

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-17>

УДК 519.71, 629.051, 621.398

Станіслав ГУРИНЕНКО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-0180-3107>

e-mail: stas_guryenko@ukr.net

АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС АВТОНОМНОГО БЕСПЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА: ОГЛЯД

У статті розглядається структура побудови та організація керування багатоцільовим автономним безпілотним підводним апаратом та апаратно-програмні комплекси, які застосовуються при розробці багатоцільового комплексу АБПА. Наведено та описано найпоширеніші апаратно-програмні комплекси та їх комплектацію для побудов бортового комп'ютера, який здійснює керування апаратом. Наведено допоміжне програмне забезпечення для розробки наземної станції моніторингу та керування АБПА. Для кожного розглянутого програмного комплексу наведено мікроконтролери які сумісні із даним комплексом. Розглянуто одноплатні комп'ютери та їх відмінність від мікроконтролерів, які можуть бути застосовані та використані як допоміжне обладнання у формуванні бортового комп'ютера АБПА та наземної станції моніторингу та керування. У результаті дослідження виявлено переваги та недоліки використання відомих апаратно-програмних комплексів та труднощі, які можуть виникнути при використанні апаратно-програмних комплексів із відкритим кодом. Наведено перспективи використання одноплатних комп'ютерів при побудові наземної станції керування так і бортового комп'ютера. Порівнюючи переваги та недоліки апаратно-програмних комплексів із відкритим кодом та перспективи використання одноплатних комп'ютерів зроблено висновок, що для побудови надійного комплексу АБПА необхідно розробляти власне апаратне та програмне забезпечення, яке здатне забезпечити надійність та стабільність функціонування апарата та захищеність комунікаційних каналів від сторонніх завад та перешкод. Використання одноплатних комп'ютерів дозволить підібрати найбільш задовільні за характеристиками та стабільністю вихідного сигналу сенсори первинної інформації, такі як мікроелектромеханічні сенсори: акселерометри, гіроскопи.

Ключові слова: Автономний безпілотний підводний апарат (АБПА), апаратне забезпечення, програмне забезпечення, система керування, автоматичне керування мікроелектромеханічні сенсори (MEMS).

Stanislav GURYNENKO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE: OVERVIEW

The article considers the construction structure and management organization of a multi-purpose autonomous unmanned underwater vehicle and hardware and software complexes used in the development of a multi-purpose AUUV complex. The most common hardware and software complexes and their configuration for building an on-board computer that controls the device are given and described. Auxiliary software for the development of a ground station for monitoring and controlling the AUUV is given. For each considered software complex, microcontrollers compatible with this complex are given. Single-board computers and their difference from microcontrollers, which can be applied and used as auxiliary equipment in the formation of an AUUV on-board computer and a ground monitoring and control station, are considered. As a result of the study, the advantages and disadvantages of using known hardware and software complexes and the difficulties that may arise when using open source hardware and software complexes are revealed. Prospects for the use of single-board computers in the construction of both a ground control station and an single board computer are presented. Comparing the advantages and disadvantages of open-source hardware and software complexes and the prospects for using single-board computers, it was concluded that in order to build a reliable AUUV complex, it is necessary to develop own hardware and software that can ensure the reliability and stability of the device's operation and the protection of communication channels from external interference and radio interference. The use of single-board computers will make it possible to select primary information sensors that are most satisfactory in terms of characteristics and stability of the output signal, such as microelectromechanical sensors: accelerometers, gyroscopes.

Keywords: Autonomous unmanned underwater vehicle (AUUV), hardware, software, control system, automatic control, microelectromechanical sensors (MEMS).

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Однією із проблем під час дослідження та розробки автономного безпілотного підводного апарата є вибір, дослідження та розробка не тільки програмної частини але і апаратної. Існують багато користувацьких програм, які застосовуються при розробці літальних безпілотних апаратів та комплексів та які можуть застосовуватися і для морської робототехніки. Однак, більшість із цих програм та комплексів реалізуються та застосовують лише на певну обладнання та здані виконувати лише певні місії (наприклад рух прямою траєкторією чи апроксимоване коло) та забезпечувати стабільний зв'язок керування на відносно невеликих відстанях від 5 до 30 км, крім того для забезпечення більшої відстані необхідно встановлювати додаткове обладнання у вигляді радіоелектронних доповнень та програмних доповнень. Більш складна ситуація стосується безпілотних підводних апаратів. Зазвичай підводний апарат функціонує не тільки на

певній глибині, що вже може створювати певні завади та перешкоди для радіо-керування, а також і на далеких відстанях які можуть бути більшими ніж 50 кілометрів.

Апаратно-програмні комплекси для АБПА умовно можна поділити на три типи: провідні, безпроводні та автономно-інтелектуальні системи. До провідних можна віднести кабельну систему керування. Безпроводні комплекси можуть бути різними за своєю фізичною складовою: ультразвукові (сонарні), радіохвильові, та оптичні. Кожна із описаних систем має свої переваги та недоліки [1].

Так, наприклад безпроводна гідроакустична система керування вже багато років застосовується та організовує зв'язок не тільки для підводних човнів але і для пошукових підводних дронів. Однак у такій системі є свої суттєві недоліки, такі як: необхідність встановлення гідроакустичних буйків та курсування об'єкта ретранслятора, згасання звукових коливань у залежності від стану середовища, затримка розповсюдження корисного сигналу та низька смуга пропускання акустичного каналу [1].

Радіохвильова система найбільш застосована система для організації керування та зв'язку у наземному та космічному просторах. Однак для застосування у підводному середовищі застосування радіохвильової системи обмежується лише декількома метрами та у кращих випадках зв'язок може бути на глибині до 15-20 метрів, однак радіус дії суттєво зменшується від кількох десятків кілометрів до сотень метрів. Для застосування радіохвильової системи необхідно використовувати допоміжне обладнання яке може бути, що найменше, у рази дорожче ніж сам підводний апарат [1].

Оптична система має суттєві переваги перед радіохвильовою та гідроакустичною системами я плані передачі сигналу, однак суттєвим недоліком такої системи є жорсткі вимоги до чистоти оптичних поверхонь та положенні апарата відносно оптичного випромінювача [1].

Кабельна система, як і гідроакустична система є найбільш поширеною у використанні саме керування підводних дронів. Однак кабель-трос обмежує радіус дії та маневреність апарата.

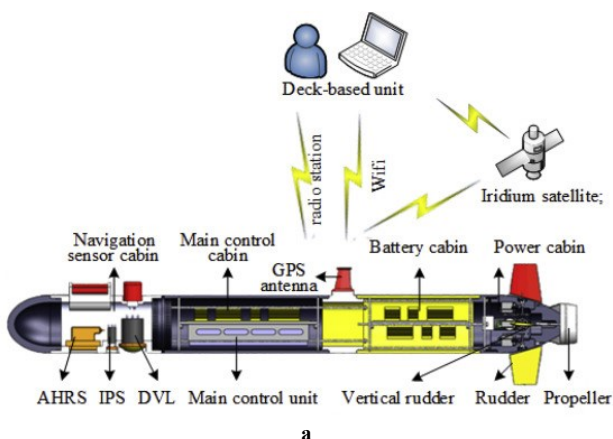
Найбільш перспективними на сьогодні є системи автономно-інтелектуальні, які поєднують у собі не тільки спеціальне програмне забезпечення але і комбінують із різним апаратним забезпеченням, наприклад для руху водною поверхнею на значні відстані можна використовувати антени радіохвильової системи, через які надсилаються програми та команди для автономного функціонування та виконання завдань під водою на значній віддаленості від станції керування.

Розробка апаратно-програмного комплексу для забезпечення керування багатоцільовим автономним безпілотним підводним апаратом є наріжним камінням під час розробки безпілотного комплексу. Уявлення та розуміння складу існуючих апаратно-програмних комплексів керування та їх організації дозволить розробникам та дослідникам, із мінімальними витратами матеріально-технічних та дослідних ресурсів, обрати оптимальний варіант проектування, застосування та впровадження апаратно-програмного устаткування комплексу багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата.

Аналіз досліджень

За останні роки у галузі безпілотної робототехніки спостерігається тенденція до використання одноплатних комп'ютерів та MEMS сенсорів. У зв'язку із розширенням та вдосконаленням технологій виробництва одноплатних комп'ютерів та MEMS сенсорів з'явилися програмні комплекси, які здатні відстежувати телеметрію та стан безпілотного апарата під час його руху. Традиційно комплекс підводного апарата складається: автономного безпілотного підводного апарата із встановленим на борту радіо та телеметричним обладнанням, наземної станції моніторингу та керування і за необхідності або кабельної бухти із провідниками або антенної станції яка під'єднується до наземної станції моніторингу та керування.

Типовий склад автономного безпілотного підводного комплексу має структуру таку, яка наведена на рисунку 1 [2, 3].



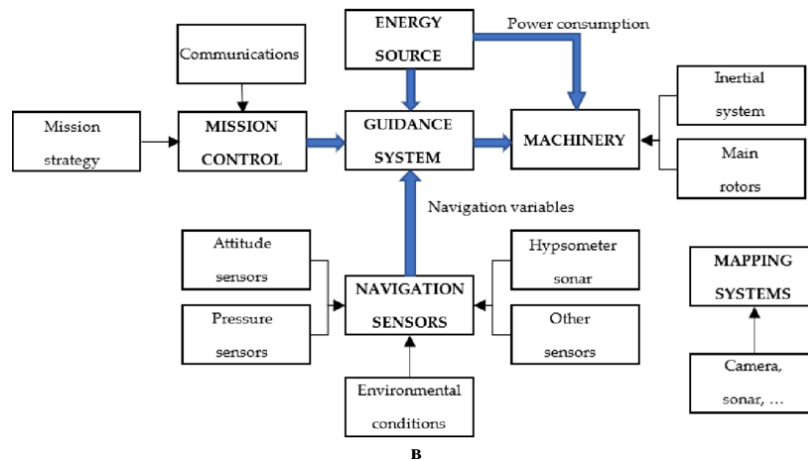


Рис. 1. Типовий склад та структура організації автономного безпілотного підводного комплексу:
а)– вигляд та організація зв'язку та керування АБПА;
б)– наземна станція моніторингу та керування А;
в) – структурна схема організації апаратно-програмного забезпечення АБПА

Виклад основного матеріалу (дослідження)

Організація та структура системи моніторингу та керування АБПА, яка зображена на рис. 1, є типовою для усіх комплексів та застосовує відомі апаратно-програмні комплекси. Однак, за необхідності, ця структура може змінюватися та модернізуватися в залежності від умов функціонування АБПА, що у свою чергу може призводити до суттєвих апаратних та програмних змін у комплексі. Зважаючи на таку структуру організації комплексу АБПА доцільним є розгляд відомих апаратно-програмних комплексів та недоліки їх використання.

Апаратно-програмний комплекс ArduPilot

Одним із найпоширенішим, у використанні, програмним забезпеченням є ArduPilot [4, 5]. Програмне забезпечення ArduPilot має у своєму складі велику користувацьку базу та підкаталогів, які дозволяють використовувати дане програмне забезпечення не тільки для мультироторних дронів але і для безпілотних літальних апаратів із жорстким крилом, наземних безпілотних платформ та надводних безпілотних кораблів [5, 6]. Апаратна частина ArduPilot зображена на рисунку 2.



Рис. 2. Апаратна складова для програмного забезпечення ArduPilot:
а) – контролер із вбудованим компасом,
б) – контролер без компаса,
в) – комплект контролера ArduPilot

Контролер та програмне забезпечення ArduPilot це платформа із відкритим початковим кодом, який дозволяє вбудовувати власні функції та підпрограми для покращення роботи та функціонування обладнання. Апаратно-програмне забезпечення ArduPilot дозволяють перетворити будь-який радіокерований апарат у повністю автономну безпілотну модель, яка здатна виконувати місії за заданими

маршрутами з GPS-координатами. До основних функцій апаратно-програмного забезпечення належать: стабілізація моделі при русі, утримання позиції моделі за допомогою GPS антени, автопілот по заданих точках з GPS-координатами та забезпечення безпеки - повернення в точку старту або автопосадка літаючої моделі в аварійній ситуації. Для проектування наземної станції моніторингу та керування ArduPilot може застосовувати допоміжні розробки, які вдало інтегруються та співпрацюють із ArduPilot, наприклад MissionPlanner, Робоче вікно якого зображено на рисунку 3 [7].



Рис. 3. Головне робоче вікно програмного забезпечення MissionPlanner наземної станції

Апаратно-програмний комплекс Pixhawk

Pixhawk – проект відкритої архітектури для створення контролера керування, який призначен для академічного, аматорського та професійного застосування при створенні безпілотних апаратів. Типова комплектація апаратного забезпечення Pixhawk зображена на рисунку 4 [8].



Рис. 4 комплектація апаратно-програмного комплексу Pixhawk

Апаратно-програмний комплекс Pixhawk є альтернативою до ArduPilot, а також може бути і сумісний із ArduPilot. Перевагою Pixhawk перед ArduPilot є стабільність та відносна простота роботи, а також можливість підтримки заданого просторового положення об'єкта, виконання маневрів, забезпечення автоматичного руху за маршрутом та виконання зниження (для літальних апаратів) за сигналами GPS. Для розробки та проектування наземної станції моніторингу та керування сумісно із Pixhawk застосовують

програмне забезпечення QGroundControl, яке альтернативою до MissionPlanner, та здатне виконувати ті самі функції що і MissionPlanner, проте більш гнучкий до нових користувачів [8].

Апаратно-програмний комплекс iNAV

iNAV - це кросплатформовий інструмент налаштування системи керування польотом, в якому особлива увага приділяється функціям GPS для квадрокоптерів, а також для літаків. iNav активно розвивається і в даний час підтримує функцію RTH (Return To Home) з зумовленою висотою набору висоти, утриманням позиції, колійними точками, Follow-Me і багатьма іншими функціями. Підтримується велика кількість плат контролера польоту, таких як: Matek H743-SLIM, Matek F765-WSE, Matek F722-miniSE, Kakute F7 [9].

Існують ще багато апаратно-програмних засобів як комерційних так і з відкритим кодом, які було створено ентузіастами та здобувачами академічної освіти у якості курсових, дипломних проєктів або як дисертаційний проєкт.

Одноплатні комп'ютери (SBC – single board computers)

Досягнення електроніки за останні десятиліття дозволили створити потужні комп'ютери на одній платі, які за своїми характеристиками не поступаються їхнім аналогам. Однак, існує клас обчислювальної техніки як мікроконтролер. Для дослідження, розробки та створення одним із важливих питань є вибір центрального процесорного модуля, до якого під'єднуються та із яким комунікують апаратно-програмні комплекси [10]. Головна відмінність мікроконтролера від одноплатного комп'ютера полягає у тому, що мікроконтролер хоч і має усі атрибути повноцінного комп'ютера, однак мікроконтролер здатен виконувати лише одну програму яку у нього запрограмували, тоді коли одноплатний комп'ютер здатен працювати як звичайний комп'ютер та мати змогу підключити додаткове обладнання. Одноплатні комп'ютери мають такий вигляд, рисунок 5.

Такий обчислювальний пристрій дозволяє повноцінно замінити використання класичного персонального комп'ютера або ноутбука. Застосування одноплатного комп'ютера надасть змогу імплементувати програмні рішення власного виробництва, а також організувати взаємодію власного програмного забезпечення із існуючим.

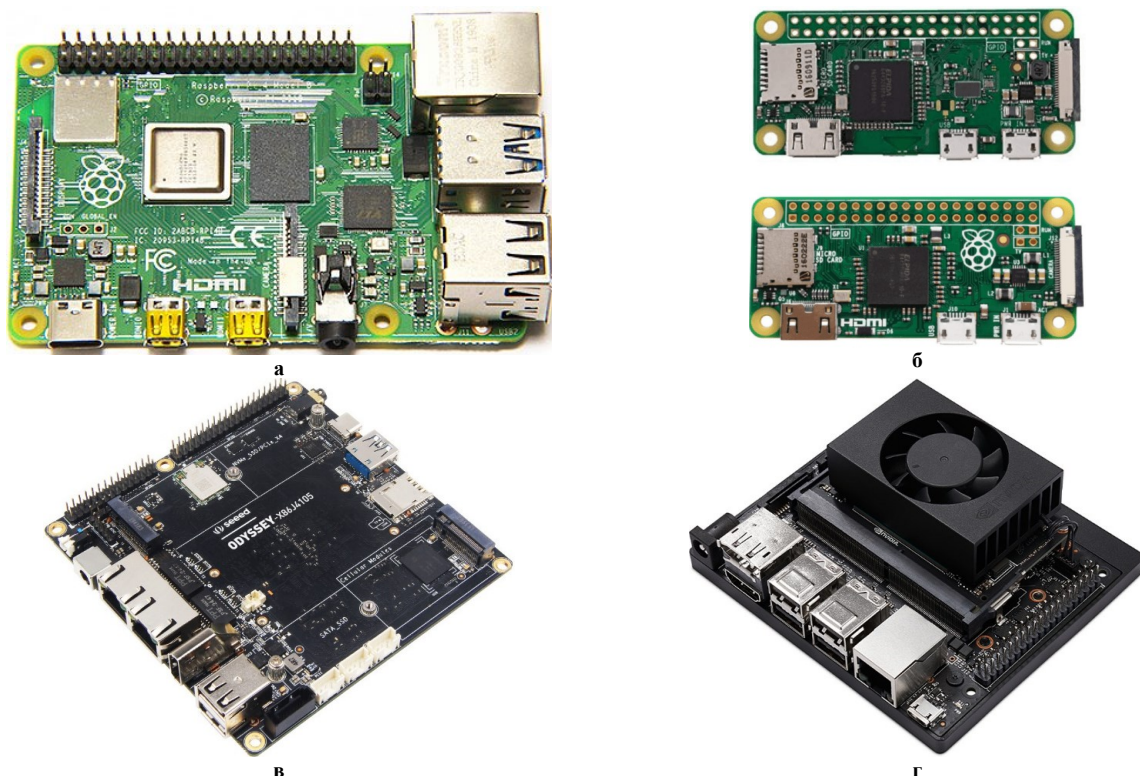


Рис. 5. Види одноплатних комп'ютерів:
а) - Raspberry Pi 4 Model B, б) - Raspberry Pi Zero; в) - ODYSSEY – X86J4105800;
г) - NVIDIA Jetson Xavier NX

Імплементация одноплатного комп'ютера також надасть змогу використовувати, як існуюче обладнання (класичні системи які вже розроблені та застосовуються проте мають аналоговий вихідний

сигнал) так і використовувати сучасні мікроелектромеханічні прилади, такі як акселерометри, гіроскопи магнітометри та барометри, для побудови цифрової автоматичної системи керування, яка забезпечить стабільність та надійність роботи [11-13]. Також використання одноплатних комп'ютерів надасть змогу дослідити та підібрати МЕМС сенсори, забезпечать відносно точну видачу навігаційних параметрів [13].

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

Розглянуто організацію та склад автономного безпілотного підводного комплексу. Наведено поширені апаратно-програмні рішення, які можуть бути застосовані при дослідженні та розробці комплексу АБПА. Розглянуто типи одноплатних комп'ютерів та їх відмінність від мікроконтролерів. У розглянутих апаратно-програмних комплексах не описувалися тактико-технічні характеристики обладнання та їх інтерфейс комунікації (прийому та передачі даних).

Незважаючи на всі переваги вже розроблених та завантажених у загальний доступ апаратно-програмних засобів реалізації моніторингу та керування АБПА такі системи мають низку недоліків, особливо ці недоліки проявляються при розробці АБПА, які мають багатоцільове призначення та повинні виконувати складні місії.

Першим недоліком є інтеграція існуючого апаратно-програмного комплексу із стороннім обладнанням, яке може бути використаним для забезпечення дальнього радіозв'язку та забезпечення шифрованого каналу зв'язку. Така інтеграція зазвичай займає значний час налаштування та узгодження протоколів комунікації.

Другим недоліком є обмеженість функціоналу відомих апаратно-програмних комплексів. Розроблені та відомі комплекси можуть використовуватися тільки для виконання простих задач під наглядом оператора.

Третім недоліком є загальна доступність. Комерційні апаратно-програмні комплекси можуть бути захищені від злому, однак їх функціонал все одно залишається обмеженим, а для його розширення та доповнення необхідно витратити значні кошти, які можуть бути вищими а ніж розробка самого АБПА. Застосування апаратно-програмних комплексів із відкритим кодом, які були розглянуті, може бути критичним у плані втрати АБПА під час місії, а саме знаючи що знаходиться «під капотом» апарата можна із легкістю втрутитися у мережу комунікацій АБПА та спотворити необхідні дані.

Порівнюючи переваги та недоліки апаратно-програмних комплексів можна зробити висновок, що вибір обладнання є критичним у розробці та дослідженні АБПА. Надійним способом забезпечити стабільність роботи та функціонування комплексу АБПА та його захищеності є розробка власного обладнання із застосуванням одноплатних комп'ютерів та МЕМС датчиків та написання власного програмного забезпечення.

Література

1. С. О. Гуриченко, «Організація систем керування сучасних безпілотних підводних апаратів», на XIV Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ», Київ, 2021, с. 34-37
2. Lv P. F., He B., Guo J., Shen Y., Yan T. H., Sha Q. X. (2020). Underwater navigation methodology based on intelligent velocity model for standard AUV. *Ocean Engineering*, 202, 107073.
3. Ramírez I. S., Bernalte Sánchez P. J., Papaelias M., Márquez F. P. G. (2021). Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 277.
4. Bin H., Justice A. (2009). The design of an unmanned aerial vehicle based on the ArduPilot. *Indian Journal of Science and Technology*, 2(4), 12-15.
5. Luo Z., Xiang X., Zhang Q. (2019). Autopilot system of remotely operated vehicle based on Ardupilot. In *Intelligent Robotics and Applications: 12th International Conference, ICIRA 2019, Shenyang, China, August 8–11, 2019, Proceedings, Part III 12* (pp. 206-217). Springer International Publishing.
6. Mendoza-Mendoza J. A., Gonzalez-Villela V. J., Sepulveda-Cervantes G., Mendez-Martinez M., (2020). ArduPilot Working Environment. *Advanced Robotic Vehicles Programming: An Ardupilot and Pixhawk Approach*, 19-46.
7. ArduPilot, Available: <https://ardupilot.org>
8. Pixhawk, Available: <https://pixhawk.org>
9. iNav, Available: <https://github.com/inavFlight/inav/wiki>
10. Ågren K. (2014). Autonomisen vesimittalaitealustan ArduPilot-pohjainen ohjausjärjestelmä.
11. Gurynenko S. Universal Information Transducer as part of multi-purpose control system. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 106-109. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-129-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-15-17-sentyabrya-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>
12. Gurynenko S. The way of autonomous unmanned underwater vehicle autopilot digital control synthesis. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo,

Japan. 2022. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiyascience-innovations-and-education-problems-and-prospects-6-8-aprelya-2022-godatokio-yaponiya-arhiv>

13. С. О. Гуриненко, «Система автоматичного керування автономним безпілотним підводним апаратом на основі мікроелектромеханічних систем», на Чотирнадцята міжнар. наук.-практ. конф. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІПТК-2021), Київ, 2021, с. 19-21.

References

- [1] Gurynenko S. O. Organizaciya system keruvannya suchasnyh bezpilotnyh pidvodnyh aparativ: tezy dop. na XIV Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodyh vchenyh "POGLYAD U MAIBUTNYE PRYLADOBUDUVANNYA", Kyiv, 2021, pp. 34-37.
- [2] Lv PF, He B, Guo J, Shen Y, Yan TH, Sha QX. Underwater navigation methodology based on intelligent velocity model for standard AUV. *Ocean Engineering*. 2020 Apr 15;202:107073.
- [3] Ramírez IS, Bernalte Sánchez PJ, Papaelias M, Márquez FP. Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021 Mar 4;9(3):277.
- [4] Bin H, Justice A. The design of an unmanned aerial vehicle based on the ArduPilot. *Indian Journal of Science and Technology*. 2009 Mar;2(4):12-5.
- [5] Luo Z, Xiang X, Zhang Q. Autopilot system of remotely operated vehicle based on Ardupilot. In *Intelligent Robotics and Applications: 12th International Conference, ICIRA 2019, Shenyang, China, August 8–11, 2019, Proceedings, Part III 12 2019* (pp. 206-217). Springer International Publishing.
- [6] Mendoza-Mendoza JA, Gonzalez-Villela VJ, Sepulveda-Cervantes G, Mendez-Martinez M, Sossa-Azuela H, ArduPilot Working Environment. *Advanced Robotic Vehicles Programming: An Ardupilot and Pixhawk Approach*. 2020:19-46.
- [7] ArduPilot. URL: <https://ardupilot.org>
- [8] Pixhawk. URL: <https://pixhawk.org>
- [9] iNav. URL: <https://github.com/inavFlight/inav/wiki>
- [10] Ågren K. Autonomisen vesimittalaitealustan ArduPilot-pohjainen ohjausjärjestelmä, Kevät, 2014.
- [11] Gurynenko S. Universal Information Transducer as part of multi-purpose control system. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 106-109. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-129-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-15-17-sentyabrya-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>
- [12] Gurynenko S. The way of autonomous unmanned underwater vehicle autopilot digital control synthesis. *Proceedings of the 9th International scientific and practical conference*. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2022. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiyascience-innovations-and-education-problems-and-prospects-6-8-aprelya-2022-godatokio-yaponiya-arhiv>
- [13] Gurynenko S. O., Systema avtomatichnogo keruvannya avtonomnym bezpilotnym pidvodnym aparatom na osnovi microelectromechanichnyh system, Choturnadcyata mignar. nauk.-prakt. konf. Integrovani intelektualni robototekhnichni komplekxy (IIPTK-2021), Kyiv, 2021, pp. 19-21.