є невід'ємною складовою навігаційно-пілотажного комплексу АБПА, структура і характеристики якого повинні забезпечувати задані показники точності навігації та позиціонування, автономності роботи, передачі даних, стійкості та надійності в умовах впливу зовнішніх факторів. За використанням інструментарію для візуального програмування потоків даних *Node-RED* розроблено програмне забезпечення для системи візуалізації даних інерціальної навігаційної системи фірми «*Inertial Labs*» [12]. Результат розробки системи представлено графічним інтерфейсом, в якому реалізовано запуск та зупинку ІНС, візуальне представлення даних сенсорів, візуалізація місцеположення об'єкта на мапі, текстові та/або графічні (індикаторні) представлення даних орієнтації, швидкості, температури.

Для передачі даних про параметри місця положення, орієнтації та навігації АБПА до складу інтегрованого навігаційного комплексу входить система гідроакустичного зв'язку із випромінювачами та приймачами низькочастотних акустичних сигналів. Гідроакустичні системи використовують звукові хвилі для передавання даних під водою, що є критично важливим для навігації та зв'язку із АБПА. Однак, на відміну від радіохвиль у повітрі, звук у воді поширюється значно повільніше – близько 1500 м/с, що відповідає затримці приблизно 0,67 с на кожний кілометр шляху сигналу [13]. Це означає, що передача акустичного сигналу до об'єкта на відстані 5 км потребує близько 3,3 с на проходження в одному напрямку, а обмін повідомленнями у прямому та зворотному напрямках триватиме вже близько 6–7 с.

Зв'язок забезпечується у режимах командного обміну (навігація, телеметрія) та високошвидкісного інформаційного обміну між АБПА та судном-носієм за допомогою пристроїв для бездротової передачі цифрових даних під водою за допомогою звуку – гідроакустичних модемів (ГАМ). Вони встановлюються на АБПА, буйки або судна, і дозволяють обмінюватися телеметрією, командами та іншою інформацією. Прикладами ГАМ є такі модеми:

- *WHOI Micro-Modem* [14] від *Woods Hole Oceanographic Institution*, швидкість передачі даних від 80 біт/с до 5000 біт/с;
- серія *S2C* модемів *EvoLogics* [15], швидкість передачі даних практично досягає 13900 біт/с на відстані до 3,5 км;
- лінійка модемів *Teledyne Benthos* [16], швидкість передачі даних від 2560 біт/с до 15360 біт/с на відстані до 4 км.

Характерною особливістю ГАМ є дуже низька швидкість передачі даних порівняно із радіозв'язком. На практиці це може призвести до значних затримок даних про параметри орієнтації, місця положення та навігації АБПА і, як наслідок, до похибок відображення положення та складного руху АБПА на борту судна-носія. Тому під час розробки системи візуалізації даних у складі інтегрованого навігаційного комплексу АБПА важливо оцінити похибки візуалізації, обумовлені затримкою передачі даних у разі складного маневреного руху АБПА.

Постановка задачі

Метою даної роботи є оцінка похибок передачі даних про параметри руху та місця положення АБПА під час його руху за коловою траєкторією.

Виклад основного матеріалу

У попередній роботі авторів [10] запропоновано та обґрунтовано узагальнену функціональну схему інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, яку наведено на рис. 1.

До складу комплексу входять: АБПА, як об'єкт керування; модуль задання місії/режиму руху; модуль центрального бортового комп'ютера, призначений для обробки даних, формування програмних траєкторій, формування керуючих впливів, тощо; модуль визначення орієнтації та параметрів руху, який на основі даних від сенсорів розраховує положення та параметри руху АБПА у реальному часі; модуль передачі даних на основі системи гідроакустичного зв'язку; система візуалізації, що забезпечує відображення інформації про орієнтацію, швидкість, навігаційні параметри, а також відеозображення у режимі реального часу; підсистема дистанційного керування для корегування/уточнення даних, команд, місій, втручання в автономний процес руху у разі непередбачених обставин або зміни

умов навколишнього середовища. У якості модуля визначення орієнтації та параметрів руху використано ІНС фірми «*Inertial Labs*» [12], до складу якої входять інерційно-вимірювальний модуль (ІВМ), модулі цифрової обробки сигналів та обчислення параметрів руху.

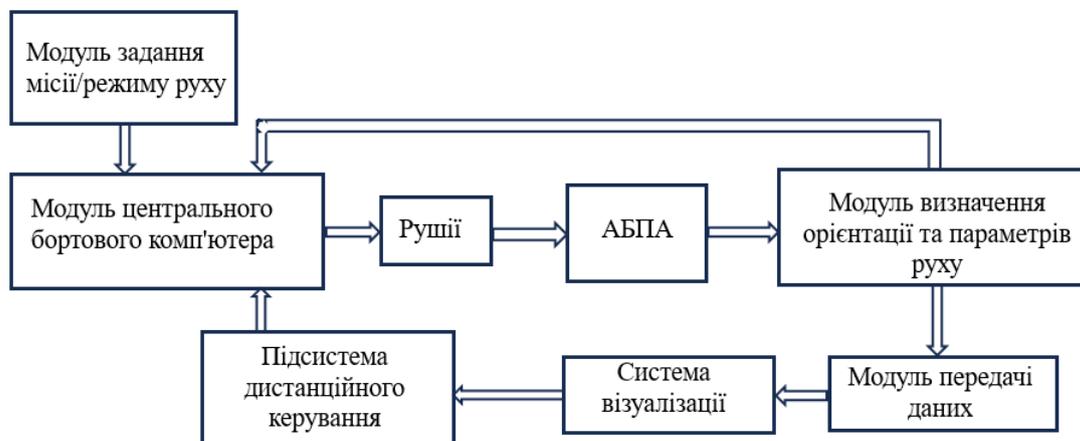


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема інтегрованого навігаційного комплексу АБПА

Розглядається рух АБПА за коловою траєкторією радіусом $r=40$ м зі сталою швидкістю V та нульовим кутами крену і тангажу [10]. Нехай рух АБПА відбувається лише у площині горизонту географічної системи координат (рис. 2), осі якої X_E і Y_N направлені відповідно на схід і північ, вертикальна складова Z_U не розглядається, а проєкції параметрів руху на вертикальну вісь припускаємо нульовими.

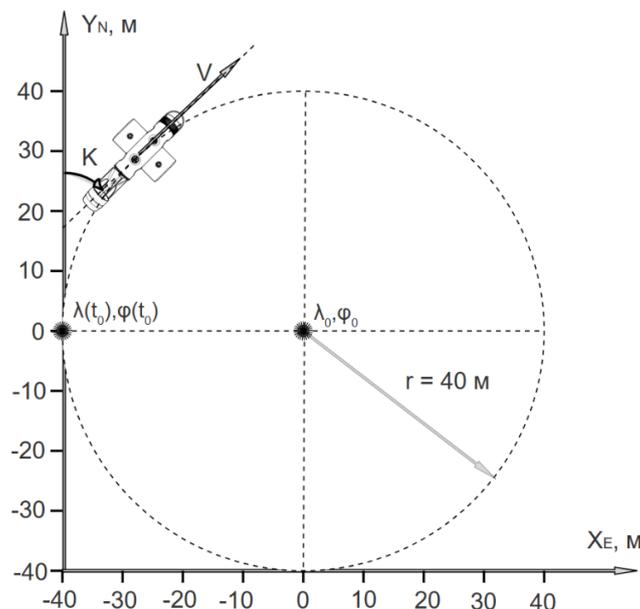


Рис. 2. Приклад руху АБПА за коловою траєкторією у площині горизонту географічної системи координат

У початковий момент часу t_0 АБПА знаходиться у точці із координатами $\lambda(t_0)$ і $\varphi(t_0)$ та орієнтацією повздовжньої осі у північному напрямі, а наведене на рис. 2 положення апарату демонструє напрямок його руху по коловій траєкторії та зв'язок між напрямком вектору швидкості \vec{V} і значенням кута курсу K . Проведене моделювання руху АБПА за коловою траєкторією дозволило отримати сигнали гіроскопів та акселерометрів ІВМ у складі ІНС, які б реєструвались при такому русі.

Під час проведення моделювання руху АБПА та сигналів датчиків ІНС у [10] було використано такі аналітичні залежності для визначення параметрів руху та місця положення апарату:

– кут курсу K та швидкість змінювання кута курсу \dot{K} :

$$\begin{aligned} \dot{K} &= V / r \\ K &= \dot{K} \cdot t \end{aligned} \quad (1)$$

– проєкції швидкості АБПА на осі географічної системи координат:

$$\begin{aligned} V_E &= V \cdot \sin(K) \\ V_N &= V \cdot \cos(K) ; \\ V_U &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

перетворення різниці поточних значень довготи та широти $\varphi(t)$, $\lambda(t)$ та відповідних початкових умов φ_0 , λ_0 для визначення координат у відстані на площині руху:

$$\begin{aligned} X_E(t) &= [\lambda(t) - \lambda_0] R \cos(\varphi(t)) \\ Y_N(t) &= [\varphi(t) - \varphi_0] R \end{aligned} \quad (3)$$

де $R = 6371000$ м.

Визначені за виразами (1) – (3) поточні значення параметрів руху та місця положення АБПА передаються модулем передачі даних у систему візуалізації для відображення їх у режимі реального часу. Подальші дослідження були проведені із урахуванням того, що дані, отримані із сенсорів ІВМ, спотворюються шумом вимірювання, що призводить до похибок визначення орієнтації, швидкості та координат АБПА і таким чином буде викликати значне спотворення візуалізації положення та руху АБПА. Однак, крім накопичених похибок визначення навігаційних параметрів, для зменшення яких застосовуються методи фільтрації або періодичної корекції, похибки візуалізації викликаються і модулем передачі даних, побудованим на основі системи гідроакустичного зв'язку.

Як було зазначено вище, передача даних гідроакустичною системою відбувається із затримкою у часі внаслідок фізичних обмежень на швидкість поширення звуку у воді (близько 1500 м/с) та низької пропускної здатності акустичного каналу (до кількох тисяч біт/с). Це призводить до того,

що навіть передача одного короткого пакету на відстані у кілька кілометрів може тривати від кількох до понад десяти секунд, що істотно впливає на часову актуальність навігаційної інформації та візуалізацію.

Наприклад, передача пакету даних «OPVT2HR» ІНС фірми *Inertial Labs* розміром 137 байтів (1096 біт) за швидкості 1000 біт/с буде тривати близько 1,1 с, а за розміщення АБПА на відстані 500 м з'являється додаткова затримка близько 0,33 с. На основі наведеного розрахувати час затримки Δt можемо за таким виразом:

$$\Delta t = \frac{D}{v_s} + \frac{L}{R}, \quad (4)$$

де D – відстань між передавачем і приймачем, м; v_s - швидкість поширення звуку у воді, м/с; L - довжина інформаційного пакету, біт; R - швидкість передачі, біт/с.

Наявність часової затримки (4) призводить до похибок відображення параметрів руху та поточного місця положення (1 - 3) АБПА під час його колового руху зі сталою швидкістю. У системі візуалізації будуть відображатись дані, затримані на величину Δt , які відповідають моменту часу t_D :

$$t_D = t - \Delta t, \quad (5)$$

де t – дійсне значення часу.

Похибку передачі та візуалізації даних внаслідок часової затримки визначаємо як різницю між затриманим та дійсним значенням параметра, який передається.

Похибка передачі поточного значення кута курсу ΔK визначається за виразом (1) із урахуванням (5):

$$K(t_D) = \dot{K} \cdot (t - \Delta t) \quad (6)$$

$$\Delta K = K(t_D) - K(t) = \dot{K} \cdot (t - \Delta t) - \dot{K} \cdot t = -\dot{K} \cdot \Delta t$$

Похибки передачі поточних значень проєкцій швидкості ΔV_E та ΔV_N визначаємо із виразів (2) із урахуванням (5) у вигляді:

$$\Delta V_E = V \sin(K(t_D)) - V \sin(K(t))$$

$$\Delta V_N = V \cos(K(t_D)) - V \cos(K(t)),$$

а вираз для визначення модуля похибки ΔV передачі горизонтальної швидкості після нескладних перетворень отримаємо у вигляді:

$$\Delta V = 2V \cdot \left| \sin \frac{-\dot{K} \cdot \Delta t}{2} \right|. \quad (7)$$

Похибки передачі координат місця положення ΔX_E та ΔY_N визначаємо за виразами (3) та (5) у вигляді:

$$X_E = X_E(t - \Delta t) - X_E(t); \quad \Delta Y_N = Y_N(t - \Delta t) - Y_N(t)$$

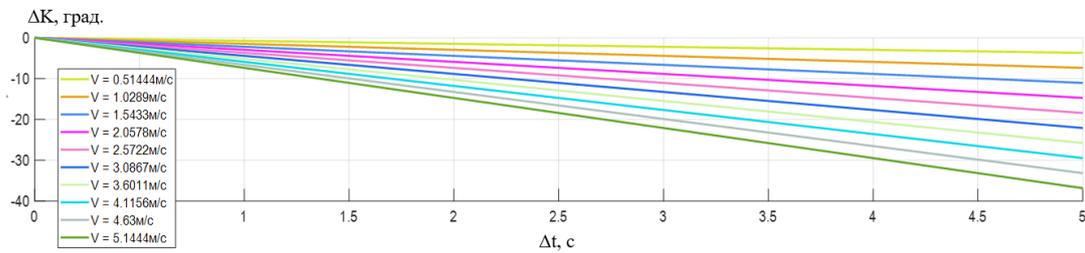
$$X_E(t - \Delta t) - X_E(t); \quad \Delta Y_N = Y_N(t - \Delta t) - Y_N(t),$$

а модуль похибки

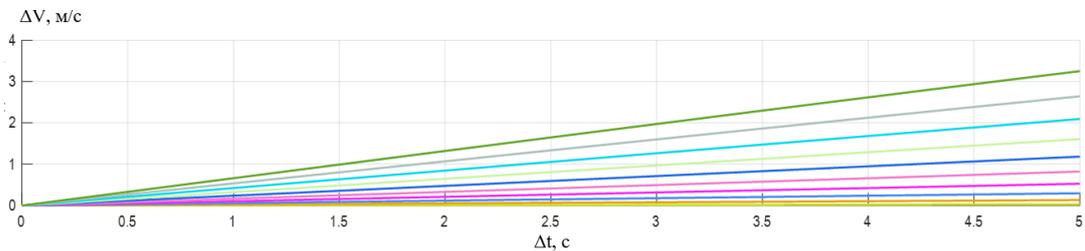
$$\Delta = \sqrt{\Delta X_E^2 + \Delta Y_N^2} \quad \Delta = \sqrt{\Delta X_E^2 + \Delta Y_N^2} \quad (8)$$

характеризує відстань між дійсним місцем положення АБПА на площині руху та його місцем положення, відображеним у системі візуалізації.

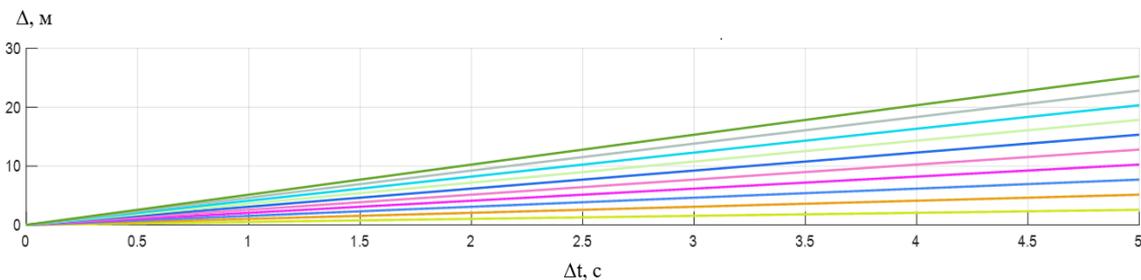
За результатами імітаційного моделювання колового руху АБПА, еталонних сигналів сенсорів ІВМ (без врахування випадкових завад) та із використанням залежностей (6 - 8) проведено моделювання похибок передачі та візуалізації даних про поточні значення кута курсу, горизонтальної швидкості та положення АБПА на площині руху. Результати наведено на рис. 3 у вигляді залежностей відповідних похибок від часу затримки Δt , які були розраховані для різних значень швидкості руху АБПА за коловою траєкторією.



а)



б)



в)

Рис. 3. Графіки залежностей похибок передачі та візуалізації даних: а) кута курсу; б) горизонтальної швидкості; в) положення АБПА

Як бачимо із наведених на рис. 3 результатів, залежності усіх розглянутих похибок передачі та візуалізації даних у межах часової затримки до 5 с для розглянутого діапазону значень швидкості руху мають лінійний характер. Для розміщення АБПА на відстані 500 м до судна-носія і розглянутих вище налаштувань протоколів передачі даних із ІНС фірми *Inertial Labs* часова затримка складає $\Delta t = 1,43$ с. Тоді, на основі отриманих результатів визначаємо, що під час руху АБПА по коловій траєкторії зі швидкістю $V = 2,5722$ м/с (5 вуз.) система візуалізації буде відображати параметри руху із такими похибками: $\Delta K = -5,15^\circ$; $\Delta V = 0,23$ м/с; $\Delta = 3,59$ м.

Висновки

Розробка інтегрованих навігаційних комплексів для малорозмірних АБПА зі складною динамікою потребує комплексного вирішення завдань орієнтації, навігації, прийому-передачі та візуалізації інформації. Точність відображення положення та складного руху АБПА на борту судна-носія у режимі реального часу буде залежати, як від точності визначення параметрів орієнтації та навігації, так і від характеристик системи передачі інформації про визначені параметри. Затримка у часі передачі даних гідроакустичною системою обумовлена фізичними обмеженнями на швидкість поширення звуку у воді, низькою пропускнуою здатністю акустичного каналу та залежить від відстані до судна-носія.

Проведене моделювання колового руху АБПА зі сталою швидкістю та оцінювання похибки передачі та візуалізації даних про параметри руху та положення апарату показали, що затримка передачі даних у гідроакустичному каналі зв'язку спричиняє відставання відображеної навігаційної інформації від фактичних даних руху апарату. Для маневрених АБПА похибки передачі даних зростають зі збільшенням швидкості руху. Таке записання у візуалізації ускладнює моніторинг за рухом АБПА та може знизити ефективність прийняття рішень у реальному часі. Отримані результати підкреслюють необхідність врахування та зменшення похибок передачі даних разом із накопиченими похибками ІНС під час розробки та вдосконаленні навігаційних комплексів АБПА.

Список використаної літератури

1. Wang J., Wu Z., Dong H., Tan M., Yu J. Development and control of underwater gliding robots: A review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2022, 9 (9), 1543–1560. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105671>.
2. Paull L., Saeed, S., Seto M., Li H. AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2014, 39 (1), 131–149.

3. Wu H., Chen Y., Yang Q., Yan B., Yang X. A Review of Underwater Robot Localization in Confined Spaces. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024, 12 (3), 428. <https://doi.org/10.3390/jmse12030428>.
4. Karmozdi A., Hashemi M., Salarieh H., Alasty A. INS-DVL Navigation Improvement Using Rotational Motion Dynamic Model of AUV. *IEEE Sensors Journal*. 2020, 20 (23), 14329–14336. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2020.3007929>
5. Li W., Wu W., Wang J., Wu M. A novel backtracking navigation scheme for Autonomous Underwater Vehicles. *Measurement*. 2014, 47, 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.022>.
6. Topini E., Fanelli F., Topini A., Pebody M., Ridolfi A., Phillips A. B., Allotta B. An experimental comparison of Deep Learning strategies for AUV navigation in DVL-denied environments. *Ocean Engineering*. 2023, 274, 114034. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114034>.
7. Bhat S., Stenius I. Hydrobatics: a review of trends, challenges and opportunities for efficient and agile under actuated AUVs. *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*, 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1109/AUV.2018.8729805>.
8. Bhat S., Stenius I., Miao T. Real-time flight simulation of hydrobatic AUVs over the full 0° — 360° envelope. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2021, 46 (4), 1114—1131. <https://doi.org/10.1109/JOE.2021.3076178>.
9. Bhat S., Torroba I., Özkahraman Ö., Bore N., Sprague C., Xie Y. A Cyber-Physical System for Hydrobatic AUVs: System Integration and Field Demonstration. *2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)*, 2020, 1-8. <https://doi.org/10.1109/AUV50043.2020.9267947>.
10. Золотарьов Є. О., Бурау Н. І. Моделювання колового руху автономного безпілотної підводного апарату та сигналів датчиків інерціальної навігаційної системи. *Електронне моделювання*. 2025, 47 (1), 116-132. <https://doi.org/10.15407/emodel.47.01.116>.
11. Золотарьов Є. О., Бурау Н. І. Застосування технологій Node-RED для візуалізації руху об'єктів. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024, 1, 93–100. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-12>.
12. Inertial Labs: INS – GPS-Aided inertial Navigation Systems. 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://inertiallabs.com/products/ins-inertial-navigation-systems/>
13. Wang J., Yuen C., Gua Y., Ge F. Reinforcement learning-based link adaptation in long delayed underwater acoustic channel. *MATEC Web of Conferences*, 2019, 283, 07001. <https://doi.org/10.1051/mateccconf/201928307001>.
14. Gallimore E. et al. The WHOI Micromodem-2: A Scalable System for Acoustic Communications and Networking. *Proceedings of OCEANS 2010 IEEE*, 2010, Sydney, 1–7.

15. 18/34 Devices | EvoLogics [онлайн], (без дати). EvoLogics. [Дата звернення 27 червня 2025]. Режим доступу: <https://www.evologics.com/acoustic-modem/18-34>.
16. Acoustic Modems [онлайн], (без дати). Marine Equipment & Technology Solutions by Teledyne Marine. [Дата звернення 27 червня 2025]. Режим доступу: <https://www.teledynemarine.com/brands/benthos/acoustic-modems>.

Received: 1 September 2025 / Revised: 6 October 2025 / Accepted: 11 November 2025

© The Author(s)2025. Published by Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons License Attribution4.0 International (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited