

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУРИНЕНКО СТАНІСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

УДК 629.5:629.7:517.9:519.9:62-5:629.07

ДИСЕРТАЦІЯ
СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ
БЕЗПЛОТНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ **ГУРИНЕНКО С.О.**

Науковий керівник **Бурау Надія Іванівна, доктор технічних наук, професор**

Київ 2024

АНОТАЦІЯ

Гуриненко С.О. Система управління, орієнтації та навігації автономних безпілотних підводних апаратів на основі мікроелектромеханічних технологій – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (15 – Автоматизація та приладобудування). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального та важливого науково-практичного завдання вдосконалення систем управління, орієнтації та навігації із застосуванням мікроелектромеханічних технологій для автономного безпілотного підводного апарата класу Міні.

У першому розділі дисертації наведено огляд та проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку безпілотних підводних апаратів. Проведено огляд загальних характеристик та розглянуто основні функціональні можливості та завдання, які можуть бути поставлені перед безпілотними підводними апаратами. Показано, що пріоритетним напрямком розвитку морської робототехніки є розвиток автономних безпілотних підводних апаратів. Наведено класифікацію автономних безпілотних підводних апаратів за конструктивною формою. Проаналізовано склад бортового навігаційного обладнання та обладнання, яке забезпечує керування апарата. На основі проведеного огляду розглянуто виконані роботи, які присвячені дослідженню систем орієнтації та навігації, а також проведено огляд робіт за системами управління автономних безпілотних підводних апаратів. На основі огляду та аналізу раніше виконаних робіт з'ясовано, що: напрямком морської робототехніки в області розробки автономних безпілотних підводних апаратів поступово розвивається; поступово модернізується бортове обладнання, тобто

відомі пристрої морської підводної навігації оновлюються та переходять на нову елементну базу; досліджуються та розробляються алгоритмічні методи керування. Однак, практично відсутні комплексні роботи та дослідження, які описують поєднання конструктиву апарата та його вплив на керування; не наводяться роботи, які присвячені дослідженню автономних систем визначення просторового положення та місцезнаходження (орієнтації та навігації) із застосуванням мікроелектромеханічних систем та вибором цих систем. Виходячи із проведеного огляду виконаних робіт сформовано мету дослідження, яка полягає у вдосконаленні систем орієнтації, навігації та управління автономних безпілотних підводних апаратів для забезпечення виконання багатоцільових завдань та розширення функціональних можливостей апаратів із застосуванням у цих системах MEMS технологій. Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні завдання: провести огляд стану проблеми; провести чисельне моделювання конструкції апарата та аналіз гідродинамічних характеристик апарата, визначити коефіцієнти сили супротиву та підйимальної сили обраної конструкції апарата; обґрунтувати систему орієнтації та навігації автономного безпілотного підводного апарата, розробити імітаційні моделі датчиків, побудованих на MEMS технологіях, імітаційну модель інерціальної навігаційної системи, встановити залежності параметрів орієнтації та навігації та їх похибок від напрямку руху; розробити та виконати імітаційне моделювання каналів керування автономного безпілотного підводного апарата за зануренням та за кутом курсу із урахуванням коефіцієнтів сили супротиву та конструктивних параметрів апарата; впровадити отримані результати.

Другий розділ дисертаційного дослідження присвячено аналізу об'єкта керування та оцінці гідродинамічного конструктиву апарата. Розроблено конструкцію та створено тривимірні моделі безпілотного підводного апарату класу міні, проведено моделювання їх простого руху та визначено гідродинамічні характеристики моделей. На основі результатів дослідження простого прямолінійного руху обрано одну конструкцію апарата, для якої проведено моделювання складного руху за обраними траєкторіями: коло, розворот та

півхвиля, визначено гідродинамічні характеристики моделі. Для обраної конструкції проведено гідродинамічний розрахунок із визначення гідродинамічних коефіцієнтів, геометричних та масогабаритних характеристик апарата, які у подальшому будуть враховуватися при моделюванні системи управління.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню систем орієнтації та навігації. Обґрунтовано використання безплатформної інерціальної навігаційної системи, та проаналізовано її склад. Розроблено імітаційні моделі чутливих елементів (акселерометра та гіроскопа) обраної системи, проведено їх моделювання з урахуванням характеристик реальних приладів. Встановлено, що похибки моделювання розроблених моделей становлять: для акселерометра від 33% до 50%, в залежності від чутливості прилада, у порівнянні із вихідним сигналом реального акселерометра; для гіроскопа – 16% у порівнянні із вихідним сигналом реального гіроскопа. Розроблено імітаційну модель безплатформної інерціальної навігаційної системи, яка враховує моделі сенсорів, та проведено чисельне моделювання роботи системи. Встановлено функціональні залежності параметрів орієнтації та навігації і їх похибок від напрямку руху автономного безпілотного підводного апарата класу міні на основі MEMS технологій, аналіз яких свідчить про стабільність роботи системи протягом усередненого часу функціонування апарата.

Четвертий розділ дисертації присвячено обґрунтуванню та дослідженню системи процесу управління апаратом із урахуванням параметрів об'єкта. На основі обраної системи управління розглянуто автономний безпілотний підводний апарат як об'єкт управління. Розроблено функціональну схему автоматичного управління. Розроблена схема враховує конструкцію та бортове обладнання апарата. Розглянуто систему рівнянь руху апарата, на основі якої виділено та досліджено канали керування рухом занурення та за кутом курсу. У середовищі Simulink розроблено імітаційні моделі автономного безпілотного підводного апарата та проведено чисельне моделювання. На основі отриманих результатів у розроблену імітаційну модель каналу керування за кутом курсу до якої було введено пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор. За результатами

проведених досліджень створено та обґрунтовано інформаційні моделі каналів керування зануренням та зміною кута курсу автономного безпілотного підводного апарата.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: набув подальшого розвитку дослідницький підхід, що полягає у комплексному оцінюванні об'єкта та врахуванні його гідродинамічних характеристик і параметрів мікроелектромеханічних сенсорів при вдосконаленні системи орієнтації, навігації та керування автономного безпілотного підводного апарата; встановлено нові функціональні залежності параметрів орієнтації та навігації і їх похибок від напрямку руху автономного безпілотного підводного апарата класу міні на основі МЕМС технологій; створено та обґрунтовано інформаційні моделі каналів керування зануренням та зміною кута курсу автономного безпілотного підводного апарата, які враховують інформацію про геометричні та гідродинамічні характеристики об'єкта, задання потрібних значень параметрів руху та обчислення відповідних траєкторій, формування сигналів керування, інформацію про результати керування та значень відхилення глибини та кута курсу.

Отримані результати під час дисертаційного дослідження мають практичне значення, яке полягає у застосуванні методів та підходів у вирішенні задач пов'язаних із обґрунтуванням вибору конструкції апарата; застосуванні методики проведення комплексного дослідження апарата; застосуванні імітаційних моделей чутливих елементів (акселерометра та гіроскопа) інерціальної навігаційної системи, які враховують параметри та характеристики реальних датчиків; застосуванні імітаційної моделі безплатформної інерціальної навігаційної системи, яка враховує моделі чутливих елементів та їх характеристики; застосуванні імітаційних моделей каналів управління автономного безпілотного підводного апарата, які враховують конструкційні та масо-габаритні характеристики апарата. Результати дисертаційних досліджень мають практичне впровадження.

Ключові слова: автономний безпілотний підводний апарат, автоматизація, мобільні роботи, система управління, орієнтація, безплатформна інерціальна

навігаційна система, визначення положення, керування, мікроелектромеханічні технології, інерційні датчики, акселерометр, гіроскоп, комп'ютерне моделювання, імітаційне моделювання, похибки.

Список публікацій, в яких опубліковано основні наукові результати

1) Бурау, Н., & Гуриненко, С. (2023). Аналіз систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата із складною динамікою руху. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, (65(1), 5–12, ISSN (p) 0321-2211, ISSN (e) 2663-3450. [https://doi.org/10.20535/1970.65\(1\).2023.283195](https://doi.org/10.20535/1970.65(1).2023.283195).

2) Гуриненко, С., & Бурау, Н. (2023). Огляд математичних та алгоритмічних методів систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата із складною динамікою руху. *Measuring and computing devices in technological processes*, (2), 42–48, ISSN 2219-9365. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-6>.

3) Гуриненко, С. О. (2023). Математична та імітаційна моделі мікроелектромеханічного акселерометра автономної інерціальної системи визначення просторового положення та місцезнаходження. *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 68(4), 38–50, ISSN 2786-6491. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-4-3>.

4) С.О. Гуриненко, Н.І. Бурау, В.О. Суржок. Моделювання та аналіз складного руху автономного безпілотного підводного апарата. *Elektronnoe Modelirovanie* 2023, 45(3):81-91, ISSN 0204–3572, DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.081>.

5) Гуриненко, С. (2023). Апаратно-програмний комплекс автономного безпілотного підводного апарата: Огляд. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 123–129, ISSN 2219-9365. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-17>.

6) Гуриненко С.О., Концепт універсального перетворювача інформації як елемента цифрової системи керування. ВЧЕНІ ЗАПИСКИ Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 34(73),

№ 1 2023, 18-24, ISSN 2663-5941 (Print) ISSN 2663-595X (Online).
DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/03>.

7) Гуриненко, С. О. (2023). Моделювання, CFD-розрахунків та оцінка гідродинамічних коефіцієнтів ав-тономного безпілотного підводного апарата. *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 67(6), 5–13, ISSN 2786-6491. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2022-6-1>.

8) Бурай, Н. І., Величко, С. М., & Гуриненко, С. О. (2021). Моделювання динаміки автономного безпілотного підводного апарата за простого руху. *KPI Science News*, (3), ISSN 2617-5509 (друкований), ISSN 2663-7472 (електронний), DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.3.243586>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію результатів

1) Гуриненко С.О. Чисельне моделювання та оцінка гідродинамічних коефіцієнтів автономного безпілотного підводного апарата. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2023). Шістнадцята міжнародна науково-практична конференція 23-24 травня 2023 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2023, 30-33 – 402 с. (збірка тез).

2) Гуриненко С.О. Організація та лабораторне забезпечення дослідження мікро-оптикоелектромеханічних приладів для систем керування автономними безпілотними підводними апаратами. XXI Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 2022, 20-22.

3) Gurynenko S.O. 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. 123-130.

4) Gurynenko S.O., Potapova K.R. Universal Information Transducer as part of multi-purpose control system. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 106-110.

5) Гуриненко С.О., Бурай Н.І. Система автоматичного керування автономним безпілотним підводним апаратом на основі мікроелектромеханічних систем. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2021). Чотирнадцята

міжнародна науково-практична конференція 18-19 травня 2021 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2021. – 256 с. (збірка тез).

б) Гуриненко С.О. Організація систем керування сучасних безпілотних підводних апаратів. Матеріали Всеукр. XIV наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18–19 трав. 2021 р. Київ : «Політехніка» КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 34–37.

Список праць, які додатково відображають науковий та практичний здобуток

1) Патент на корисну модель. ПРИСТРІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНИЙ: пат: 152838 Україна: G01R 13/00, G01D 5/00, G06F3/00, H03M 1/12/ С.О. Гуриненко, К.Р. Потапова, - № u202200327; заявл. 27.01.2022, опубл. 20.04.2023 – 3 с.

SUMMARY

Gurynenko S.O. System of control, orientation, and navigation of autonomous unmanned underwater vehicles based on microelectromechanical technologies – qualifying scientific work manuscript

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in the field of 151 – Automation and Computer-Integrated Technologies (15 – Automation and Instrument Engineering). – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Kyiv, 2024.

The dissertation is dedicated to addressing scientific and technical challenges related to the application of microelectromechanical systems and technologies in the development of control, orientation, and navigation systems for autonomous unmanned underwater vehicles.

The first chapter of the dissertation provides an overview and analysis of the current state and trends in the development of unmanned underwater vehicles. An overview of general characteristics and main functional capabilities and tasks that can be assigned to unmanned underwater vehicles is conducted. It is shown that the priority direction in the development of marine robotics is the advancement of autonomous unmanned underwater vehicles. The classification of autonomous unmanned underwater vehicles by structural form is presented. The composition of onboard navigation equipment and equipment providing control of the apparatus is analyzed. Based on the conducted review, previous research dedicated to the investigation of orientation and navigation systems is examined, as well as an overview of works on control systems of autonomous unmanned underwater vehicles. Based on the review and analysis of previous works, it is found that: the direction of marine robotics in the development of autonomous unmanned underwater vehicles is gradually evolving; the onboard equipment is gradually modernizing, meaning known marine navigation devices are being updated and transitioned to new hardware;

algorithmic control methods are being researched and developed. However, there is practically no comprehensive work or research describing the combination of apparatus design and its impact on control; works dedicated to the study of autonomous spatial positioning and location systems (orientation and navigation) using microelectromechanical systems (MEMS) and the selection of these systems are not provided. Based on the conducted review of previous works, the research goal is formulated, which aims to improve the orientation, navigation, and control systems of autonomous unmanned underwater vehicles to ensure the accomplishment of multifunctional tasks and expand the functional capabilities of the apparatus using MEMS technologies in these systems. To achieve the research goal, the following tasks need to be addressed: conduct a review of the problem status; perform numerical modeling of the apparatus design and analysis of hydrodynamic characteristics of the apparatus, determine the coefficients of resistance force and buoyancy force of the selected apparatus design; justify the orientation and navigation system of the autonomous unmanned underwater vehicle, develop simulation models of sensors built on MEMS technologies, simulation model of an inertial navigation system, establish dependencies of orientation and navigation parameters and their errors on the direction of motion; develop and conduct simulation modeling of control channels of the autonomous unmanned underwater vehicle for depth and course angle considering resistance force coefficients and apparatus design parameters; implement the obtained results.

The second chapter of the dissertation is dedicated to the analysis of the control object and the assessment of the hydrodynamic design of the apparatus. The design and creation of three-dimensional models of a mini-class unmanned underwater vehicle have been developed, modeling their simple motion, and determining the hydrodynamic characteristics of the models. Based on the results of the study of simple straight-line motion, one apparatus design was selected for which modeling of complex motion along selected trajectories was performed: circle, turn, and half-wave, determining the hydrodynamic characteristics of the model. For the selected design, hydrodynamic calculations were carried out to determine the hydrodynamic coefficients, geometric, and

mass-dimensional characteristics of the apparatus, which will be taken into account in further control system modeling.

The third chapter of the dissertation is devoted to the study of orientation and navigation systems. The use of strapdown inertial navigation system is justified, and its composition is analyzed. Simulation models of sensitive elements (accelerometer and gyroscope) of the selected system have been developed, and their modeling has been conducted taking into account the characteristics of real devices. It has been established that the modeling errors of the developed models are as follows: for the accelerometer, they range from 33% to 50%, depending on the sensitivity of the device, compared to the output signal of a real accelerometer; for the gyroscope, it is 16% compared to the output signal of a real gyroscope. An simulation model of a strapdown inertial navigation system has been developed, which takes into account sensor models, and numerical modeling of the system operation has been conducted. Functional dependencies of orientation and navigation parameters and their errors on the direction of motion of a mini-class autonomous unmanned underwater vehicle based on MEMS technologies have been established, the analysis of which indicates the stability of the system operation during the average functioning time of the apparatus.

The fourth chapter of the dissertation is dedicated to the justification and investigation of the control process system considering the object parameters. Based on the selected control system, the autonomous unmanned underwater vehicle is considered as the object of control. A functional scheme of automatic control has been developed, taking into account the structure and onboard equipment of the vehicle. The system of equations of motion of the vehicle is considered, based on which channels of control for depth and heading angle motion are identified and investigated. Simulation models of the autonomous unmanned underwater vehicle have been developed in the Simulink environment, and numerical modeling has been conducted. Based on the obtained results, an simulation model of the heading control channel was developed, to which a proportional-integral-derivative controller was introduced. Based on the research results, informational models of depth and heading angle control channels of the autonomous unmanned underwater vehicle have been created and justified.

The scientific novelty of the obtained results lies in the following: the research approach has further developed, involving a comprehensive assessment of the object and considering its hydrodynamic characteristics and parameters of microelectromechanical sensors in improving the orientation, navigation, and control system of an autonomous unmanned underwater vehicle. New functional dependencies of orientation and navigation parameters and their errors on the direction of movement of the autonomous unmanned underwater vehicle of the mini class based on MEMS technologies have been established. Information models of immersion control channels and change of course angle of the autonomous unmanned underwater vehicle have been created and justified, taking into account information about the geometric and hydrodynamic characteristics of the object, setting the necessary values of motion parameters, calculating the corresponding trajectories, forming control signals, information about control results, and deviations in depth and course angle.

The results obtained during the dissertation research have practical significance, which lies in the application of methods and approaches in solving problems related to substantiating the choice of the apparatus design; application of methodology for conducting comprehensive research of the apparatus; application of simulation models of sensitive elements (accelerometer and gyroscope) of the inertial navigation system, which take into account the parameters and characteristics of real sensors; application of simulation model of strapdown inertial navigation system, which considers models of sensitive elements and their characteristics; application of simulation models of control channels of an autonomous unmanned underwater vehicle, which take into account the structural and dimensional characteristics of the apparatus. The results of the dissertation research have practical implications.

Keywords: autonomous unmanned underwater vehicle, automation, mobile robots, control system, orientation, strapdown inertial navigation system, attitude determination, control, microelectromechanical technologies, inertial sensors, accelerometer, gyroscope, computer modeling, simulation modeling, errors.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
SUMMARY	9
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БЕЗПІЛОТНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ.....	23
1.1 Загальна характеристика безпілотних підводних апаратів	23
1.2 Стан розвитку автономних безпілотних підводних апаратів	28
1.3 Загальна характеристика та тенденції розвитку систем керування, орієнтації та навігації автономних безпілотних підводних апаратів	41
1.4 Огляд виконаних раніше робіт	43
1.4.1 Загальна характеристика робіт по системам орієнтації та навігації автономних безпілотних підводних апаратів.....	43
1.4.2 Загальна характеристика робіт по системам керування автономних безпілотних підводних апаратів	47
1.5 Мета і завдання наукового дослідження	51
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ОЦІНКА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АПАРАТА	53
2.1 Вибір та обґрунтування типу автономного безпілотного підводного апарата.....	54
2.2 Дослідження автономного безпілотного підводного апарата за простого руху.....	57
2.2.1 Підготовка та імпорту тривимірної моделі у розрахунковий комплекс	58
2.2.2 Задання граничних умов	59
2.2.3 Генерування скінченно-різницевого елементів (сітка).....	60

2.2.4	Задання середовища функціонування.....	61
2.2.5	Чисельний розрахунок.....	61
2.2.6	Відображення, аналіз та інтерпретація отриманих результатів.....	62
2.3	Дослідження автономного безпілотного підводного апарата за складного руху.....	66
2.4	Визначення гідродинамічних коефіцієнтів автономного безпілотного підводного апарата.....	72
Висновки по Розділу 2		79
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ		81
3.1	Структура системи орієнтації та навігації автономного безпілотного підводного апарата.....	83
3.2	Обґрунтування вибору мікроелектромеханічних чутливих елементів для інерціальної системи орієнтації та навігації	87
3.3	Дослідження чутливих елементів інерціальної системи орієнтації та навігації	89
3.3.1	Дослідження акселерометра	89
3.3.2	Дослідження гіроскопа.....	98
3.4	Кінематичні рівняння орієнтації інерціальних навігаційних систем	105
3.4.1	Рівняння орієнтації Ейлера (Ейлера-Крилова).....	107
3.4.2	Рівняння орієнтації Пуассона (матриця напрямних косинусів).....	107
3.4.3	Вектор повороту Ейлера (вектор орієнтації Ейлера)	108
3.4.4	Кватерніонні рівняння орієнтації	109
3.5	Синтез та імітаційне моделювання інерціальної системи орієнтації та навігації	109

РОЗДІЛ 4 СИНТЕЗ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	122
4.1 Автономний безпілотний підводний апарат як об'єкт управління	122
4.2 Моделювання системи управління руху занурення (руху з глибини) автономного безпілотного підводного апарата.....	126
4.3 Моделювання системи управління кутом курсу за різних режимів руху автономного безпілотного підводного апарата.....	131
Висновки по Розділу 4	142
ВИСНОВКИ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	146
ДОДАТОК А	160
ДОДАТОК Б	163
ДОДАТОК В	165
ДОДАТОК Г	168
ДОДАТОК Д	173

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АБПА – автономний безпілотний підводний апарат;
БІНС – безплатформна інерціальна навігаційна система;
БІСО – безплатформна інерціальна система орієнтації;
БПА – безпілотний підводний апарат;
БС – безпілотна система;
ДКШ – датчик кутової швидкості;
ІВМ – інерціальний вимірювальний модуль;
ІНС - інерціальна система навігації;
ІСО – інерціальна система орієнтації;
МЕМС (MEMS) – мікроелектромеханічна система;
ММА – мікромеханічний акселерометр;
ММГ – мікромеханічний гіроскоп;
МНК – матриця напрямних косинусів;
САК (САУ) – система автоматичного керування (управління);
СВПП – система визначення просторового положення;
СК – система координат;
СНС – супутникова навігаційна система;
ТБПА – телекерований безпілотний підводний апарат;
ЧЕ – чутливий елемент;
MATLAB – програмне середовище;
 $^{\circ}/\text{г}$ – градус за годину;
 $^{\circ}/\sqrt{\text{г}}$ – градус на корінь квадратний з години;
 $^{\circ}/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ - щільність шуму;
 $^{\circ}\text{С}$ – градус Цельсія;
 $\text{км}/\text{г}$ – кілометр за годину;
 $\text{м}/\text{с}$ – метр за секунду;
 $\text{м}/\text{с}^2$ – метр за секунду в квадраті;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

На сьогоднішній день дослідження та освоєння підводного простору Світового океану є одним з пріоритетних напрямків економічного розвитку багатьох країн. Це пов'язано із тим, що в Світовому океані знаходяться обширні родовища корисних копалин, успішна експлуатація яких сприятиме додатковому розвитку країн. Крім того, протягом останніх десятиліть, на дні Світового океану було прокладено значну кількість життєвоважливих індустріальних та технологічних комунікацій (лінії зв'язку та електропостачання, підводні трубопроводи тощо), які вимагають постійного інспектування та обслуговування. Практика показує, що виконання робіт у підводному просторі відбувається в екстремальних умовах (великі глибини, високий тиск, низькі температури) і пов'язане із ризиком для життя та здоров'я людей, які виконують ці роботи. Також, залучення людей для виконання більшості видів підводних робіт пов'язане із великими матеріальними витратами, а в деяких випадках є принципово неможливим. Наприклад, ліквідацію аварії на глибоководній нафтовидобувній платформі Deepwater Horizon стало можливо лише завдяки використанню безпілотних підводних апаратів (БПА).

У зв'язку з вищевикладеним, подальше освоєння підводного простору Світового океану неможливе без збільшення використання БПА при виконанні різноманітних підводних робіт. Проте в процесі цього освоєння завдання, які вирішуються за допомогою БПА, стають значно складнішими, і особливу актуальність набувають завдання, які виконуються в автономному режимі без безпосередньої участі оператора, тобто постає потреба у дослідженні та створенні автономних безпілотних підводних апаратах.

Подібними задачами в Україні займається незначна кількість учених, яка задіяна безпосередньо у кораблебудуванні Національного Університету Кораблебудування ім. адмірала С.Й. Макарова: Блінцов В.С., Боград В.М. Світова тенденція дослідження підводної робототехніки представлена більш значною

кількістю вчених, таких як: Sands T., Bollino K., Thor I. Fossen, Kristin Y. Pettersen, M.S. Wiig, T.R. Krogstad.

Наявні дослідження мають вагоме значення для розвитку та вдосконалення безпілотних підводних апаратів та систем керування їх рухом. Але результати таких досліджень мають певні обмеження, зокрема: дослідження алгоритмів управління, орієнтації та навігації не враховують особливості конструкції апарату та його гідродинамічних характеристик; розробка апаратів класу міні обумовлює застосування чутливих елементів систем на основі мікроелектромеханічних технологій, але в роботах не наведено обґрунтування їх вибору та відсутній аналіз характеристик таких елементів та їх впливу на характеристики систем керування, орієнтації та навігації автономних БПА, побудованих з використанням таких елементів. Тому вдосконалення систем управління, орієнтації та навігації БПА на основі врахування як конструктивних та гідродинамічних характеристик самого апарату, так і характеристик сучасних мікроелектромеханічних датчиків, є актуальним науково-практичним завданням.

Мета дослідження

Мета дисертаційного дослідження – вдосконалення систем орієнтації, навігації та управління автономних безпілотних підводних апаратів для забезпечення виконання багатоцільових завдань, розширення функціональних можливостей та підвищення характеристик автономних безпілотних підводних апаратів із застосуванням у цих системах мікроелектромеханічних систем (MEMS) та технологій.

Завдання дослідження

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

- 1) Огляд стану проблеми;
- 2) Чисельне моделювання конструкції об'єкта, аналіз гідродинамічних характеристик апарата, визначення коефіцієнтів сили супротиву та підйимальної сили обраної конструкції апарата;

3) Обґрунтування системи орієнтації та навігації автономного безпілотної підводного апарата, розробка імітаційних моделей датчиків, побудованих на МЕМС технологіях, розробка імітаційної моделі інерціальної навігаційної системи, встановлення залежностей параметрів орієнтації та навігації та їх похибок від напрямку руху;

4) Розробка та імітаційне моделювання каналів керування автономного безпілотної підводного апарата за зануренням та за кутом курсу із урахуванням коефіцієнтів сили супротиву та конструктивних параметрів апарата;

5) Впровадження отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є процеси орієнтації, навігації та управління автономного безпілотної підводного апарата із застосуванням мікроелектромеханічних систем та технологій.

Предметом дослідження є методи та засоби управління, орієнтації та навігації автономного безпілотної підводного апарата.

Методи дослідження: у дисертаційній роботі використовуються методи теорії автоматичного керування, методи теорії орієнтації та інерціальної навігації, методи аналізу та синтезу автоматичних систем, методи чисельного комп'ютерного моделювання конструкції апарата, методи обчислювальної гідродинаміки, методи імітаційного комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1) Набув подальшого розвитку дослідницький підхід, що полягає у комплексному оцінюванні об'єкта та врахуванні його гідродинамічних характеристик і параметрів мікроелектромеханічних сенсорів при вдосконаленні системи орієнтації, навігації та керування автономного безпілотної підводного апарата.

2) Встановлено нові функціональні залежності параметрів орієнтації та навігації та їх похибок від напрямку руху та зовнішнього збурення автономного безпілотної підводного апарата класу Міні на основі МЕМС технологій.

3) Створено та обґрунтовано інформаційні моделі каналів керування зануренням та зміною кута курсу автономного безпілотної підводного апарата,

які враховують інформацію про геометричні та гідродинамічні характеристики об'єкта, задання потрібних значень параметрів руху та обчислення відповідних траєкторій, формування сигналів керування, інформацію про результати керування та значень відхилення глибини та кута курсу.

Особистий внесок здобувача

Всі наукові результати отримано здобувачем особисто, проведено обґрунтування шляхів вдосконалення систем управління, орієнтації та навігації автономних БПА класу міні, розроблено та обґрунтовано інформаційні моделі каналів керування, розроблено функціональні схеми та імітаційні моделі каналів керування, проведено моделювання та проаналізовано його результати, проведено аналіз ефективності запропонованих систем управління, орієнтації та навігації, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, зроблено висновки за результатами наукового дослідження.

В опублікованих працях із співавторами особисто здобувачеві належать: розробка конструкції та комп'ютерної тривимірної моделі об'єкта; аналіз впливу особливостей конструкції на гідродинамічні характеристики об'єкта при його простому та складному русі; аналіз апаратно-програмного комплексу забезпечення керування апаратом; обґрунтування застосування мікроелектромеханічних систем та технологій у складі автономного безпілотного підводного апарата; дослідження мікроелектромеханічних чутливих елементів систем орієнтації та навігації.

Апробація матеріалів дисертаційного дослідження

Наукові та практичні результати досліджень обговорювалися на наступних конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах: Всеукр. XIV наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18–19 трав. 2021 р. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського; Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2021). Чотирнадцята міжнародна науково-практична конференція 18-19 травня 2021 р., Київ, Україна. – НАУ; 2nd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021; 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing

Group. Tokyo, Japan. 2022; XXI Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 2022; Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2023). Шістнадцята міжнародна науково-практична конференція 23-24 травня 2023 р., Київ, Україна. – НАУ.

Науково-практична апробація матеріалів

- Патент на корисну модель: ПРИСТРІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНИЙ: пат: 152838 Україна: G01R 13/00, G01D 5/00, G06F3/00, H03M 1/12/ С.О. Гуриненко, К.Р. Потапова, - № u202200327; заявл. 27.01.2022, опубл. 20.04.2023.

Структура дисертації

Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 5 додатків.

Обсяг дисертації

Загальний обсяг дисертації складає 176 сторінок, з них основний текст роботи викладено на 120 сторінках друкованого тексту, у тому числі 64 рисунки, 9 таблиць, 37 формул та п'яти додатків (А-Д). У списку використаних джерел наведено 144 джерела.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих оптичних і навігаційних систем КПП ім. Ігоря Сікорського у відповідності до: Постанови Кабінету Міністрів України від 17 жовтня 2009 року «Про затвердження Морської доктрини України на період до 2035 року»; Закону України № 3534-ІХ, від 13.01.2024 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», а також у рамках пошукової науково-дослідної роботи "Науково-практичні засади створення інтелектуальних рухомих об'єктів багатоцільового призначення" ДРН0122U200716.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблено методи та підходи вирішення задач пов'язаних із обґрунтуванням вибору конструкції апарата.

Розроблено методику проведення комплексного дослідження апарата. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення.

Розроблено імітаційні моделі чутливих елементів (акселерометра та гіроскопа) інерціальної навігаційної системи, які враховують параметри та характеристики реальних датчиків. Розроблено імітаційну модель безплатформної інерціальної навігаційної системи, яка враховує моделі чутливих елементів та їх характеристики.

Розроблено імітаційні моделі каналів управління автономного безпілотного підводного апарата, які враховують конструкційні та масо-габаритні характеристики апарата.

Результати досліджень використовуються в ТОВ «АЙ ЕС АР ТЕХНОЛОДЖИ» (м. Київ) та ПАТ «НТК «ЕЛЕКТРОНПРИЛАД» (м. Київ) що підтверджується відповідними Актами впровадження.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БЕЗПІЛОТНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

1.1 Загальна характеристика безпілотних підводних апаратів

Безпілотні підводні апарати (БПА) відносно новий клас безпілотних систем морської робототехніки, найбільший розвиток яких припадає на останнє десятиліття.

Безпілотні підводні апарати (інколи підводні дрони) – підводні апарати, які можуть працювати під водою без людини. БПА можна розділити на дві великі категорії: телекеровані підводні апарати (ТПА) і автономні підводні апарати (АПА). ТПА дистанційно керується людиною-оператором за допомогою дротового зв'язку. АПА можуть бути як автоматизовані так і автоматичні які працюють незалежно від прямого втручання людини.

Різні типи безпілотних підводних апаратів здатні функціонувати в різноманітних середовищах та виконувати різнопланові завдання як прикладного наукового, так і комерційного завдань. До різнопланових завдань можуть входити такі завдання [1,2]:

1. Перевірка/ідентифікація пошкоджень

Суть даного завдання в організації та забезпеченні перевірки корпусів кораблів, субмарин, пірсів та труб на наявність сторонніх предметів, пошкоджень та оцінки цілісності конструкції. У рамках цього завдання може також виконуватися пошук небезпечних об'єктів (наприклад боєприпасів, що не розірвалися), які тривалий час знаходяться під водою.

2. Океанографія/Гідрографія

Дане завдання використовується для організації та проведення пошуку, досліджень та вимірювань стану забрудненості водного та підводного середовищ і особливо проведення гідрографії у місцях, де отримання даних ускладнено.

У дослідженні завдання океанографії/гідрографії входять такі під-задачі:

- Батиметрія;
- Акустична образність;
- Оптичні зображення;
- Профілювання підводного дна;
- Визначення характеристики товщі води;
- Профілювання течій (з припливами та відливами);
- Профілювання температури;
- Профілювання солоності;
- Дослідження прозорості води;
- Виявлення та дослідження біоломінесценція;
- Виявлення та відстеження хімічної, біологічної радіонуклідної та вибухової небезпек.

Цілі океанографічних завдань варіюються від широкої розвідки великих прибережних підводних районів до детальної характеристики конкретних зон із проведенням збору високоякісних даних та точними координатами місцеположення. Основна увага приділяється територіальному узбережжю, але для визначення більш детальних характеристик дна необхідно використовувати глибоководне гідрографічне дослідження.

3. Моніторинг діяльності людини та її впливу на водне середовище

Дане завдання наближене до завдань океанографії/гідрографії, проте спрямоване саме на моніторинг та виявлення процесу зміни фізичних, хімічних та біологічних властивостей водного простору, яке може вплинути на живі організми і на саму людину. Водне середовище вважається забрудненими, якщо показники складу і властивості води змінюються під впливом виробничої та промислової діяльності людей та побутового використання води, та стає повністю або частково не придатним для подальшого використання води.

4. Вузли мережі зв'язку/навігації

Метою цього завдання є забезпечення функцій зв'язку та навігації для інших типів об'єктів (підводні човни, нафтовидобувні платформи тощо). Використання

БПА дає змогу збільшити радіус функціонування системи зв'язку та навігації та забезпечити кращу доступність у ті місця та райони, де використання традиційних засобів (безпілотні літальні апарати, наземні станції тощо) є неможливим та/або економічно витратним. Як засіб зв'язку, БПА може бути запущений із безпечної відстані, перейти до району або місця функціонування за допомоги автономної системи орієнтації та навігації і автоматичної системи керування чи супутникової системи позиціонування і автоматично розгорнути вузол зв'язку. Як засіб навігації, БПА може розташовуватися у певному місці та виконувати функцію резервного буя, або орієнтира та маяка.

5. Доставка корисного навантаження

Доставка корисного навантаження за звичай є невід'ємною складовою інших завдань, які виконуються. Доставлення корисного навантаження може включати в себе:

- Доставлення датчиків або транспортних засобів швидкого розгортання (БЛА тощо) для підтримки розвідки, спостереження та проведення рекогносцирувального дослідження, засоби протимінної боротьби;
- Вантаж у вигляді слідування за транспортним засобом.

6. Розвідка, спостереження та рекогносцирувальне дослідження

Метою виконання завдань розвідки, спостереження та рекогносцирувального дослідження із БПА є збір розвідувальних даних над і під водною поверхнею (електромагнітні, оптичні, аналізи повітря, погодні умови, акустичні сигнали, відбір проб води, обладнання для моніторингу дна океану та локалізація об'єктів), залишаючись непоміченими для потенційного супротивника. Конкретні можливості БПА включають постійний моніторинг прибережної зони, моніторинг гавані або порту, виявлення та локалізацію хімічних, біологічних, ядерних, радіологічних, вибухових речовин, розміщення датчиків спостереження, оцінку бойових пошкоджень, вказівку активних цілей тощо. В оперативному плані БПА може запускатися із платформи, підводного човна, надводного корабля або навіть літака чи берегового об'єкта, після запуску БПА прямує до призначеної зони виконання завдання. Після досягнення необхідної зони виконання місії БПА

приступає безпосередньо до виконання поставленого завдання, збираючи необхідну інформацію протягом певного часу чи заздалегідь визначеного періоду часу. БПА автономно змінює своє положення, коли це необхідно, як для збору додаткової інформації, так і для уникнення загроз чи перешкод.

Важливими та критичними є технологічні та інженерні питання та проблеми, що стосуються можливостей завдань розвідки, спостереження та рекогносцирувального дослідження із БПА, пов'язані з потребою у великих транзитних відстанях, довгому часі перебування у заданій точці, таємних операціях, зменшенні сигнатур, безвідмовній поведінці БПА, стабільності функціонування обладнання БПА та розширеній автономній роботі.

7. Протимінні заходи

Протимінні заходи – одне із найпроблемніших завдань, із яким стикається БПА. Різноманітність типів мін та їх використання на різних глибинах або «розумних мін», які здатні самостійно змінювати глибину, вимагає від БПА стабільності керування та позиціонування, точності визначення міни, її типу та визначення її функціоналу, а також забезпечення БПА спеціальним точним обладнанням для проведення де-активації заряджених снарядів.

8. Протичовнова війна

9. Критичний удар за часом.

Підводячи підсумок, можна сказати, що застосування БПА є таким же ефективним як і застосування літаків та безпілотної літальної техніки.

Перелічені та наведені завдання, які здатен виконувати БПА, були сформовані ще у кінці 1970х початку 1980х років. Починаючи із цього періоду часу були сформовані концепти та ідеї безпілотної підводної апарату та була утворена і розроблена класифікація БПА, яка використовується в усьому світі.

БПА класифікуються за такими ознаками [1-3]:

1. За способом керування:

- Телекеровані БПА;
- Автономні БПА.

2. За габаритно-ваговими характеристиками:

- Мікро - маса становить до 5 кілограмів;
- Міні - від 5 до 100 кілограмів;
- Малі - від 100 до 500 кілограмів;
- Середні - від 500 до 1000 кілограмів;
- Великі - від 1000 кілограмів.

3. За способом руху у підводному середовищі:

- Дрейфуючі – рух відбувається під впливом підводних течій;
- Самохідні – мають власний двигун;
- Ґрунтові – переміщаються під водою по дну;
- Буксирувальні (прив'язні) – зв'язані із судном-носієм та рухаються слідом за

цим судном.

Сучасна тенденція використання БПА все рідше потребує застосування телекерованих безпілотних підводних апаратів. Зниження використання ТБПА обумовлене його недоліками: з'єднання із судном-носієм спеціальним кабелем чи тросом, по якому передається живлення і здійснюється зв'язок та інформаційний обмін. Як наслідок, кабель обмежує глибину занурення, радіус дії апарата і обмежує маневреність та здатність виконувати завдання у складному рельєфі. В основному ТБПА використовуються для проведення пошукових, аварійно-рятувальних, оглядових роботах [1-6].

У зв'язку із тим, що сучасна практика застосування БПА вимагає виконання різнопланових та комбінованих завдань в автоматичному режимі та на значній глибині і на значному віддалені, все частіше починають застосовуватися автономні безпілотні підводні апарати (АБПА), які здатні автоматично виконувати поставлені завдання. Також у таких апаратах присутня функція дистанційного керування для перехоплення керування та збереження апарата у небезпечних ситуаціях.

Перевагою АБПА є:

- Відсутність людини оператора та надводного стаціонарного пункту керування і кабель-троса;
- Маневреність (гідроабатика);

- Відносно малі габарити, що забезпечує скритність функціонування;
- Необмеженість радіусу дії;
- Багатофункціональність;
- Автоматичне та інтелектуальне керування із інтелектуальною підтримкою руху.

До переваг також відноситься низка економічних аспектів, які впливають на забезпечення роботи та функціонування АБПА у порівнянні із забезпеченням функціонування ТБПА.

1.2 Стан розвитку автономних безпілотних підводних апаратів

Активний розвиток морської робототехніки за напрямком автономних безпілотних підводних апаратів почався приблизно з 1990 років у Канаді, Норвегії, Сполучених Штатах Америки та Японії. Світові країни, особливо ті, які мали вихід у світові води та розвинене морське сполучення, активно розвивали напрямок підводної морської робототехніки [2]. За останнє десятиліття західними країнами було розроблено та сконструйовано значну кількість АБПА [3-9]. Окрім безпілотних підводних апаратів було сформовано, розроблено та вдосконалено спеціальні засоби зв'язку та навігації апарата у водному та підводному середовищах [10]. Морська робототехніка надала поштовх для розвитку таких галузей як: суднобудування, приладобудування та електроніка, автоматизація та комп'ютерно-інтегровані і обчислювальні технології, які широко застосовуються як і у приладобудуванні, так і у машинобудуванні. Загалом в галузі розробки та створення АБПА співпрацює та взаємодіє значна кількість різних корпорацій та фірм. У США задіяно понад 36, об'єднаних міністерством оборони США через військово-морські сили та управління DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), в Японії – понад 250 фірм. До числа провідних досягнень із відпрацювання технологій розробки та створення перспективних АБПА можна віднести наступні апарати: UUV XP-21 Sea Squirt (США), SOLO-TREC (JPL, США), REMUS 100, 600, 1500, 3000 та 6000 (Норвегія та США, цифра означає

максимальну глибину занурення), DOLPHIN, DOGGIE (Великобританія), Talisman (BAE Systems, Великобританія), RTV-KAM (Японія), ARUS (Європейський консорціум) [2].

В Україні наукова школа та дослідження безпілотних підводних апаратів з'явилися в 1988 році, коли було організовано «Відділення глибоководних технічних систем» науково-дослідної частини Національного Університету Кораблебудування ім. адмірала С.Й. Макарова (бувшого Миколаївського кораблебудівного інституту (МКІ) ім. адмірала С.Й. Макарова). Цією науковою школою було закладено основні напрямки досліджень у галузі морської робототехніки та побудована низка унікальних безпілотних підводних апаратів – «Акватор», «Скарус-1», «Дельта», «Adeline» та ін. [11-13].

За останні 30 років в Україні було розроблено та збудовано низку підводних апаратів [13]. В основному, значна увага приділялася телекерованим апаратам [11-13].

Однак сучасні запити та вимоги, які висуваються до БПА, вимагають, перш за все, високого рівня автономності, багатофункціональності та маневреності, точності керування та точності орієнтування і визначення свого положення та місцезнаходження у просторі [13-15].

Автономні безпілотні підводні апарати (АБПА) – це програмовані, адаптивні та незалежні підводні апарати. Перевагою АБПА перед ТБПА є відсутність залежності від судна-носія, значний радіус дії та функціонування, малий час розгортання та підготовки до роботи, збір даних в безпосередній близькості до об'єкту дослідження.

Автономні безпілотні підводні апарати, за конструктивною формою, поділяються на такі класи [3,16]:

- Підводні глайдери (класична гідродинамічна форма)

Торпедоподібна конструктивна форма, яка може трансформуватися у циліндричну, каплеподібну, сигароподібну та пласку або може бути комбінованою. Керування здійснюється шляхом зміни положення рульових (гідродинамічних)

поверхонь. Занурення відбувається шляхом зміни залишкової плавучості та керуванням відповідних гідродинамічних поверхонь.

- Гвинтові АБПА

Подібні до підводних глайдерів, однак відсутні гідродинамічні поверхні. Керування здійснюється за допомогою попарно розташованих рушіїв. Занурення може відбуватися шляхом зміни залишкової плавучості або за допомогою вертикально розташованих рушіїв або комбінованим способом.

- Біонічні АБПА

Базуються на використанні біологічних форм, які існують у водному середовищі. Найчастіше такі апарати просто копіюють якусь із біологічних форм, наприклад морський скат *Mobula birostris*.

- Апарати комбінованої форми

Такі апарати можуть мати одну частину корпусу, наприклад, циліндричної форми, а іншу частину корпусу пласку (наприклад для розташування сонячних панелей).

Основними системами функціонування АБПА є системи керування, орієнтації та навігації, системи зв'язку та системи забезпечення автономної роботи. Зазвичай, АБПА працюють по закладеній програмі – рух апарата до точки призначення, безпосереднє виконання завдання та повернення до вихідної точки. У більшості випадків апарати, які працюють у автономному режимі та по закладеній програмі, приймають команди і передають інформацію за допомогою гідроакустичних систем. Більшість навігаційних систем АБПА теж побудовані на принципах гідроакустики, які доповнюються інтегральною бортовою навігаційною системою, що надає змогу відстежувати траєкторію руху апарата в реальному часі. Розвиток електронної та комп'ютерної галузей сприяє поліпшенню та удосконаленню бортового обладнання АБПА, що у свою чергу призводить до збільшення вимог щодо забезпечення більшої тривалості автономної роботи та функціонування АБПА. Тривала автономна робота АБПА досягається шляхом зменшення енерговитрат бортових систем при сталих основних функціональних можливостях

систем, а у деяких випадках функціональні можливості систем можуть бути покращені разом зі зменшенням енергоспоживання.

Доцільно розглянути різні типи АБПА, які розроблюються та виготовляються, і проаналізувати їхню конструкцію та складові систем управління, орієнтації та навігації і зв'язку [5,6,17-39]:

- АБПА класу Мікро

- ***The DFKI μ AUV***: конструкція: гвинтовий тип; розмір: 270x70x70 мм; вага: 1,2 кг; енергоживлення: Акумулятор Li-Po 11,2V 4000 мАгод; керування: три рушії Maxon RE 10 DC Motors (1.5W, 6V), маршовий двигун Maxon Amax 16 DC Motor 6V; датчики: однокорпусний блок IBM: із трьома ортогонально розташованими гіроскопами, акселерометрами, магнітометрами, датчик тиску, датчик обертів двигуна; зв'язок: оптичний зв'язок через "optical IrDA": рівень протоколу IrDA, що використовує для передачі видиме світло; глибина занурення: 10 м.

- ***ecoSUB μ 5 - 500 m rated Micro-AUV***: конструкція: торпедоподібна із відсутніми рульовими поверхнями; розмір: довжина 925 мм (включно із антеною) 660 мм (корпус), діаметр 111 мм; вага у повітрі: 4,0 кг із батареями; датчики: GPS, маяки інфрачервоного та видимого спектрів, ультразвуковий вимірювач висоти (глибини) ECHO Altimeter; зв'язок: Iridium SBD, WiFi, Акустичний модуль (опціонально); керування: підрулюючі водні помпи; швидкість: 1 м/с; діапазон роботи: 40 км; глибина занурення 500 м; час функціонування: до 12 год, 10 год без корисного навантаження у воді температури 3,5°C.

- ***SEABER YUCO Micro-AUV***: конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина 1000 мм, діаметр 120 мм, висота 183 мм; вага у повітрі: 8,0 кг; датчики: GPS, маяки інфрачервоного та видимого спектрів, ультразвуковий вимірювач висоти ECHO Altimeter; зв'язок: Iridium SBD, WiFi, Акустичний модуль (опціонально); керування: 3 рульові поверхні (плавні); швидкість: 1,25 - 3 м/с; діапазон роботи: 20 км; глибина занурення: 300 м; час функціонування: від 6 до 10 год.

- ***RTsys NemoSens***: конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина <900 мм, діаметр 124 мм; вага у повітрі: <9,0 кг із батареями та із корисним навантаженням; зв'язок та навігація: Акустичний модуль, GPS, інерціальна навігаційна система (INS); системна архітектура: Відкритий LINUX (MOOS – ROS support); керування: 3 рульові поверхні (плавні); швидкість: 1 - 4 м/с; діапазон роботи: 40 км; глибина занурення: 300 м; температура функціонування: -5°C до +40°C; час функціонування: до 12 год, 10 год без корисного навантаження у воді температури 3,5°C.

- **АБПА класу Міні**

- ***SEABER YUCO-SCAN***: конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина 980 мм, діаметр 120 мм, висота 190 мм; вага у повітрі: 10,5 кг; зв'язок та навігація: GPS, інерціальна навігаційна система (INS), акустичні датчики, Допплерівський вимірювач швидкості, SEACOMM; керування: 3 рульові поверхні (плавні); швидкість: 1 – 3 м/с; діапазон роботи: 10 км; глибина занурення: 300 м; температура функціонування: 0°C до +50°C; час функціонування: 6 год.

- ***RTsys MAN PORTABLE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE COMET-300***: конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина 1700-2500 мм (у залежності від сенсорів та антен), діаметр 150 мм, висота 332 мм; вага у повітрі: 27,0-40 кг (32,0 кг номінальна) залежить від батарей та корисного навантаження); зв'язок та навігація: GPS, інерціальна навігаційна система (INS), Допплерівський вимірювач швидкості, магнітометр (опціонально); системна архітектура: відкритий LINUX (MOOS – ROS support); керування: 4 рульові поверхні (плавні); швидкість: 1 - 4 м/с; діапазон роботи: 40 км; глибина занурення: 300 м; температура функціонування: 0°C до +50°C; час функціонування: до 20 год.

- ***RTsys SEMA Underwater ASW Training Target (UUV for anti-submarine warfare training)***: конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина 2130 мм, діаметр 150 мм, висота 285 мм; вага у повітрі: 33,0 кг; зв'язок та навігація: GPS, інерціальна навігаційна система (INS), акустичні датчики,

Допплерівський вимірювач швидкості + датчик тиску, UHF антена дистанційного керування для повернення; частота роботи: 6 смуг від 200 Гц до 38 кГц; керування: 4 рульові поверхні (плавні); швидкість: 2 – 7,5 м/с; діапазон роботи: 40 км; глибина занурення: 300 м; температура функціонування: 0°C до +50°C; час функціонування: до 10 год при швидкості 2 м/с, 1,5 год при швидкості 7,5 м/с.

- **АБПА серії REMUS 100 (B, E, M):** конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина 1850 мм, діаметр 190 мм; вага у повітрі: 38,6 кг; зв'язок та навігація: WHOI мікромодем 2.0 високої частоти (20-30 kHz) акустичної комунікації, 2.4 GHz WiFi, Iridium (опціонально), iXblue Phins C3 інерціальна навігаційна система (ІНС), комерційний GPS компанії Garmin, система акустичного позиціонування з довгою базовою лінією (LBL), Допплерівський лаг швидкості із функцією обчислення шляху, Допплерівський лаг Teledyne 300 kHz із фазованою решіткою; антена: GPS, WiFi, Iridium, світлодіодні індикатори статусу, пробіскові маячки світлового та інфрачервоного спектрів; керування: 4 рульові поверхні (плавні); швидкість: 0 – 2,3 м/с; діапазон роботи: 50-67 км; глибина занурення: 100 м; додаткові датчики: YSI датчик провідності та температури (СТ); TE Connectivity датчик глибини; час функціонування: до 10 год при швидкості 2 м/с, 1,5 год при швидкості 7,5 м/с.

- **BAE Systems Talisman L:** конструкція: комбінована форма; розміри: довжина 1400 мм, ширина 2500 мм, висота 1100 мм; вага 50 кг; зв'язок та навігація: WHOI мікромодем 2.0 високої частоти (20-30 kHz) акустичної комунікації, Комерційний GPS компанії Garmin, Допплерівський лаг швидкості із функцією обчислення шляху, Допплерівський лаг Teledyne 300 kHz із фазованою решіткою; антена: GPS, WiFi, Iridium, інфрачервоний та видимий спектр пробіскових маячків; керування: рушіями; швидкість: 0 – 2,5 м/с; діапазон роботи: 20 км; глибина занурення: 300 м; час функціонування: до 10 год.

- **SPARUS II AUV:** конструкція: торпедоподібний модульний корпус із відсутніми рульовими поверхнями; розмір: довжина 1600 мм, діаметр 230 мм, ширина 460 мм; вага у повітрі: 52 кг; живлення: 1,9 кВтГод Лі-Іон батарейна система; зв'язок та навігація: вай-фай та Ethernet канал, інерційний вимірювальний

модуль (IBM), Допплерівський лаг швидкості (DVL), датчик тиску та GPS; архітектура програмного забезпечення: ROS over Linux Ubuntu; керування: 3 рушія, які забезпечують рух та обертання по диференту та курсу, обертання по крену відсутнє; швидкість 0 – 1,5 м/с; глибина занурення: 200 м; час функціонування: від 8 до 10 годин у залежності від конфігурації.

- **Teledyne Webb Research (TWR) Slocum glider**: конструкція: глайдер (торпедоподібна форма із двома рульовими поверхнями у центрі); розміри: довжина 1500 мм, діаметр 220 мм; вага 55 – 70 кг; енергоживлення: акумулятори Alkaline (A)/Rechargeable (Li)/Lithium (L); зв'язок та навігація: радіочастотний модем, Iridium (RUDICS), ARGOS, акустичний модем, GPS, датчик тиску, висотомір, числення шляху; антена: GPS, WiFi, Iridium, світлодіодні індикатори статусу, пробіскові маячки світлового та інфрачервоного спектрів; керування: рульові поверхні та маршовий рушій; швидкість: 0,35 – 1,0 м/с; діапазон роботи: 350 – 13000 км; глибина занурення: до 1000 м; час функціонування: до 18 місяців.

- АБПА класу Малі

- **SeaWolf (A) (ATLAS MARIDAN)**: конструкція: торпедоподібна форма; розміри: довжина 2000 мм, діаметр 500 мм (макс); вага 110 кг; зв'язок та навігація: ІНС, Допплерівський лаг швидкості, GPS у диференційному режимі, датчик тиску, компас (опціонально система локалізації та відображення позиції (CML)), додаткова система уникнення перешкод, акустична система зв'язку; керування: Х-подібне розташування рульових поверхонь та 4 маршові рушії; радіус розвороту <3 м; швидкість: 0 – 4 м/с; діапазон роботи: 10 км; глибина занурення: 300 м; час функціонування: 3 години при швидкості 2 м/с.

- **Bluefin-12S (Bluefin Robotics/General Dynamics Mission Systems)**: конструкція: торпедоподібна, без рульових поверхонь; розміри: довжина 3770 мм, діаметр 320 мм, висота 700 мм; вага: 250 кг; зв'язок та навігація: бортовий протокол Ethernet, Wi-Fi, Iridium, акустичний модем, GPS із точністю позиціонування у реальному часі $\leq 0.3\%$, інерціальна навігаційна система, Допплерівський лаг швидкості; антена: інтегрована у модуль GPS, Wi-Fi та Iridium із пробісковим

маячком; керування: рушій із системою зміни геометрії положення; швидкість: 0 – 3 м/с; діапазон роботи: 40 км; глибина занурення: 200 м; час функціонування: 36 год при швидкості 1,5 м/с, 24 години при швидкості 1 м/с.

- ***Caribou Odyssey III (Bluefin Robotics/MIT AUV Laboratory)***: конструкція: торпедоподібна (відсутні рульові поверхні); розміри: довжина 3450 мм, діаметр 580 мм; вага: 400 кг; зв'язок та навігація: Iridium, акустичний модем, GPS, інерціальна навігаційна система, Доплерівський лаг швидкості; антена: інтегрована у модуль GPS, Wi-Fi та Iridium із проблісковим маячком; керування: рушій із системою зміни геометрії положення; швидкість: 0 – 2,1 м/с; діапазон роботи: 72 км; глибина занурення: 3000 м; час функціонування: 20 год.

- ***АБПА серії REMUS 620***: конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина 5600 мм, діаметр 324 мм; вага у повітрі: від 210 кг до 411 кг (в залежності від конфігурації та корисного навантаження); батарея: три опції для батарей: 1х9,6 кВтГод, 2х19,3 кВтГод, 3х28,9 кВтГод – для кожної конфігурації; зв'язок та навігація: акустичний мікромодем низької частоти WHOI (8-16 kHz), антена зв'язку WiFi 2.4 GHz, інерціальна навігаційна система iXblue Phins C7; Доплерівський лаг швидкості Teledyne RDI 300 kHz із фазованою решіткою та розширеним діапазоном трекінга (<475м), комерційний GPS L1/L2; система акустичного позиціонування з довгою базовою лінією (LBL); система акустичного позиціонування з довгою базовою лінією (LBL), Доплерівський лаг швидкості із функцією обчислення шляху, Доплерівський лаг Teledyne 300 kHz із фазованою решіткою; антена: GPS, WiFi, Iridium, світлодіодні індикатори статусу, пробліскові маячки світлового та інфрачервоного спектрів; керування: 3 рульові поверхні (плавні), які незалежно забезпечують керування по кутах курсу, диференту та крену; швидкість: 0 – 4 м/с; діапазон роботи: 130 – 509 км; глибина занурення: 600 м; додаткові датчики: YSI (CT) датчик вологості та температури; TE Connectivity датчик глибини; час функціонування: від 26 годин до 110 годин у залежності від корисного навантаження.

- **АБПА класу Середні**

- **АБПА Kongsberg Maritime серії HUGIN (1000, 3000, 4500):** конструкція: торпедоподібна; розмір: довжина 4700 – 6000 мм, діаметр 750 – 1000 мм; вага: 850 – 1900 кг; енергоживлення: тискостійка літій-полімерна батарея 1 шт. або 2 блоки потужністю 24 кВтГод; зв'язок та навігація: cNODE акустичні команди та модуль зв'язку, Wi-Fi, Iridium, UHF радіомодуль, Kongsberg NavP автоматизована інерціальна навігаційна система (AINS) із модулем IBM Honeywell HG9900 (with RLG), International Hydrographic Organization (IHO) compliant, акустичне позиціонування із використанням cNODE та HiPAP (опціонально), Novatel GPS, напрямлений сонар із розширеною мапою перешкод та уникненням зіткнень, 300 кГц Допплерівський лаг швидкості, кварцовий датчик глибини (Paroscientific Digiquartz Depth Sensor), система підводного позиціонування; керування: «плюс»-подібні рульові поверхні із маршовим рушієм; швидкість 0 – 1,54 м/с; діапазон роботи: 66,5 – 166,3 км; глибина занурення: 3000 – 6000 м; час функціонування: від 24 до 60 годин (в залежності від серії).

- **АБПА серії REMUS 6000:** конструкція: торпедоподібна із рульовими поверхнями; розмір: довжина 5200 мм, діаметр 800 мм; вага у повітрі: 1630 кг; батарея: 3x5.85 кВтГод swappable lithium-ion battery; зв'язок та навігація: WHOI мікромодем акустичної комунікації, WiFi, Iridium, Commercial GPS, Long Baseline (LBL); doppler-assisted dead reckoning; Inertial Navigation System (INS); terrain following, Сонар із синтетичною апертурою (SAS); антена: GPS, WiFi, Iridium (customer must provide SIM card); керування: 4 рульові поверхні (плавні), які незалежно забезпечують керування по кутах курсу, диференту та крену; швидкість: 0 – 2,1 м/с; діапазон роботи: 90,7 км; глибина занурення: 6000 м; додаткові датчики: Допплерівський лаг швидкості (DVL); датчик температури; датчик тиску; індикатор звукової швидкості; Ultra-short baseline (USBL) options; час функціонування: до 25 год при швидкості 1,5 м/с.

- **Autonomous Underwater Vehicle : OKPO-300 (Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.):** конструкція: торпедоподібна із статичними плавнями; розмір: довжина 3800 мм, діаметр 700 мм; вага у повітрі: 950 кг; батарея:

високоєфективна перезаряджувана срібно-цинкова (Ag-Zn) батарея; зв'язок та навігація: запрограмована система руху на бортовому комп'ютері, ехолот для уникнення перешкод, датчик глибини із похибкою $\pm 0,02$ м, датчик висоти із похибкою утримання висоти $\pm 0,01$ м, компас Fluxgate Compass із точністю витримки азимута становить $\pm 0,75^\circ$, акустичний пристрій позиціонування на LBL; керування: чотири рушійні гвинти встановлені під кутом; швидкість: 0 – 1,5 м/с; діапазон роботи: 27 – 30 км; глибина занурення: 6000 м; час функціонування: від 10 до 15 годин.

- ***Long Term Mine Reconnaissance System [LMRS] (Boeing Defense, Space & Security)***: конструкція: торпедоподібна без плавнів та рульових поверхонь; розмір: довжина 6000 мм, діаметр 530 мм; вага у повітрі: 1244 кг; зв'язок та навігація: запрограмована система руху на бортовому комп'ютері, ехолот для уникнення перешкод, датчик глибини, датчик висоти, акустичний пристрій позиціонування на LBL, акустична система зв'язку та трекінга; керування: маршовий рушій та 4 рульові гідродинамічні поверхні; швидкість: 0 – 3,5 м/с; діапазон роботи: 27 – 30 км; глибина занурення: 1000 м; час функціонування: 60 годин.

- ***Explorer AUV (npomomun ARCS, International Submarine Engineering)***: конструкція: торпедоподібна із передніми крильцями; розмір: довжина 4500 – 7500 мм (у залежності від батарей та корисного навантаження), діаметр 740 мм; вага у повітрі: 620 – 1700 кг (у залежності від батарей та корисного навантаження); батарея: Lithium Ion 18 – 48 кВтГод (у залежності від батарей та корисного навантаження); зв'язок та навігація: ІНС iXblue PHINS, Допплерівський лаг швидкості Teledyne RDI Workhorse Navigator, датчик глибини, система огинання перешкод та мапа рельєфу дна, GPS у диференційному режимі, акустична комунікація Sercel MATS 3G, радіохвильова надводна комунікація та супутникова IRIDIUM, акустична система позиціонування iXblue USBL або SLBL system; керування: три рульові поверхні та дві підрулюючі поверхні центрального розташування; швидкість: 0,5 – 2,5 м/с; діапазон роботи: 120 – 450 км; глибина функціонування: 3000 – 6000 м; максимальний кут занурення: більше 45° ; час функціонування: 24 – 85 годин.

- **АБПА класу Великі**

- ***Autosub6000 (National Oceanography Centre)***: конструкція: торпедоподібна із чотирма рульовими поверхнями та додатковими крильцями; розмір: довжина 5500 мм, діаметр 900 мм; вага у повітрі: 2000 кг; зв'язок та навігація: датчик глибини, гіроазимутгоризонт, акустична система профілювання дна, Iridium, Wi-Fi, Nortek DVL500s; керування: 4 рухомі рульові поверхні та маршовий рушій; швидкість: 0 – 1,0 м/с; діапазон роботи: 126 км; глибина занурення: 6000 м; час функціонування: 70 годин.

- ***Echo Ranger (Boeing Defense, Space & Security)***: конструкція: прямокутна із Х-подібним розташуванням рульових поверхонь; розмір: довжина 5500 мм, діаметр 900 мм; вага у повітрі: 2000 кг; зв'язок та навігація: датчик глибини, гіроазимутгоризонт, акустична система профілювання дна, Iridium, Wi-Fi, Nortek DVL500s; керування: 4 рухомі рульові поверхні та маршовий рушій; швидкість: 0 – 1,0 м/с; діапазон роботи: 126 км; глибина занурення: 6000 м; час функціонування: 70 годин.

- ***Semi-Autonomous Underwater Vehicle for Intervention Missions (SAUVIM) (Marine Autonomous Systems Engineering)***: конструкція: комбінована із 4 вертикальними, 2 повздовжніми та 2 горизонтальними рушіями та одним плавником (стабілізатором напрямку); розмір: довжина 6100 мм, ширина 2100 мм, висота 1800 мм; вага у повітрі: 6500 кг; зв'язок та навігація: DGPS sensor, DVL, датчик глибини, PHINS інерціальна навігаційна система (розроблена на волоконо-оптичних гіроскопах), сонар DIDSON, сонар IMAGENEX, акустичний сонар на частоті 375 кГц, ультразвуковий датчик руху xSense; керування: 4 вертикальні, 2 повздовжні та 2 горизонтальні рушії; швидкість: 0 – 5,0 м/с; діапазон роботи: 180 км; глибина занурення: 4000 м; час функціонування: 20 годин.

- ***Theseus (International Submarine Engineering)***: конструкція: торпедо подібна із додатковими крильцями; розмір: довжина 10700 мм, діаметр 1270 мм; вага у повітрі: 8600 кг; батареї: 600 kWh Lithium Ion Battery; зв'язок та навігація: інерційно-навігаційний блок (inertial navigation unit), доплерівський лаг

швидкості, низькочастотний акустичний модуль, система уникнення перешкод: Marine Electronics 6201; навігаційна точність: $<0,08\%$ від дистанції маршрута; керування: 6 HP brushless DC моторів та маршовий пропелерний рушій із редуктором, рульові поверхні Х-подібного розташування; швидкість: 0 – 2,0 м/с; діапазон роботи: >1360 км; глибина занурення: 1000 м; час функціонування: 60 годин.

- ***The Deep and Ultra-Deep sub-sea gliders (Bringing together Research and Industry for the Development of Glider Environmental Services (BRIDGES))***: конструкція: глайдер оживального типу; розмір: довжина 10000 мм, ширина 4000 мм, висота 2000 мм; вага у повітрі: 9000 кг; батареї: 600 кВт літій-іонна батарея; зв'язок та навігація: доплерівський лаг швидкості, низькочастотний акустичний модуль, система уникнення перешкод, ехолот, супутниковий зв'язок (Iridium); керування: 4 безколекторні мотори Х-подібного розташування у носовій частині та маршовий пропелерний рушій із редуктором; швидкість: 0 – 2,0 м/с; діапазон роботи: 1200 км; глибина занурення: від 2400 до 5000 м; час функціонування: 60 годин.

- ***Manta Test Vehicle (Naval Undersea Warfare Center Division Newport)***: конструкція: глайдер оживального типу; розмір: довжина 10440 мм, ширина 4720 мм, висота 1800 мм; вага у повітрі: 14060 кг; батареї: 600 кВт літій-іонна батарея; зв'язок та навігація: доплерівський лаг швидкості, низькочастотний акустичний модуль, система уникнення перешкод, ехолот, супутниковий зв'язок (Iridium); керування: маршовий пропелерний рушій із редуктором та Т-подібне розташування стернових поверхонь керування; швидкість: 0 – 5,0 м/с; діапазон роботи: 100 км; глибина занурення: 243 м; час функціонування: 4 години.

Наведені апарати, у переважній більшості, мають конструкцію підводного глайдера торпедоподібної форми. Система керування наведених апаратів, у більшості випадків, складається із рульових поверхонь з «+»подібним або Х-подібним розташуванням. Безпосередньо саме керування може відбуватися дистанційно як за допомоги акустичного модема так і радіохвильовим каналом,

якщо глибина не більше ніж 10 метрів, для глибини більше ніж 10 метрів застосовуються більш потужні передавачі на наземній та бортовій станціях. Система орієнтації та навігації у більшості випадках – супутникова система (GPS, Iridium) яка може бути доповнена системою числення шляху (Dead reckoning) та додатковими датчиками навігаційного типу. До навігаційної системи та навігаційних датчиків у більшості апаратів входить ехолот – для визначення та подальшого утримання глибини, барометричний датчик висоти, доплерівський лаг швидкості та акустичні сонари, які запобігають зіткненню із перешкодами. У деяких апаратів, які розглядаються, на борту встановлено інерціальну навігаційну систему (ІНС) – така система зазвичай складається із класичних навігаційних приладів (маятникові акселерометри та електромеханічні датчики кутової швидкості або волоконно-оптичні гіроскопи), а сама ІНС працює лише за алгоритмом гіроазимутгоризонта (курсовертикалі) [15]. Повноцінну інерціальну навігаційну систему мають лише низка апаратів, які призначені до виконання широкого спектру завдань, який наведено у п. 1.1. Система зв'язку – у більшості випадках акустична, інколи радіохвильова, яка застосовується лише на глибинах до 10 метрів. У якості системи зв'язку також використовується система супутникового зв'язку - Iridium.

В усіх наведених апаратах, крім апаратів «іграшкового типу», які можна віднести до класу Міні АБПА, відсутні застосування або згадка про застосування системи орієнтації та навігації, які побудовані на основі мікроелектромеханічних систем та технологій (MEMS). Перевага ІНС на MEMS технологіях перед класичними системами полягає у низькому енергоспоживанні та малих габаритах.

Враховуючи розвиток MEMS технологій, сучасної елементної бази та алгоритмічного забезпечення, доцільним буде провести огляд та оцінити стан розвитку систем керування, орієнтації та навігації, зв'язку, які використовують як класичні методи, так і MEMS датчики, та провести аналіз щодо використання і впровадження у конструкцію та функціонал АБПА систем на MEMS технологіях.

1.3 Загальна характеристика та тенденції розвитку систем керування, орієнтації та навігації автономних безпілотних підводних апаратів

Аналіз наведених у п. 1.2 автономних безпілотних підводних апаратів показує інтенсивний розвиток апаратів як за масо-габаритними, так і за конструктивними характеристиками.

Розвиток систем керування, орієнтації та навігації дещо помірний у порівнянні з їх розвитком для літальних апаратів, особливо розвиток та застосування МЕМС технологій. Такий повільний темп розвитку обумовлений перш за все фізичними процесами орієнтації та навігації у підводному просторі. Процеси орієнтації та навігації у підводному просторі, у загальному випадку, можна розділити на дві основні та одну додаткову категорії [5,15]:

1. Інерціальна навігація/числення шляху

Для обрахунку поточного місцеположення інерціальна навігація використовує сигнали від акселерометрів та гіроскопів, які обробляються тим чи іншим навігаційним алгоритмом, що дозволяє працювати в автономному режимі. Тим не менш, алгоритми методу інерціальної навігації мають необмежене зростання накопичення помилки визначення місцеположення у часі.

2. Акустичні хвилі (транспондери та модеми)

Як відомо, у водному середовищі акустичні хвилі поширюються швидше ніж радіохвилі. Враховуючи таку властивість акустичних хвиль навігація здійснюється шляхом вимірювання часу проходження сигналу від бортового маяка до маяка базової точки. За таким самим принципом можна здійснювати як і керування об'єктом, так і зв'язок.

3. Геофізичний метод

Геофізичний метод використовує інформацію про навколишнє середовище, як орієнтир для навігації. Такий метод реалізується за допомогою оптичних та акустичних датчиків і блоку обробки. У такій системі датчики здатні виявляти, а блок обробки ідентифікувати та класифікувати об'єкти у середовищі та надсилати команди центральному процесору. Центральний процесор, у свою чергу, виконує

навігаційні обрахунки та визначає місцеположення. Недоліком цього методу є необхідність попередньо мати координатну карту місцевості, із якою буде порівнюватися оброблена інформація від датчиків.

Незважаючи на те, що на сьогоднішній день, датчики інерціальної системи навігації мають розвиток у вигляді мікроелектромеханічних систем [40], які реалізовані у вигляді інтегральної мікросхеми – їх застосування у використанні АБПА обмежене. Для апаратів класу Малі, Середні та Великі для довготривалого завдання та місії, як додаткове обладнання, застосовуються класичні датчики (електромеханічні гіроскопи, волоконно-оптичні гіроскопи, маятникові акселерометри). Причиною повільного використання ІНС на основі MEMS технологій, як основної системи орієнтації та навігації, є дослідження та підтверджені результати того, що ІНС на MEMS поступається характеристиками перед «класичними» системами, які використовують акустичні хвилі. Одним із таких досліджень є робота [41], яка наводить порівняльний аналіз застосування інерційно-вимірювального модуля на MEMS із акустичною системою трекінга. У роботі [41] наводиться опис розвитку інерційних систем навігації та застосування MEMS датчиків (акселерометрів та гіроскопів). Автори показують розробку власної курсовертикалі (Attitude and Heading Reference System – AHRS) та наводять акустичну систему, яка буде застосовуватися для порівняння. Обраний тип апарату для якого автори [41] проводять тести – підводний глайдер. Результати, отримані дослідниками в [41] під час дослідження та порівняння систем, свідчать про те, що інтеграція інерційних систем на основі MEMS на даний момент не може бути надійно впровадженою та застосованою для точного визначення координат місцеположення у середовищах. Доповнення матриці оцінки положень та корегування даних ІВМ на MEMS додатковими даними від датчика тиску дещо покращило результати, але визначення місцеположення зазвичай відхилялися від реальних координат на кілометр або більше протягом перших 3 хвилин занурення. Результати [41] також свідчать про те, що ІНС на MEMS здатні ефективно надавати оцінку координатам місцеположення у випадку простого прямолінійного

нешвидкого руху апарата. Також отримані результати свідчать про те, що на даний час акустичні системи дають більш точний результат ніж ІНС на MEMC.

Узагальнюючи, можна виділити тенденцію помірному розвитку використання MEMC технологій у застосуванні для систем керування, орієнтації та навігації автономного безпілотного підводного апарата.

1.4 Огляд виконаних раніше робіт

1.4.1 Загальна характеристика робіт по системам орієнтації та навігації автономних безпілотних підводних апаратів

Як зазначалося у п. 1.3, орієнтація та навігація автономних безпілотних підводних апаратів в основному базуються на одному із двох фундаментальних фізичних принципів: акустичному та інерціальному. Хоча і на сьогодні розвиток та впровадження MEMC технологій у АБПА є помірним – необхідно розуміти, які датчики та алгоритми обробки інформації можуть бути використані у розробці системи орієнтації та навігації на MEMC багатоцільового АБПА зі складною динамікою руху.

Першочерговим завданням є визначення оптимальної методики та системи орієнтації та навігації.

Оглядове дослідження [42] наводить методи та способи підходів до навігації та локалізації АБПА. Автори визначають ключові методи за якими може відбуватися навігація та локалізація апарата під водою. Наводяться переваги та недоліки кожного із методів, а також способи реалізації цих методів. Авторами також проведено порівняльний аналіз методів навігації. Результатами дослідження [42] показано, що досягнення в акустичних комунікаціях дозволили швидко розробити нові алгоритми підводної локалізації. Показано, що акустичний модем реалізує можливість підводної співпраці, а гідролокатори та оптичні датчики, що виконують одночасну локалізацію та картографування (SLAM – simultaneous localization and mapping), можуть досягти точкової обмеженої локалізації апарата. Такою

комбінацією зазвичай покращують існуючі або вже встановлені на борту АБПА гідроакустичні системи.

В дослідженні [15] описується порівняння інтегрованих методик наведення, орієнтації, навігації та керування автономними підводними апаратами спеціального призначення, метою та завданням яких є пошук підводних мін та їх деактивація. Дослідники проводять аналіз та моделювання визначених методик, задаючи відомі та невідомі збурення, які можуть містити як гармонічні складові так і випадкові складові із низькою спектральною щільністю та проводять оцінювання вихідних величин, а також оцінюють те, як кожна із методик визначає необхідні величини у випадку наявності підводних перешкод роль яких відіграють підводні міни.

Класичними способами орієнтації та навігації АБПА є способи, які базуються на використанні акустичних коливань. Таким прикладом може слугувати гідроакустична система орієнтації та навігації, яка представлена у роботі [43]. Принципи гідроакустики добре відомі і широко застосовуються та постійно вдосконалюються, а їх результати аналізуються у комплексі із іншими системами.

Також, одним із способів визначення орієнтації та навігації, який може бути використаний у АБПА, є інерціальний спосіб визначення параметрів руху. Особливу увагу у інерціальних системах орієнтації та навігації приділяється методам та способам визначення напрямку руху та курсового положення. Такі дослідження, як робота [44], розглядають розробку курсової системи. На основі синтезованих алгоритмів і рівнянь будується прототип інтегрованої системи визначення курсу яка тестується на наземному колісному засобі. Інтегрована система складається із гіроскопічного вказівника курсу та магнітного компаса. Комплексування двох видів приладів поєднуються у інтегровану систему, вихідні дані якої оброблюються та оцінюються за допомоги фільтра Калмана. Автори дослідження детально описали розробку прототипу та навели отримані результати під час тестування прототипу. Методи, підходи та отримані результати у роботі [44] можуть бути використані при розробці курсової системи АБПА, оскільки

гіроскопічні вказівники курсу та магнітні компаси широко використовуються для побудови вказівників курсу у морській робототехніці.

Визначення орієнтації та просторового положення АБПА також може бути виконане за допомогою курсовертикалі (AHRS). Варіант побудови курсовертикалі на базі IBM для застосування у АБПА наведено у роботі [45], у якій показано використання класичного алгоритму курсовертикалі із розширеним фільтром Калмана. Результатом дослідження є макетний прототип курсовертикалі, який видає такі дані: кути курсу, крену та диференту та похибки і оцінки цих кутів.

Більш глибоким дослідженням роботи курсовертикалі описано у роботі [46], у якій розглядається нова структура моделювання із використанням розширеного фільтра Калмана (EKF) для оцінки положення, напрямку (курсу) та зміщення нуля гіроскопа системи визначення просторового положення, побудованої на недорогих інерціальних датчиках MEMS. Алгоритм, розроблений для точної оцінки просторового положення та напрямку руху, враховує наявність зовнішніх збурень, включаючи зовнішні прискорення об'єкта та магнітні девіації. У дослідженні [46], на основі системи визначення просторового положення та динамічної моделі руху автономного підводного апарата (АПА), була розроблена дешева модель системи навігації. Ефективність наведеного авторами алгоритму оцінюється за допомогою експериментальних випробувань при різних прискореннях та наявності зовнішніх магнітних збурень для АПА. Результати вимірювання кутів орієнтації оцінюються за середніми похибками. Більше того отримані результати вказують на те, що за допомогою розробленого підходу та під час відключеного GPS, відносна похибка навігації становить 8% від відстані подорожі.

Важливим для АБПА є не тільки визначення свого просторового положення (кути крену, диференту та курсу) та координат місця місцезнаходження (довгота і широта), а також визначення своєї висоти (глибини) відносно рівня моря. Дослідження систем визначення глибини, яке наприклад, описане у роботі [47], показує спосіб проведення дослідження та оцінку використання дешевої системи визначення глибини на основі датчика тиску, призначеного для застосування у безпілотних підводних апаратах. У якості датчика тиску, дослідники в [47]

використовують два типи датчиків: інтегрований п'єзоелектромеханічний датчик абсолютного тиску та барометричний датчик тиску. Результати, отримані від кожного із датчиків, порівнювалися між собою. Досліди проводилися у трьох типах середовища: резервуар із чистою водою, озеро та басейн, для оцінювання того, як впливає густина рідини на показання досліджуваних датчиків. За результатами дослідження було визначено найбільш стійкий і прийнятий для застосування у БПА датчик тиску, та діапазон глибин для кожного з датчиків. Авторами [47], також були розроблені та наведені рекомендації щодо поліпшення застосування барометричних датчиків.

У роботі [48] пропонується метод оцінки просторового положення підводного апарата, який базується на використанні вимірів глибини, а також даних від MEMS-AHRS (курсовертикалі на MEMC елементах). Запропоновано метод, що використовує вимірювання глибини, точність та незбурюваність якого кращі за методи вимірювання за допомогою ІВМ та датчиків магнітного поля. Такий підхід може підвищити ефективність оцінювання просторового положення. Метод використовує кватерніонні рівняння, щоб явно пов'язати глибину із просторовим положенням, включаючи коливання. Метод випробовується та оцінюється з використанням імітаційного моделювання та даних із випробувального резервуару і натурного (морського) експерименту. Результати показують явне поліпшення визначення просторового положення, особливо коли глибина змінюється з часом.

У дослідженні [49] пропонується тест оцінювання характеристик системи визначення просторового положення (AHRS), яка придатна, для невеликих швидкісних автономних підводних апаратів. Автори [49] пропонують використовувати AHRS на базі MEMC технологій, а саме тривісний гіроскоп, тривісний акселерометр та тривісний магнітометр. Алгоритм заснований на рівняннях трансформації координат з подальшим оцінюванням за допомогою фільтра Калмана. Розроблена AHRS перевірялася за допомогою різних тестів оцінки характеристик, таких як калібрування магнітометрів, експлуатаційні експерименти з використанням наземного мобільного автомобіля та імітатора руху польоту (FMS). Тест калібрування магнітометра показав, що розроблена AHRS на

базі MEMC датчиків нечутлива до зміни зовнішнього магнітного поля, а тест на наземному транспортному засобі показав, що похибка вирівнювання розробленої AHRS не перевищує $0,5^\circ/\text{год}$. Результати тесту FMS свідчать, що AHRS забезпечує вимірювання із похибкою $0,5^\circ/\text{год}$ протягом 5 хвилин роботи. Ці результати тестів оцінювання ефективності показали, що запропонована AHRS надає інформацію про похибку визначення кутів крену та диференту не нижче 1° , та похибку визначення кута (напрямку) курсу не нижче 5° , що відповідає встановленим вимогам.

У статті [50] розглядається побудова системи визначення просторового положення (AHRS), яка відповідає вимогам малого габариту та низького енергоспоживання. Автори [50] пропонують розробляти AHRS із використанням MEMC датчиків. Запропонована AHRS адаптована до використання на малих безпілотних підводних апаратах. Результати дослідів, наведених у статті показують, що розроблена AHRS із використанням MEMC може бути використана як основна система визначення просторового положення.

1.4.2 Загальна характеристика робіт по системам керування автономних безпілотних підводних апаратів

Рух підводного апарата залежить не тільки від знання параметрів орієнтації та навігації, а й від системи керування глибиною (плавучістю) та системи керування просторовим положенням (диферент, курс, крен), що характеризується набором певних рухів. Важливими є обчислювальні пристрої (бортові комп'ютери), які обробляють отриману інформацію від системи орієнтації та навігації та видають корисний сигнал до систем керування для зміни апаратом свого просторового положення. Для різних класів АБПА існує своя певна система керування із своїм оптимальним набором рухів, які здійснюють просторову зміну положення апарата та забезпечують найбільш оптимальне керування для виконання поставленого завдання. Тому дослідження елементів керування та способи їх об'єднання також є однією із ключових задач під час розробки АБПА.

Для кожного із класів є певні усталені способи керування [51].

Для класу АБПА типу глайдер – набір гідродинамічних поверхонь, які забезпечують переміщення у вертикальному та горизонтальному напрямках і система баластного змінювання залишкової плавучості [51].

Гвинтовий клас АБПА конструктивно та геометрично подібний до типу глайдер, однак має відмінності по керуванню. Керування таким апаратом забезпечуються попарно розташованими рушіями, які за командами центрального процесора запускаються на той час, який потрібен для зміни просторового положення. Система керування зміни глибини може бути реалізована як у АБПА класу глайдер так і рушіями, які розташовані діаметрально, та здатні виконувати обертання за годинниковою стрілкою та проти годинникової стрілки [51].

Реалізація системи керування залежить від компонентів, які входять до складу системи. Дослідження окремих компонентів [52] може показати певні електричні та електромеханічні характеристики рушіїв, їх здатність до перерегулювання та затримку виконання після надходження інформаційного сигналу. Такі характеристики органів системи керування є важливими для виконання складних рухів, маневрування та стабілізації руху і точного позиціонування АБПА у просторі особливо при постійній дії збурень.

Однак, у більшості випадків керування розглядається як програмний комплекс. Такі програмні комплекси базуються на теорії математичної оптимізації, методах і підходах теорії математичних ігор, а також на теорії побудови систем автоматичного керування із нелінійною динамікою. Наприклад розглядаються застосування методів непрямої адаптивної нечіткої логіки, які можуть бути застосовані для керування безпілотними літальними апаратами, але і можуть бути використані для керування автономними безпілотними підводними апаратами.

У дослідженні [53] наводиться приклад застосування алгоритму нечіткої логіки для побудови контролера та застосування цього контролера для відслідковування та керування позиціонуванням БПЛА. Даний підхід, який розглянуто у дослідженні може бути використаний для побудови контролера та програмного забезпечення керування АБПА.

Важливим є питання керування зануренням (зміни глибини) безпілотного підводного апарата, який зазнає впливу зовнішнього середовища. Такі дослідження, як [54], розглядають поєднання традиційного зворотньокрокового методу з ковзним режимом керування. Керування зміною глибини розглядається, як зворотньокроковий метод із ковзною верхньою границею. Дослідники у роботі [54] беруть за основу рівняння руху апарата у вертикальній площині (тобто зміну висоти), як початковий закон керування. Застосування авторами [54] функції Ляпунова використовується для реалізації зворотньокрокового методу. Аналіз стійкості системи виконується на основі теорії стійкості за Ляпуновим. Результати моделювання показали, що наявність зовнішніх збурень не впливає на досягнення апаратом необхідної глибини, а запропонований метод дозволяє відслідковувати траєкторію зміни глибини.

Схожу стратегію керування у горизонтальній площині досліджували у роботі [55]. Автори роботи [55] досліджували метод адаптивного керування у ковзному режимі із застосуванням граничних шарів для відслідковування траєкторного положення апарата за курсом. У відповідності до запропонованого методу автори [55] розробили адаптивні закони підбору коефіцієнтів керування (підсилювачів) та адаптивний вибір граничних шарів, які базувалися на вхідних та вихідних даних, що дозволило уникнути невизначеностей. Також, для вертикального стерна розглядалася стратегія компенсації насичення, що дозволило зробити поведінку руля напрямку більш реалістичною. Отримані результати були проілюстровані чисельним моделюванням.

Розвиток систем автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та інформаційних систем дав поштовх для застосування технологій штучного інтелекту та нейромереж у задачах формування керування як промислових об'єктів так і рухомих об'єктів. Напрямок інтегрування у процес керування рухомими об'єктами штучного інтелекту та нейромереж активно досліджується, так у роботі [56] наведено дослідження та запропоновано реалізацію стійкої адаптивної самоорганізаційної схеми нейрон-нечіткого контролю (robust adaptive self-organizing neuro-fuzzy control – RASNFC) для детектування безпілотного підводного апарата

з невизначеними параметрами та нелінійними мертвими зонами. Досліджувана та запропонована схема RASNFC містить в собі використання оцінювально-обчислювального адаптивного контролера (estimation-based adaptive controller – EBAC), який використовує само організаційну нейрон-нечітку мережу (self-organizing neuro-fuzzy network – SNFN) і стійкого до зовнішніх впливів контролера. Архітектуру EBAC побудовано із новітнім ковзним режимом для забезпечення необхідного закону керування основи, у якому також забезпечується ідентифікування невідомої динамічної функції за допомогою апроксиматора SNFN, здатного самостійно побудувати нейро-нечітку мережу з динамічною структурою шляхом генерування та обрізання нечіткого правила. Стійкий до зовнішніх впливів контролер використовується, щоб забезпечити властивість кінцевого коефіцієнта підсилення L2, щоб забезпечити безпомилкове відновлення інформації, завдяки чому підвищується стійкість всієї системи керування із замкненим циклом. Теоретичний аналіз та результати роботи [56] свідчать про те, що відстежування похибок є асимптотично стабільними, а всі сигнали у системі замкненого циклу – обмежені.

Також розвивається комбінована універсальна програмна система керування, яка може бути використана як для безпілотного літального апарата, так і для безпілотного підводного апарата. Дослідження такої комбінованої універсальної системи наведено у роботі [57]. Дослідниками [57] представлено моделювання та керування безпілотним транспортним засобом із середнім ступенем здатності виконувати безперебійну роботу в повітрі та/або під водою. Система керування об'єктом розглядається, як гібридна мульти-середня система із постійною динамікою. Неперервна динаміка об'єкта моделюється на основі формалізму Ньютона-Ейлера із урахуванням ефектів плавучості та ефектів опору, які зазвичай нехтуються у дослідженнях як повітряних, так і підводних об'єктів. Система керування [57] базується на використанні гібридного контролера, призначенням якого є відслідковування траєкторії руху об'єкта із урахуванням сигналів повної системи, яка представляє собою гібридну систему замкненого циклу, а також стратегію забезпечення перемикання між повітряним та водним середовищами.

Ефективність такої системи перевіряється моделюванням. Також була розроблена та наведена експериментальна платформа, яка відпрацьовувала роботу системи керування у повітрі, під водою та під час переходу від одного середовища до іншого. Результати роботи комбінованої системи автори дослідження [57] представили у вигляді графіків параметрів телеметрії об'єкта.

Також відмінністю АБПА від інших типів підводних апаратів є можливість виконувати завдання в автоматичному режимі і здійснювати інтелектуальну підтримку руху. У роботі [58] досліджуються алгоритми керування рухом – плоско-паралельним та просторовим переміщеннями АБПА. Розглядаються та наводяться відомості про способи планування траєкторії для відомих статичних перешкод: А*-алгоритм, генетичні алгоритми, диференційна еволюція, алгоритми «мурашиної колонії» та для невідомих перешкод: нейромережі, алгоритми нечіткої логіки, машинне навчання, алгоритми глибокого навчання, алгоритми навчання із підкріпленням. У дослідженні авторами [58] наведено елементи кінематики апарата та розглянуто можливі випадки траєкторій руху апарата. Також у дослідженні [58] розглядаються кожні із наведених алгоритмів побудови та планування траєкторії руху та способи обминання перешкод, які можуть трапитися під час руху апарата у водному просторі. Автори дослідження [58] наводять широкий список використаних джерел, що показує актуальність та інтенсивне дослідження та розробку автономних систем визначення просторового положення та місцезнаходження, а також дослідження та розробку автономної системи керування АБПА.

1.5 Мета і завдання наукового дослідження

Проведений огляд та дослідження робіт, які розглянуті у п. 1.3 та п. 1.4 відповідно за напрямками систем орієнтації та навігації і систем керування автономними безпілотними підводними апаратами, мають вагоме значення для розвитку та вдосконалення існуючих систем та безпілотних підводних апаратів.

Однак, у наведених та розглянутих дослідженнях майже не описується обґрунтування вибору МЕМС датчиків та не наведено аналіз характеристик МЕМС датчиків для використання у системах орієнтації та навігації апаратів класу Міні. Обмеженою кількістю представлені роботи, які присвячені дослідженню властивостей конструкції апарата класу Міні, її переваг та недоліків, та вплив цієї конструкції на гідроабатику об'єкта. Майже не розглядаються роботи, які досліджують канали керування рухом апарату із урахуванням конструкційних характеристик апарата та його гідродинамічних коефіцієнтів.

На основі аналізу проведених досліджень можемо сформулювати мету та завдання наукових досліджень.

Метою дослідження є вдосконалення систем орієнтації, навігації та управління автономних безпілотних підводних апаратів для забезпечення виконання багатоцільових завдань, розширення функціональних можливостей та підвищення характеристик автономного безпілотного підводного апарата класу Міні із застосуванням мікроелектромеханічних систем (МЕМС) та технологій.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань:

- 1) Огляд стану проблеми;
- 2) Чисельне моделювання конструкції об'єкта, аналіз гідроабатичних характеристик апарата, визначення коефіцієнтів сили супротиву та підйимальної сили обраної конструкції апарата;
- 3) Обґрунтування системи орієнтації та навігації автономного безпілотного підводного апарата, розробка імітаційних моделей датчиків, побудованих на МЕМС технологіях, розробка імітаційної моделі інерціальної навігаційної системи, встановлення залежностей параметрів орієнтації та навігації та їх похибок від напрямку руху;
- 4) Розробка та імітаційне моделювання каналів керування автономного безпілотного підводного апарата за зануренням та за кутом курсу із урахуванням коефіцієнтів сили супротиву та конструктивних параметрів апарата;
- 5) Впровадження отриманих результатів.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ОЦІНКА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АПАРАТА

Для успішного виконання та розв’язання завдань дисертаційного дослідження перш за все необхідно визначитися із типом АБПА, на основі його особливостей виконати синтез системи орієнтації та навігації і виконати синтез систем керування.

Перевірку ефективності синтезованих та розроблених системи орієнтації та навігації і системи керування доцільно виконувати шляхом натурного експерименту, попередньо розробивши прототип АБПА та прототипи систем і встановити їх на об’єкт.

Однак, організація та проведення такого натурного експерименту, щодо оцінки ефективності працездатності систем, є складною операцією із трудомісткістю та високою вартістю фінансування.

Виходячи із цих положень – перевірка ефективності буде проводитися шляхом чисельного моделювання та комп’ютерного експерименту. Сутність такого експерименту полягає в тому, що взаємодія АБПА із морським середовищем моделюється віртуально. Також, реалізується чисельна модель середовища яка може відповідати реальному середовищу із досить високою точністю [59,60].

На сьогоднішній день відомо, що чисельний комп’ютерний експеримент надає результати із деяким наближенням, однак вони є дуже близькими до реальних.

У даному розділі будуть проводитися вибір та обґрунтування типу АБПА шляхом чисельного дослідження із застосуванням систем автоматизованого проектування для простого прямолінійного руху та складного маневрового руху. Результати чисельного комп’ютерного експерименту можна використовувати для оцінки та аналізу руху об’єкта при виконанні фігур маневрування, що відобразиться на проведенні оцінки та виборі датчиків та алгоритмів систем орієнтації, навігації та керування.

2.1 Вибір та обґрунтування типу автономного безпілотної підводного апарата

Розробка маневрового багатоцільового автономного підводного апарата є складним науковим та інженерним завданням. Основною складністю досліджень та розробки АБПА є вибір і розробка системи орієнтації та навігації, а також вибір системи керування.

Для кращого розуміння та дослідження об'єкта необхідно визначитися із чітким послідовним планом дій етапів дослідження та розробки. Таку послідовність можна зобразити у вигляді інформаційно-структурної моделі, яку наведено рис. 2.1 [61,62].



Рисунок 2.1 Інформаційно-структурна модель розробки САК АБПА

Початком дослідження АБПА є визначення типу конструкції апарата. Зважаючи на конструктивні особливості проводиться розрахунок гідродинамічних коефіцієнтів. Отримані гідродинамічні коефіцієнти застосовуються для моделювання рівнянь його руху, які описують динаміку руху апарата у водному середовищі.

У відповідності до наведеної у розділі 1 класифікації типів АБПА, найбільш поширеним є тип підводного глайдера та гвинтовий. Підводний глайдер і гвинтовий типи у свою чергу, мають класифікацію за масо-габаритними характеристиками [6,16]. Розглянемо АБПА класу Міні – масою від 20 до 100 кг.

Такі апарати повинні виконувати маневровий автономний рух за складними траєкторіями в умовах нестаціонарності процесів та взаємодії з фізичним середовищем, неповноти інформації щодо контролю зовнішніх впливів, варіації умов та режимів функціонування, складності чи неможливості використання зовнішніх засобів для неперервного оперативного контролю та позиціонування. Тому проектування та розробка таких апаратів потребує всебічного дослідження та вирішення взаємопов'язаних завдань, спрямованих на забезпечення заданої тривалості та безперебійності живлення, автономного точного позиціонування, точного визначення просторового положення, навігації та точного керування рухом, оптимізації масо-габаритних та конструктивних характеристик [60,61,63].

Маневреність таких АБПА забезпечується як безпосередньо системами керування та рушіями, так і конструктивною схемою апарату [60-64]. Підбір, впровадження та використання тих чи інших типів та номенклатури чутливих елементів, перетворюючих та виконавчих пристроїв при проектуванні системи керування, орієнтації та навігації повинно враховувати не тільки алгоритмічне та математичне забезпечення апарата, але і конструктив та динаміку АБПА.

Для подальшого дослідження та побудови систем орієнтації, навігації та керування проведемо, згідно із інформаційно-структурною моделлю, рис 2.1, проведемо дослідження конструкцій АБПА глайдерного та гвинтового типів.

Дослідження буде проводитися за допомогою комп'ютерного моделювання та чисельного дослідження за методикою, наведеною на рис. 2.2. Такий підхід найбільш імітує натурний експеримент та надає можливість оцінити вплив геометричних характеристик на гідродинамічну поведінку об'єкта [59,60,64,66,67].

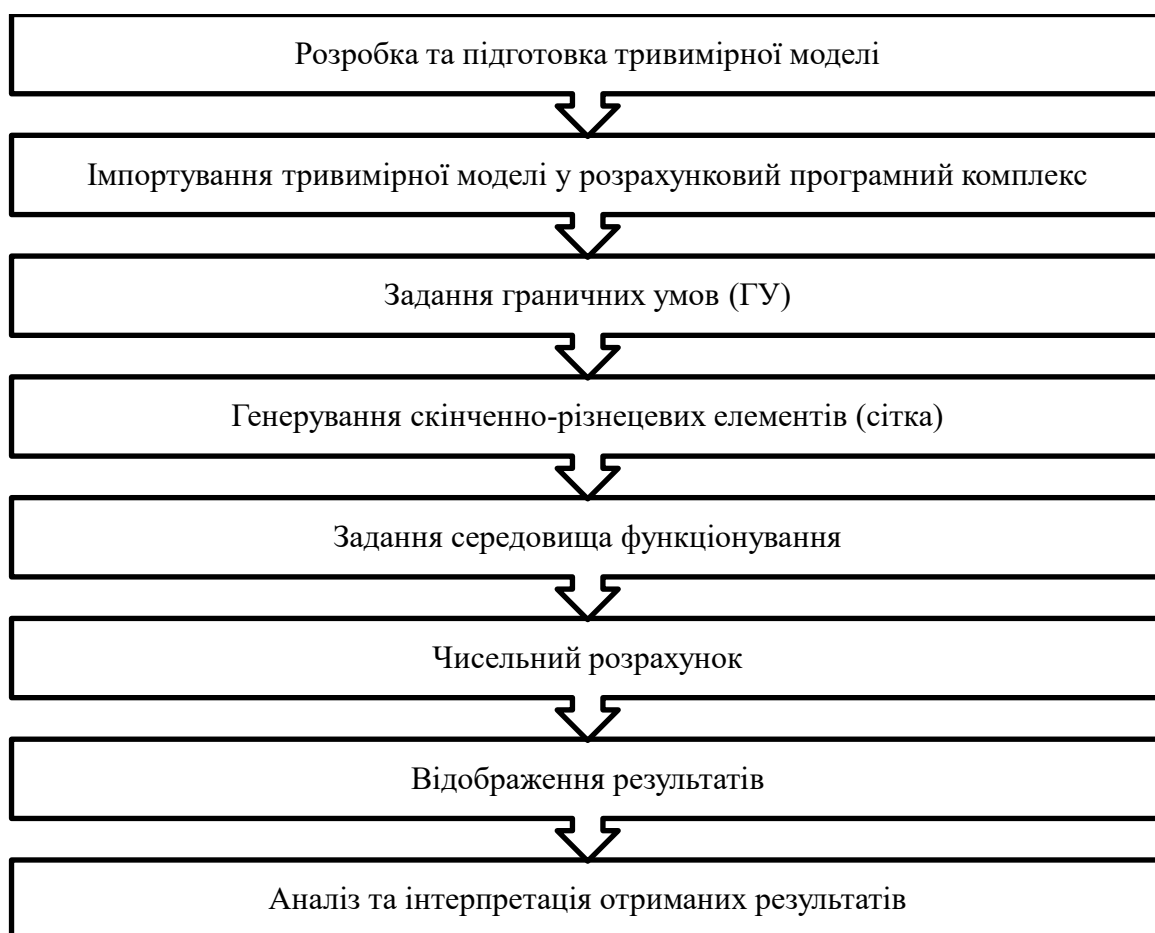


Рисунок 2.2 Методика проведення комп'ютерного моделювання та чисельного дослідження

За допомогою системи автоматизованого проектування комп'ютерного моделювання та візуалізації Solidworks фірми Dassault Systems [65] розроблено 4 моделі АБПА, геометричні характеристики яких наведені у табл. 2.1 [66].

Таблиця 2.1 Геометричні характеристики досліджуваних моделей АБПА

	<i>Модель № 1</i>	<i>Модель № 2</i>	<i>Модель № 3</i>	<i>Модель № 4</i>
<i>Довжина, мм</i>	1000	1000	1000	1000
<i>Діаметр, мм</i>	300	300	240	240
<i>Радіус округлення, мм</i>	291,75	291,75	500	500
<i>Довжина крила, мм</i>	—	100	—	100

Ескізи для побудови досліджуваних моделей АБПА наведено на рис. 2.3 [66].

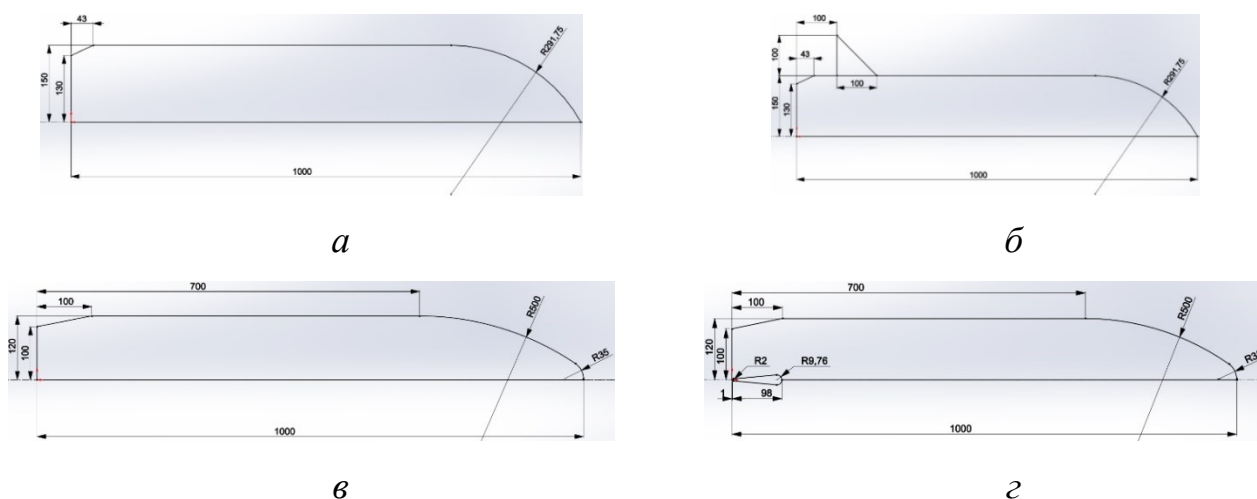


Рисунок 2.3 Ескізи для побудови досліджуваних моделей:
а – модель № 1; *б* – модель № 2; *в* – модель № 3; *г* – модель № 4

Для спрощення розрахунків та дослідження тривимірні моделі побудовані як звичайні тверді тіла. Вигляд побудованих тривимірних досліджуваних моделей АБПА наведено на рис. 2.4 [66].

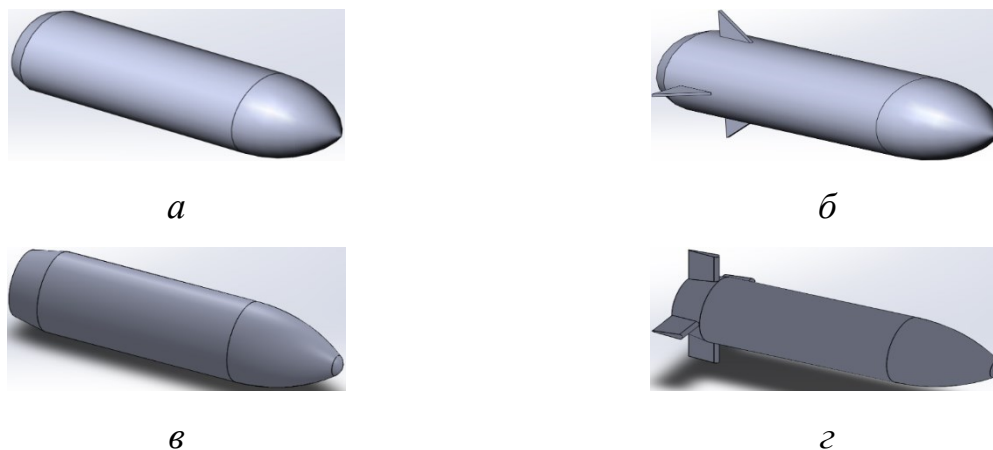


Рисунок 2.4 Ізометричний вигляд побудованих досліджуваних моделей:
а – модель № 1; *б* – модель № 2; *в* – модель № 3; *г* – модель № 4

2.2 Дослідження автономного безпілотної підводного апарата за простого руху

Дослідження АБПА за простого руху проводиться із використанням комп'ютерного імітаційного моделювання та чисельного гідродинамічного

дослідження у спеціалізованому програмному комплексі комп'ютеризованих і чисельних інженерних досліджень і розрахунків “ANSYS Workbench” модуль “Fluid Flow (CFX)” [67,68].

Простий рух буде моделюватися у морському середовищі, швидкість руху становить 2,572 м/с (5 вузлів). Параметри морського середовища наведено у табл. 2.2 [66].

Таблиця 2.2 Параметри морського середовища

<i>Температура, К</i>	<i>Густина, кг/м³</i>	<i>Динамічна в'язкість, Па*с</i>
288,15	1025	$9,02 \cdot 10^{-4}$

2.2.1 Підготовка та імпорт тривимірної моделі у розрахунковий комплекс

Процес підготовки та імпорту до програмного комплексу інженерних досліджень та розрахунків тривимірної моделі має чітку послідовність і однаковий для всіх об'єктів. На прикладі моделі №1 покажемо процес підготовки та імпорту моделі [66].

Тривимірну модель розмістимо у прямокутній області, габарити якої складають 8 метрів у довжину, 2 метри у ширину та 0,5 метрів у товщину. Шляхом булевої операції вирахуємо контур тривимірної моделі АБПА із окресленої області. У результаті такої операції матимемо підготовлену розрахункову область моделі, яка зображена рис. 2.5 [66,67]. Отриману розрахункову область зберігають у нейтральному форматі типу STEP та за допомогою вбудованих функцій модель імпортується у програмний комплекс для проведення подальшої підготовки до розрахунку [65-67].



Рисунок 2.5 Підготовлена до розрахунку й аналізу розрахункова область модель № 1

2.2.2 Задання граничних умов

Задання граничних умов (ГУ), як і підготовка та імпорт моделі має чітку послідовність і однакове для всіх об'єктів.

Для зручності задання ГУ відповідним граням розрахункової області присвоїмо відповідні назви: “Inlet”, “Outlet”, “Symmetry”, “Model”, “Top” і “Bottom”, рис. 2.6. Для прикладу покажемо ці назви на моделі №2, оскільки, як зазначалося раніше, процедура присвоєння ідентична для решти моделей [66,67].

Гранична умова на вході “Inlet” задає векторну швидкість “Normal Speed” у десятковому форматі відповідної розмірності або як функцію “Cart. Vel. Components” (задання швидкості в декартових координатах, значення яких можуть бути як додатними, так і від’ємними, залежно від напрямку руху). Для моделювання задана швидкість уздовж повздовжньої осі X (швидкість руху) становить 5 вуз, що відповідає простому прямолінійному та рівномірному руху апарата.

Налаштування ГУ на виході “Outlet” відповідає налаштуванню ГУ “Inlet”, окрім параметра “Average Static Pressure”, який було встановлено як 0 Па.

Гранична умова “Symmetry” задає симетричність бічних граней розрахункової області і встановлює рух сітки, який у цьому дослідженні визначений за замовчуванням і не змінюється.

Гранична умова “Model” (системне ім'я “Wall”) пов'язує між собою тверду та рідку області шляхом встановлення значення швидкості в околі стінок робочої області. Для коректного обчислення застосовують ГУ “No Slip Wall” – без ковзання стінки, тобто рідина біля стінки набуває швидкості стінки та дорівнює нулю.

Граничні умови “Top” і “Bottom” використовують для задання умов, які відповідають за стан середовища зверху та знизу моделі. Для моделювання задано ГУ відкритого тиску “Opening Pressure – 0 Pa”.

Зображення граничних умов продемонстровано на рис. 2.7 [66,67].

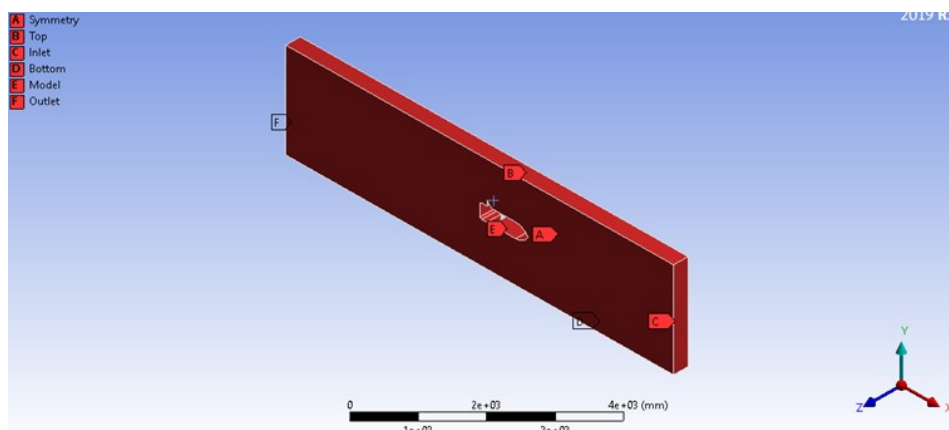


Рисунок 2.6 Назви граней розрахункової області на прикладі моделі № 2

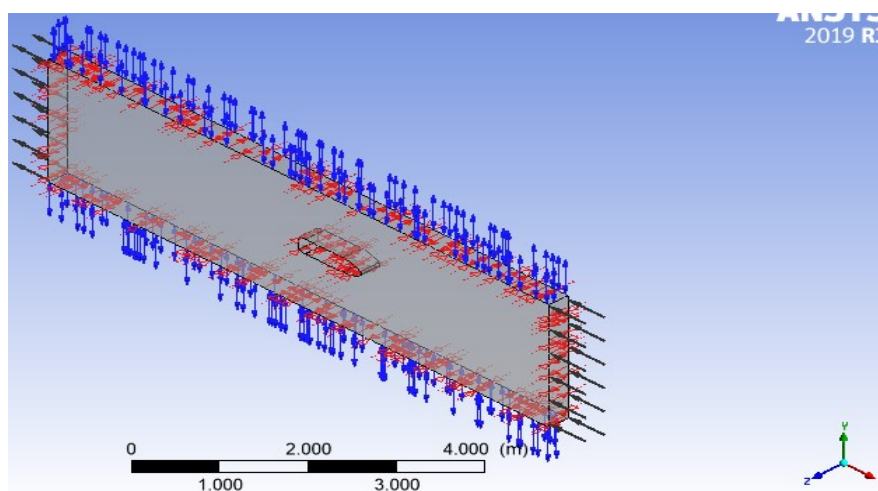


Рисунок 2.7 Зображення граничних умов на моделі

2.2.3 Генерування скінченно-різницевих елементів (сітка)

Після підготовки, імпортування, визначення розрахункової області моделі та задання ГУ, модель розкладають на відповідну кількість скінченно-різницевих елементів, щоб згенерувати сітку для досягнення бажаної точності результатів дослідження та моделювання. Створена сітка складається із тетраїдальних елементів із призматичними шарами в околі твердих границь із опцією підвищення якості й апроксимацією кривизни з обмеженням мінімального розміру, а кількість скінченних елементів у середньому для всіх моделей становить приблизно 2 444 000 од., що є достатнім для отримання точного результату [66].

2.2.4 Задання середовища функціонування

Однією із важливих умов для забезпечення коректного результату та наближення чисельного дослідження до натурального експерименту є чітко визначене середовище, в якому функціонує АБПА. Таким середовищем у даному дослідженні є морська вода. Задання середовища функціонування відбувається відповідно до вкладок, де формується група, до якої належить матеріал середовища та його фізичні властивості і характеристики. Приклад задання середовища показано на рис. 2.8.

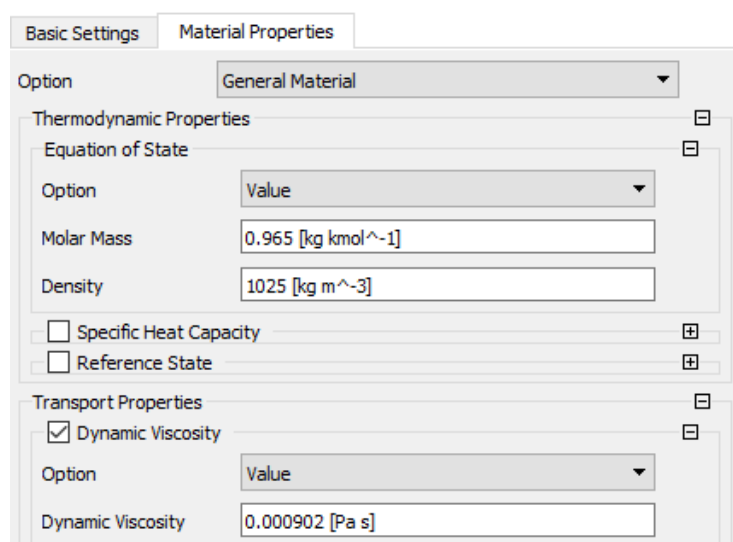


Рисунок 2.8 Вікно задання середовища функціонування

2.2.5 Чисельний розрахунок

Після задання ГУ, генерування сітки та задання середовища функціонування можна проводити розрахунок, який запускається виконанням команди “CFX-Solver Manager” із вкладки “Solution”. Вікно проведення розрахунків наведено на рис. 2.9 [66]. Вікно “Out File” вкладки “CFX-Solver Manager” дозволяє бачити та контролювати збіжність результатів і, у разі розходження певних показників, зупинити процес розрахунку та відкоригувати скінченно-різницеvu модель, а також отримати значення часу, який було витрачено на розрахунок.

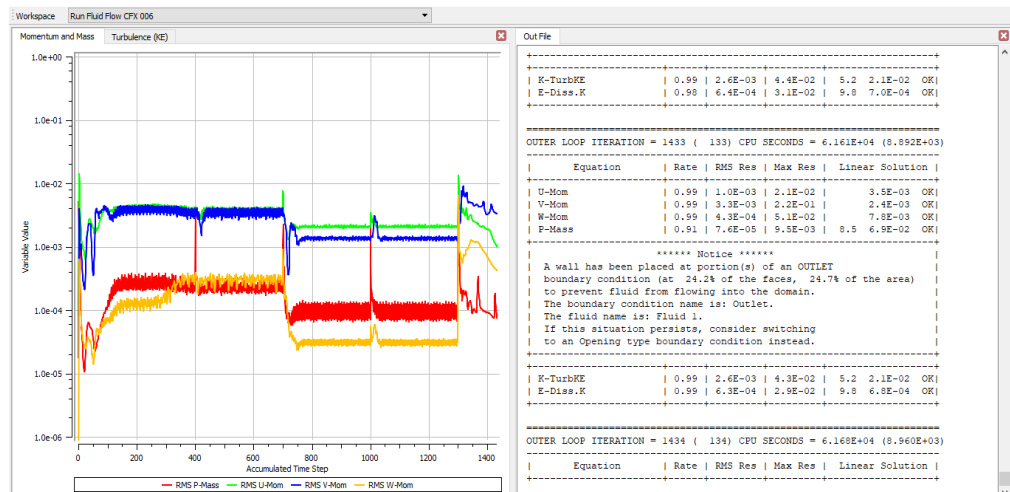
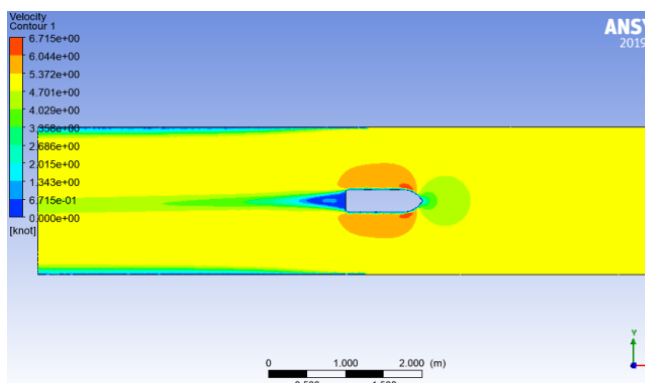


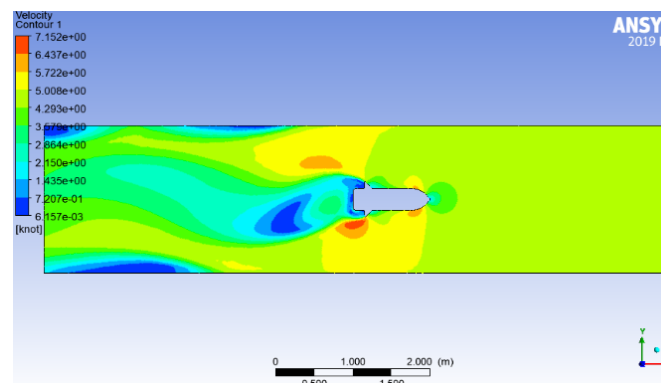
Рисунок 2.9 Вигляд вікна “CFX-Solver Manager” під час розрахунку

2.2.6 Відображення, аналіз та інтерпретація отриманих результатів

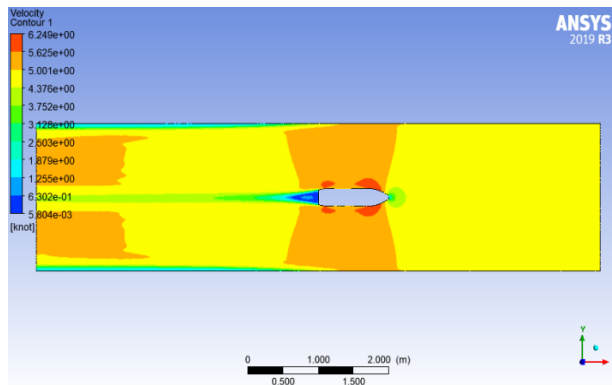
Після завершення процесу розрахунку отримані результати переглядаються у модулі “CFX-Post”. У цьому модулі інструментом “Contour” отримані результати відобразимо у вигляді епюр. Для цього по чергово завантажуюмо обрані результати дослідження: “Velocity”, “Pressure” та “Turbulence Kinetic Energy”. Епюри розподілу швидкості, тиску та кінетичної енергії турбулентності, отримані для розроблених чотирьох моделей, зображені на рис. 2.10 – рис.2.12.



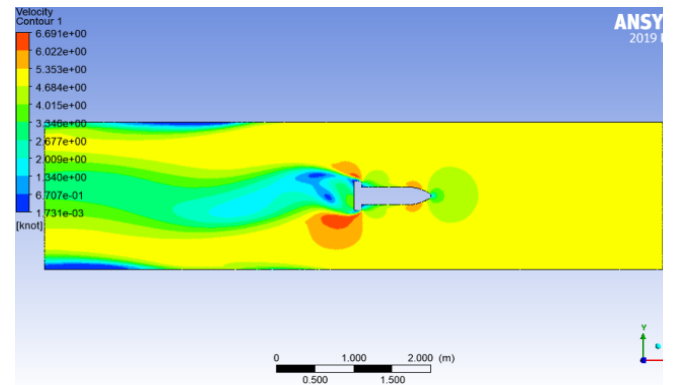
а



б



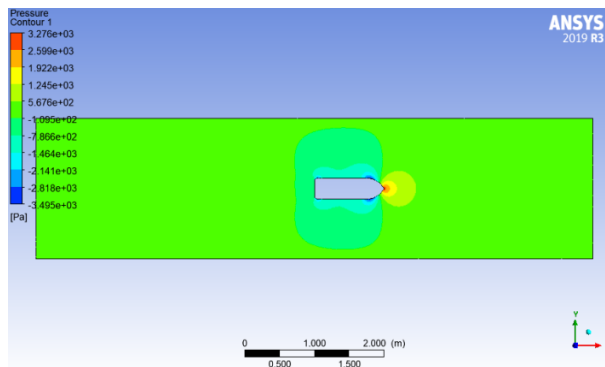
в



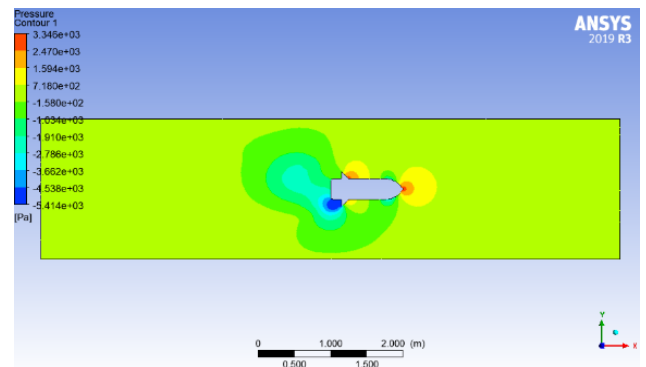
z

Рисунок 2.10. Епюри розподілу швидкості при дослідженні моделей:

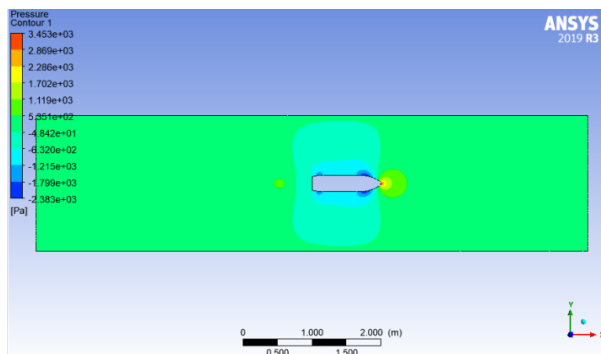
a – модель № 1; *б* – модель № 2; *в* – модель № 3; *z* – модель № 4



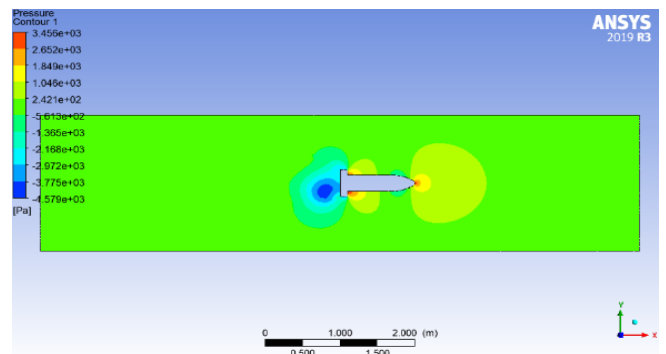
a



б



в



z

Рисунок 2.11. Епюри розподілу тиску при дослідженні моделей:

a – модель № 1; *б* – модель № 2; *в* – модель № 3; *z* – модель № 4

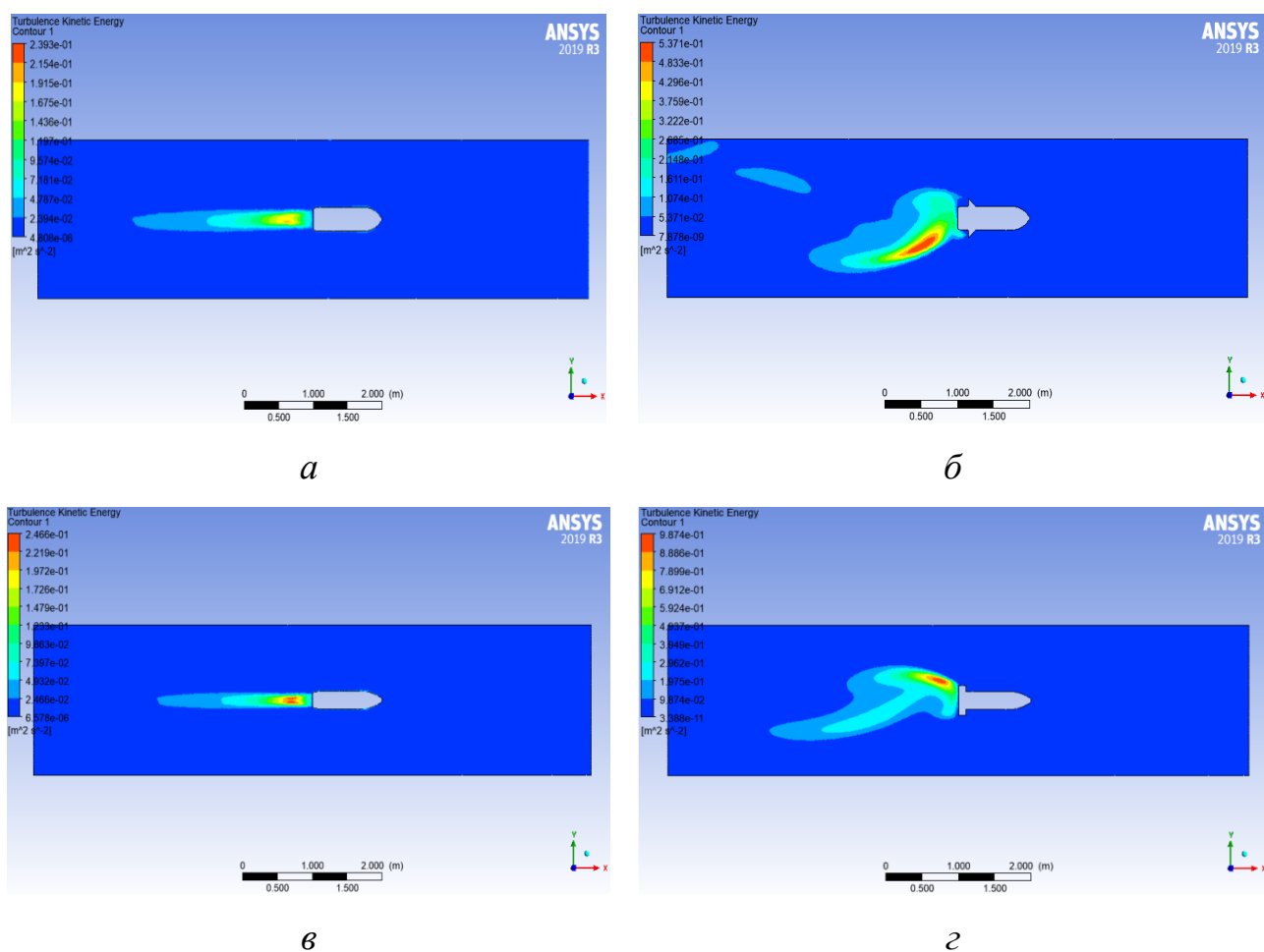


Рисунок 2.12. Епюри розподілу кінетичної енергії турбулентності:

a – модель № 1; *б* – модель № 2; *в* – модель № 3; *г* – модель № 4

Отримані результати дають змогу оцінити та проаналізувати вплив геометрії та конструкції корпусу апарата на гідродинамічні характеристики АБПА за виконання простого руху.

Зведені данні по чотирьом обраним та досліджуваним моделям корпусів наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 Результати моделювання динаміки АБПА при простому русі

<i>Тип моделі</i>	<i>Значення</i>	<i>Розподілення швидкості, вуз.</i>	<i>Тиск, Па</i>	<i>Кінетична енергія турбулентності, m^2/c^2</i>
Модель № 1	Мінімальне	0	$-3,495 \cdot 10^3$	$4,808 \cdot 10^{-6}$

<i>Тип моделі</i>	<i>Значення</i>	<i>Розподілення швидкості, вуз.</i>	<i>Тиск, Па</i>	<i>Кінетична енергія турбулентності, м²/с²</i>
	Максимальне	6,715	$3,276 \cdot 10^3$	$2,393 \cdot 10^{-1}$
Модель № 2	Мінімальне	$6,157 \cdot 10^{-3}$	$-5,414 \cdot 10^3$	$7,878 \cdot 10^{-9}$
	Максимальне	7,152	$3,346 \cdot 10^3$	$5,371 \cdot 10^{-1}$
Модель № 3	Мінімальне	$5,804 \cdot 10^{-3}$	$-2,383 \cdot 10^3$	$6,578 \cdot 10^{-6}$
	Максимальне	6,249	$3,453 \cdot 10^3$	$2,466 \cdot 10^{-1}$
Модель № 4	Мінімальне	$1,731 \cdot 10^{-3}$	$-4,579 \cdot 10^3$	$3,388 \cdot 10^{-11}$
	Максимальне	6,691	$3,456 \cdot 10^3$	$9,874 \cdot 10^{-1}$

Порівняльний аналіз отриманих та зведених результатів виділяє наступні відмінності:

– для моделей №1 і 3 (без додаткових елементів): модель №1 має широкую зону розподілу швидкості, максимальне значення швидкості перевищує таке ж значення для моделі № 3 на 7%; для моделі №3 значення максимального тиску навколо апарата вище на 5%, а значення кінетичної енергії турбулентності вище на 3%, ніж значення цих характеристик для моделі №1;

На основі цих даних можна констатувати, що за показниками геометричної форми та конструкції без додаткових елементів модель №3 є більш динамічною у порівнянні із моделлю №1. Для подальших досліджень доцільно використовувати модель №3, зокрема з метою розроблення автоматичної системи керування для маневрового АБПА багатоцільового призначення

– для моделей №2 та №4 (з додатковими елементами): модель №2 має на 6% більше значення максимальної швидкості, ніж модель №2; для моделі №4 значення максимального тиску навколо апарата вище на 6%, а значення кінетичної енергії турбулентності вище на 45%, ніж значення цих характеристик для моделі №2.

Модель №4 з додатковими елементами у порівнянні із моделлю № 2 має кращі динамічні властивості. Такі властивості обумовлені геометрією додаткових

елементів: для моделі №2 – елементи гострі, для моделі №4 – елементи округлі каплеподібної форми. При дослідженні моделей № 2 та 4 спостерігається виникнення вихрових слідів, що може бути корисним при виконанні різкого маневрування.

Порівнюючи моделі №3 та №4 можна констатувати: модель №4 має більше значення розподілення швидкості на 7%, максимальний тиск навколо апарата більше на 0,1% , а значення кінетичної енергії турбулентності вище на 75%.

Проведений аналіз простого руху найпоширеніших конструктивних форм АБПА свідчить про те, що конструкція глайдерного типу із рульовими поверхнями (крильцями) найбільш ефективна при прямолінійному русі. Утворені вихрові сліди (доріжка Кармана) моделі №4 свідчать про те, що дана модель найбільш придатна для виконання маневрів, тобто апарат такого типу може мати складну динаміку руху.

2.3 Дослідження автономного безпілотного підводного апарата за складного руху

За результатами дослідження у п. 2.2 встановлено, що для подальших досліджень доцільно обрати моделі торпедоподібної геометричної форми, які має додаткові елементи (гідродинамічні стабілізатори та рульові поверхні) [66,69].

Для подальших етапів розробки систем керування АБПА необхідно провести моделювання та аналіз динаміки апарата при маневрах за складними траєкторіями руху [69].

За результатами п.2.2 об'єктом дослідження обрано модель №4. Для моделювання складного руху апарату обираємо три траєкторії руху в горизонтальній площині, які є елементами гідробатичних маневрів. Гідробатика – властивість високого маневрування АБПА в обмежених зонах середовища (термін походить від виконання фігур вищого пілотажу). Гідроабатичні апарати відносяться високоефективних апаратів як за характеристиками дальності та швидкості, так і за характеристиками маневреності. Найпоширенішими

прикладями виконання гідробатичних маневрів є круті горизонтальні повороти в обмеженій зоні, спіральний рух в обмеженій зоні, щільні циклічні маневри (послідовність турбо-поворотів) [69-71]. Досліджувані траєкторії гідроабатичних маневрів, які обрано для моделювання складного руху АБПА, містять такі базові фрагменти: коло, хвиля (півхвиля) та розворот, рис. 2.13 [69]. Для моделювання прийнято таку умовно базову систему координат: вісь X відповідає повздовжній осі апарату, вісь Y – поперечній осі апарату. Моделювання проводиться для усіх траєкторій: довжина усіх траєкторій – 20 метрів, час проходження при швидкості 2,57 м/с (5 вузлів) 8 секунд [69].

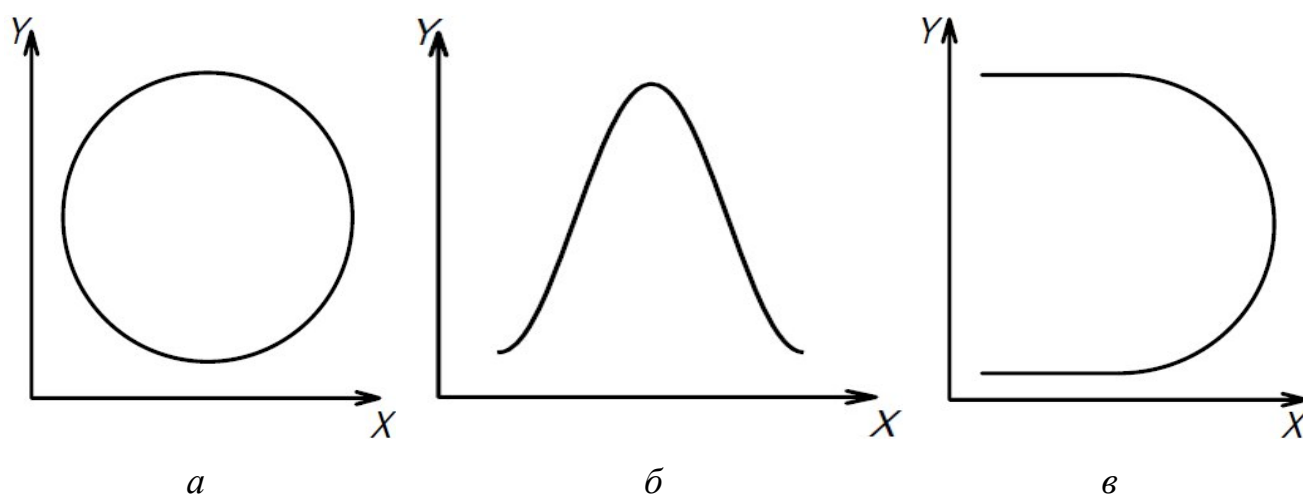


Рисунок 2.13 Траєкторії складного руху АБПА: *а* – коло; *б* - півхвиля; *в* - розворот

Для проведення моделювання та імітації складного руху АБПА за обраними траєкторіями використано спеціалізоване програмне середовище моделювання та імітації інженерних задач гідрогазодинаміки ANSYS Fluid Flow (Fluent) [67,69].

Уся процедура проведення моделювання подібна до тієї яка описана у п. 2.2. Відмінністю від етапів які описані у п. 2.2 є задання траєкторії руху об'єкта.

Для задання руху, який відрізняється від прямолінійного можна використовувати як вбудовані функції програмного комплексу так і функції користувача – UDF (User-Defined Function). Перевагою використання функції користувача є те, що дану функцію можна програмувати та за допомогою

вбудованого компілятора програмного комплексу динамічно завантажувати. Програма функцій UDF повинна бути реалізована із використанням синтаксису мови програмування C/C++ із використанням та підключенням вбудованих в ANSYS Fluent бібліотек `udf.h` [69]. Написання програм траєкторій раху АБПА можна реалізовувати у будь-якому текстовому редакторі із подальшим збереженням файлу із розширенням «.c» або «.cpp». Компіляція коду алгоритму відбувається безпосередньо у середовищі ANSYS Fluent [67,69].

Після завантаження бібліотеки та компіляції відбувається налаштування динамічної сітки для імітації моделей, які потребують рухомої області сітки. Динамічна сітка налаштовується обранням потрібних параметрів та вмиканням потрібних функцій, в результаті налаштувань стає доступним створення елементів, які повинні рухатись. Обираючи у вкладці із динамічною сіткою необхідну функцію перегляду руху сітки, при моделюванні, з'являється можливість побачити траєкторію усіх створених рухомих елементів. Візуальне зображення результатів, без збереження їх даних та графіків, можна побачити після задання кількості ітерацій, часу тривалості однієї ітерації та часу початку [67,69].

Імітаційне моделювання відбувалося за визначеними траєкторіями, кожен із яких апарат проходить за 8 секунд.

Симуляція проходить із кроком 0,025 секунд [69]. Результати наведено на рис. 2.17 – рис. 2.19 у вигляді епюр розподілу швидкості, тиску та кінетичної енергії турбулентності, які отримані для моделі АБПА №4 при складному русі за визначеними траєкторіями.

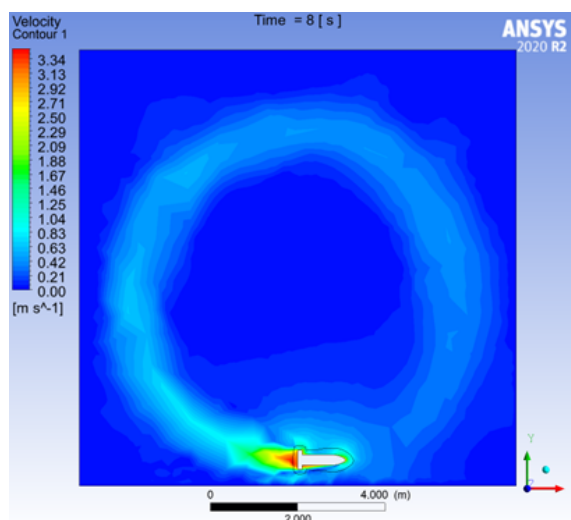
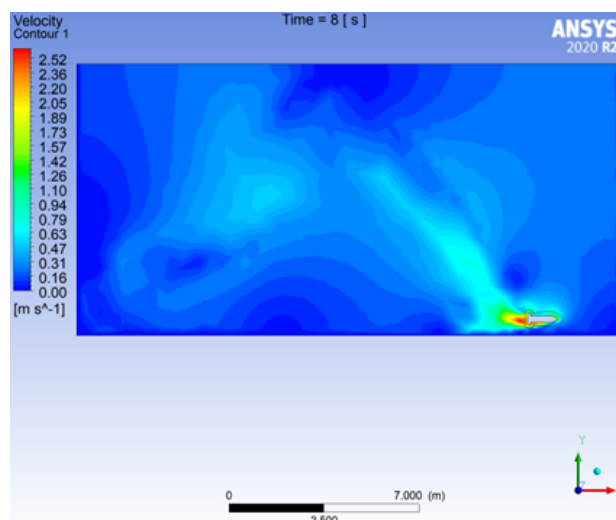
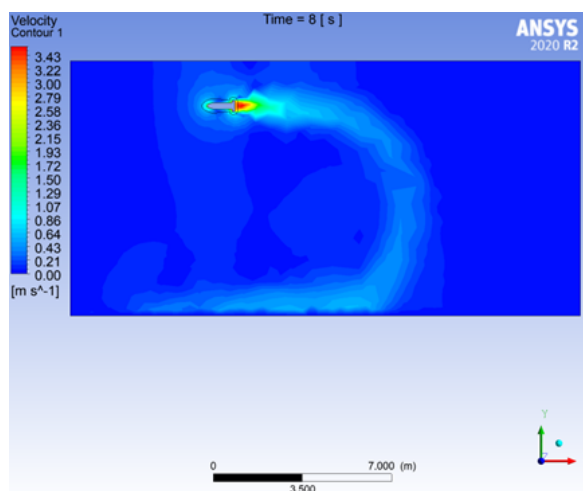
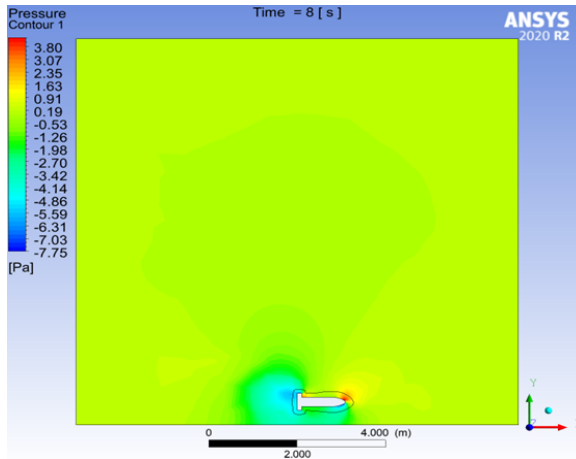
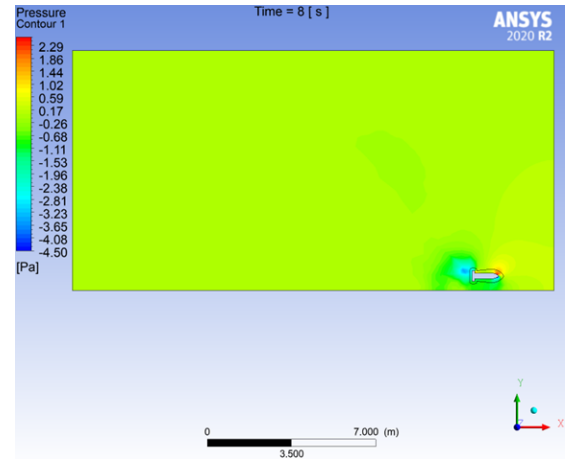
*a**б**в*

Рисунок 2.17. Епюра розподілення швидкості для моделі №4:

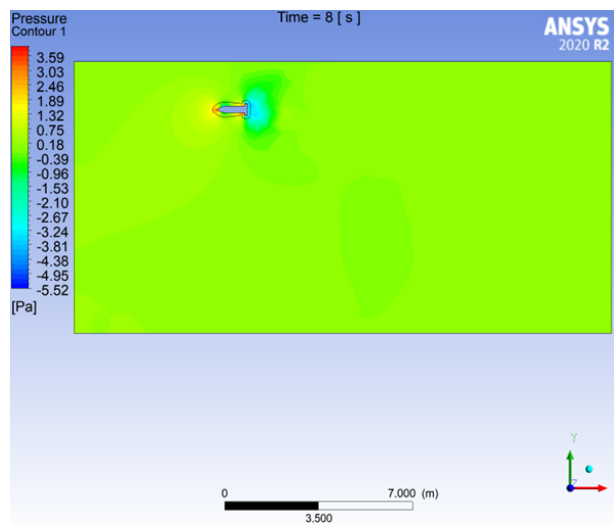
a – траєкторія руху по колу; *б* – траєкторія руху півхвилі; *в* – траєкторія руху розвороту



a



б



в

Рисунок 2.18. Епюра розподілення тиску для моделі №4:

a – траєкторія руху по колу; *б* – траєкторія руху півхвилі; *в* – траєкторія руху розвороту

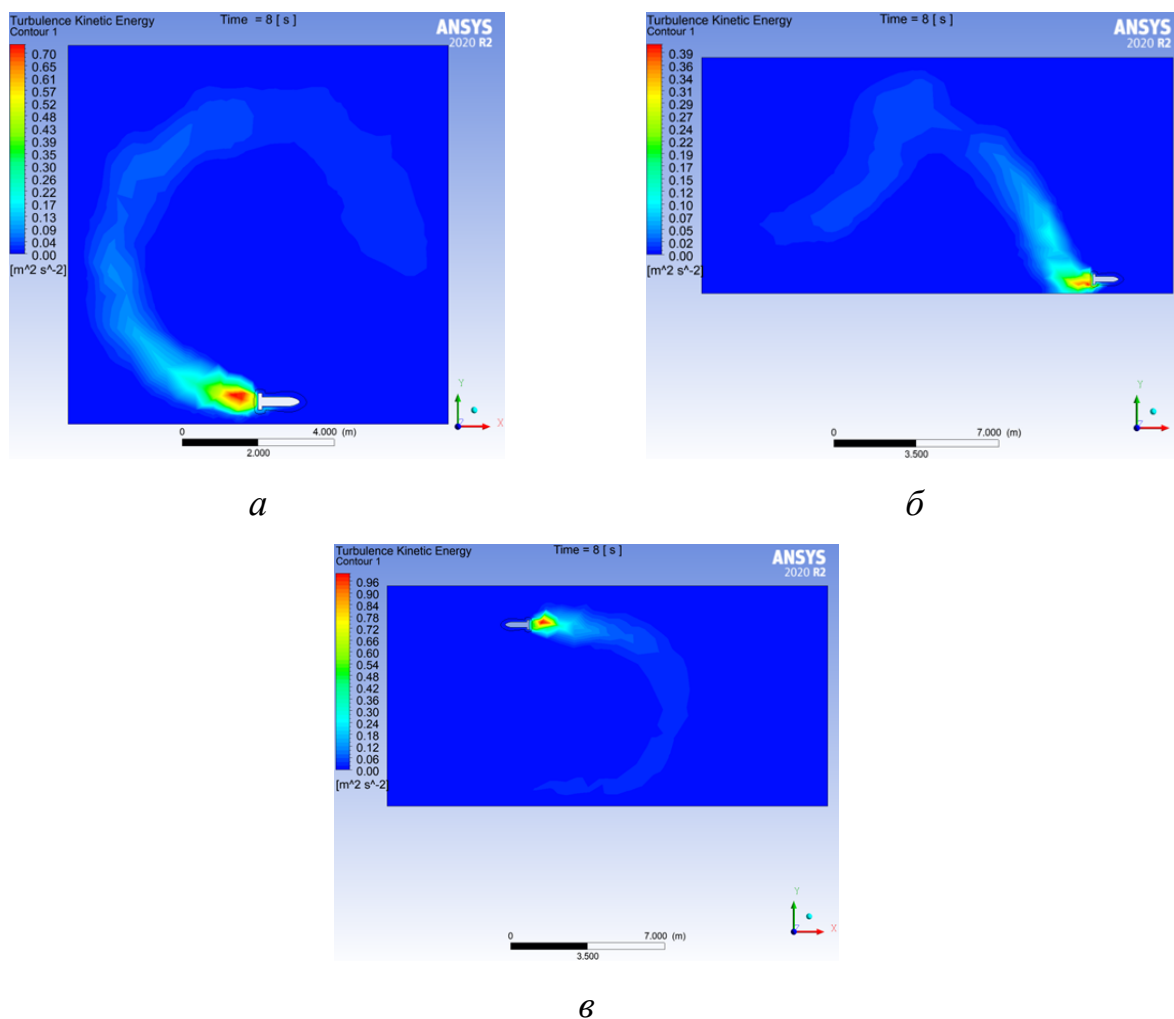


Рисунок 2.19. Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №4:

a – траєкторія руху по колу; *б* – траєкторія руху півхвилі; *в* – траєкторія руху розвороту

Отримані дані зведемо у табл. 2.4 [69], де для порівняння наведено результати моделювання цієї ж моделі АБПА, отримані за простого руху (прямолінійна траєкторія) з такою ж швидкістю.

Таблиця 2.4 Результати моделювання АБПА моделі №4 при складному та прямолінійному русі

<i>Тип траєкторії</i>	<i>Значення</i>	<i>Розподілення швидкості, м/с</i>	<i>Тиск, Па</i>	<i>Кінетична енергія турбулентності, м² / с²</i>
Коло	Min	0,21	-7750	0,04
	Max	3,34	3800	0,7

Півхвиля	Min	0,16	-4500	0,02
	Max	2,52	2290	0,39
Розворот	Min	0,21	-5520	0,06
	Max	3,43	3590	0,96
Прямолінійна	Min	0,001	-4579	$3,388 \cdot 10^{-11}$
	Max	3,35	3456	0,9874

Аналіз отриманих результатів показує [69]:

1. Маневр колового руху в обмеженій зоні є проблематичним та складним для моделі №4 – дану проблему можна вирішити шляхом видовження кормової (задньої) частини апарата, де розташовані гідродинамічні поверхні;

2. Отримані результати для траєкторії типу «розворот», що є комбінацією прямолінійного руху та колового руху, свідчать про те що максимальні значення швидкості, тиску та турбулентності є досить наближеними до значень при простому русі досліджуваної моделі [66]. На основі цих результатів можна констатувати, що модель №4 придатна для виконання маневрового руху;

3. Виконання маневру «півхвиля» викликає мінімальні збурення у водному середовищі. Такі результати свідчать про те, що досліджувана конструкція придатна для огинання перешкод;

Порівняння результатів простого прямолінійного руху із складним рухом моделі №4 показує, що завдяки своїй гладкій формі носу та стабілізаторах АБПА здатен рухатися прямо, без зміни курсу, при складному русі. У відповідності до заданих траєкторій, прослідковується, що модель має властивість маневрувати у обмеженому просторі.

2.4 Визначення гідродинамічних коефіцієнтів автономного безпілотного підводного апарата

Результати досліджень для простого прямолінійного руху та складного руху моделей АБПА показують доцільність використання АБПА глайдерного типу

торпедоподібної форми із рульовими поверхнями хрестоподібного розташування класу Міні апаратів (вагою від 20 до 100 кг). Такі апарати здатні виконувати як прямолінійний рух так і маневровий.

Такі якісні дослідження, які проведені у п.2.2 та п.2.3 завершуються кількісним дослідженням із визначення гідродинамічних коефіцієнтів, які будуть враховані при розробці алгоритмів системи керування та виборі відповідних складових системи керування.

Гідродинамічні коефіцієнти, як правило, визначаються натурним експериментом. Оскільки натурний експеримент є затратною за часом та обрахунками процедурою визначення коефіцієнтів буде проводитися шляхом чисельного моделювання. Чисельне моделювання дозволяє отримати значення гідродинамічних сил, які виникають при русі об'єкта та обчислити коефіцієнти сили супротиву та підйимальної сили АБПА. Коефіцієнти сили супротиву та підйимальної сили визначаються за таким залежностями [72-75]:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho S V^2} \quad (2.1)$$

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho S V^2} \quad (2.2)$$

де F_d – сила супротиву;

C_d – коефіцієнт сили супротиву;

F_l – підйимальна сила;

C_l – коефіцієнт підйимальної сили;

ρ – густина середовища;

S – міделева площа, яка визначається як проекція фронтальної площини об'єкта на площину напрямку швидкості – тобто залежить від кута диференту;

V – швидкість руху.

Формули (2.1) та (2.2) показують, що гідродинамічні коефіцієнти залежать як від швидкості так і від поперечної міделевої площі об'єкта у напрямку якого напрямлений потік рідини. Дослідження проводиться при таких значеннях швидкості: 2 м/с, 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с, а для кожної швидкості кути диференту

будуть змінюватися від 0° до 45° із кроком 5° . Параметри середовища наведені у табл. 2.2.

Як зазначалось у п.2.3 модель апарата №4 найбільш придатна до виконання як простого так і складного руху. Конструкційний вигляд апарата моделі №4 та його геометричні характеристики зображено на рис. 2.20 – рис. 2.22. На рис. 2.22 наведено масові та фізичні характеристики апарата (моменти інерції, центр ваги) значення яких будуть використовуватися у моделюванні системи керування апаратом [72].

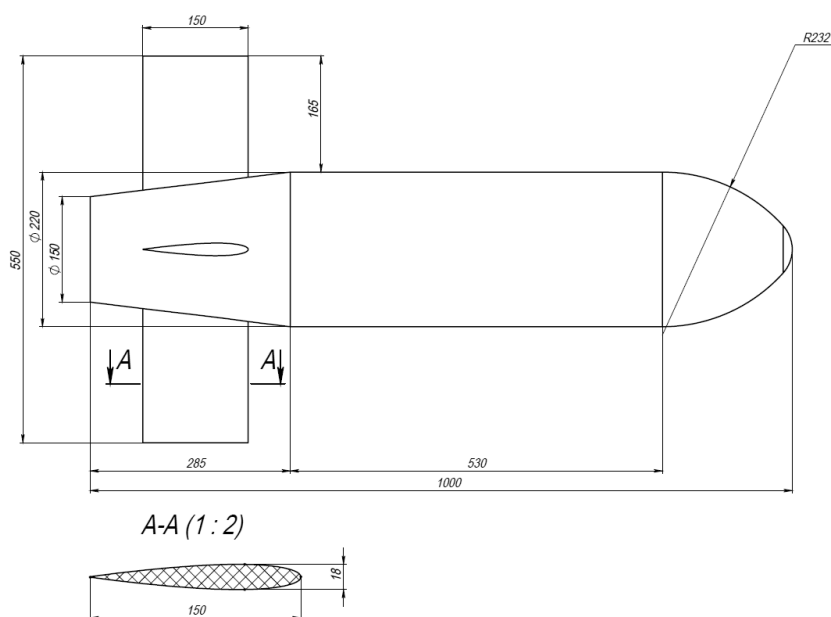


Рисунок 2.20 Ескізне креслення досліджуваної моделі (модель № 4)

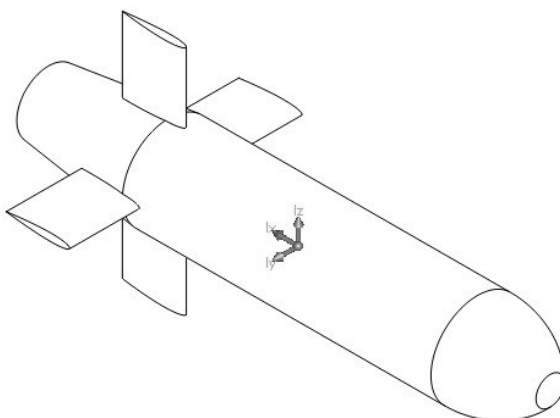


Рисунок 2.21 Ізометрична тривимірна досліджувана модель

```

Density = 1700 kilograms per cubic meter
Mass = 69.84 kilograms
Volume = 0.04 cubic meters
Surface area = 1 square meters

Center of mass: ( meters )
X = 0.01
Y = 0
Z = 0

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: ( kilograms * square meters )
Taken at the center of mass.
Ix = ( 1, 0, 0)      Px = 0.46
Iy = ( 0, 0, -1)    Py = 7.03
Iz = ( 0, 1, 0)      Pz = 7.03

Moments of inertia: ( kilograms * square meters )
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.
Lxx = 0.46          Lxy = 0          Lxz = 0
Lyx = 0             Lyy = 7.03        Lyz = 0
Lzx = 0             Lzy = 0          Lzz = 7.03

Moments of inertia: ( kilograms * square meters )
Taken at the output coordinate system.
Ixx = 0.46          Ixy = 0          Ixz = 0
Iyx = 0             Iyy = 7.04        Iyz = 0
Izx = 0             Izy = 0          Izz = 7.04

```

Рисунок 2.22 Масові та фізичні характеристики досліджуваної моделі АБПА

У морському конструюванні важливими параметрами при гідродинамічному дослідженні є числа Рейнольдса та Фруда [72,76]. Ці числа вираховуються на основі геометрії моделі (рис. 2.20), параметрів середовища та швидкості руху об'єкта. Значення чисел Рейнольдса та Фруда для розглянутих швидкостей руху наведено у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 Числа Рейнольдса та Фруда

	<i>Швидкість руху, м/с</i>			
	2	5	10	15
<i>Re</i>	2103374	5258435	10516870	15775304
<i>Fr</i>	0,34	2,1237	8,495	19,11

Розрахунок та чисельне моделювання проводиться для повноцінної тривимірної моделі. Етапи проведення розрахунку та моделювання аналогічні як і для дослідження простого прямолінійного руху, які описані у п.2.2. На значення гідродинамічних коефіцієнтів впливає розрахункова область та скінченно-різницева модель (сітка). Розмір сітки визначає, наскільки добре виконується гідродинамічний аналіз і наскільки складним є обчислення. Таким чином, для проведення чисельного розрахунку для створеної тривимірної моделі було створено прямокутну розрахункову область – 7 метрів довжиною, 3 метри ширина та 3 метри висота, яка зображена на рис. 2.23. Загальна характеристика скінчених

елементів: вузлів – 545419, тетраедрів – 3201581, що достатньо для отримання результатів із $\pm 35\%$ точністю відносно натурних експериментів та достатнім для урахування отриманих значень у рівняннях руху для дослідження та моделювання системи автоматичного керування із застосуванням мікроелектромеханічних систем [72-74].

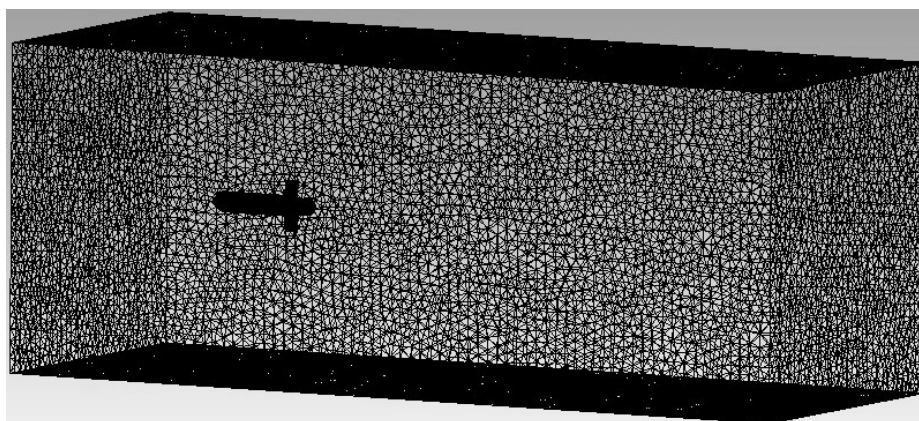


Рисунок 2.23 Розрахункова область

Для розрахунків поле течії та тиск води, що оточує тіло АБПА, були визначені на основі моделювання руху рідини за допомогою нестисливих, сотермічних рівнянь RANS (*Reynolds-averaged Navier–Stokes* – усереднені рівняння Нав'є-Стокса за Рейнольдсом) [69,77,78]. Ці рівняння використовуються в більшості досліджень через те, що порівняно з теорією потенційного потоку вони забезпечують кращу обробку ефектів в'язкості. Рівняння містять стандартний розв'язок усередненого за ансамблем, стаціонарного та тривимірного рівняння Нав'є-Стокса, що характеризують такі властивості потоку, як швидкість, тиск, температура та густина. У даному випадку, щоб уможливити замикання системи рівнянь RANS за допомогою ANSYS Fluent, була обрана модель турбулентності SST (*Shear-Stress-Transport*) $k-\omega$, де k і ω відповідно позначають кінетичну енергію турбулентності та швидкість в'язкої дисипації. Ця модель допомагає передбачити, як турбулентність і потік поведуться навколо корпусу, і її вибір для цілей проекту був виправданим, оскільки це широко використовувана модель турбулентності для інженерного моделювання, яка є надійною та може застосовуватися до різних

потоків та дозволяє моделювати безвідривні турбулентні течії, так і течії із розвиненими турбулентними відривами та моделювати течії у пристінковому граничному шарі [72,77,78].

Розрахунок гідродинамічних сил у відповідності до залежностей (2.1) та (2.2) проводився для зазначених вище чотирьох значень швидкості та десяти значень кута нахилу (кут атаки або диференту). Результати отриманих сил наведено у таблицях додатку В.

Зобразимо отримані результати графічно на рис. 2.24 – рис. 2.26.

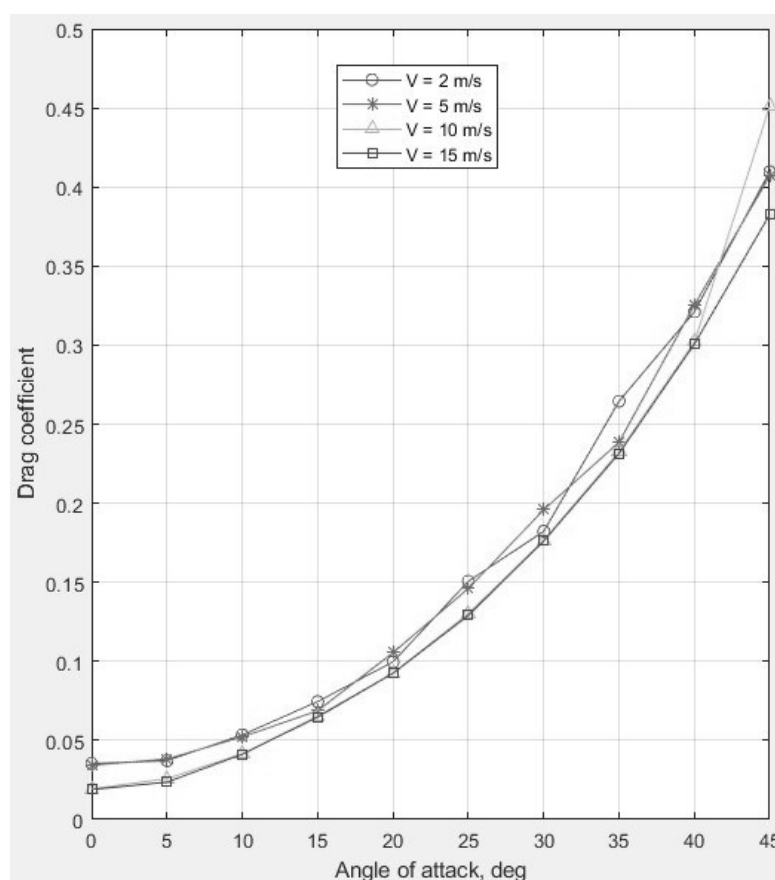


Рисунок 2.24 Графік залежності коефіцієнта сили супротиву від кута диференту для різних значень швидкості

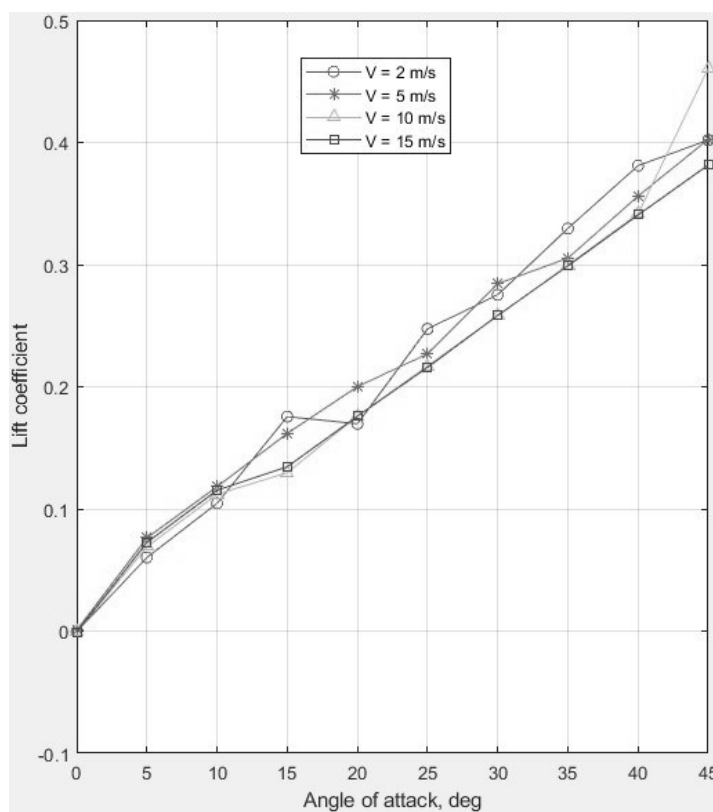


Рисунок 2.25 Графік залежності коефіцієнта підйимальної сили від кута диференту для різних значень швидкості

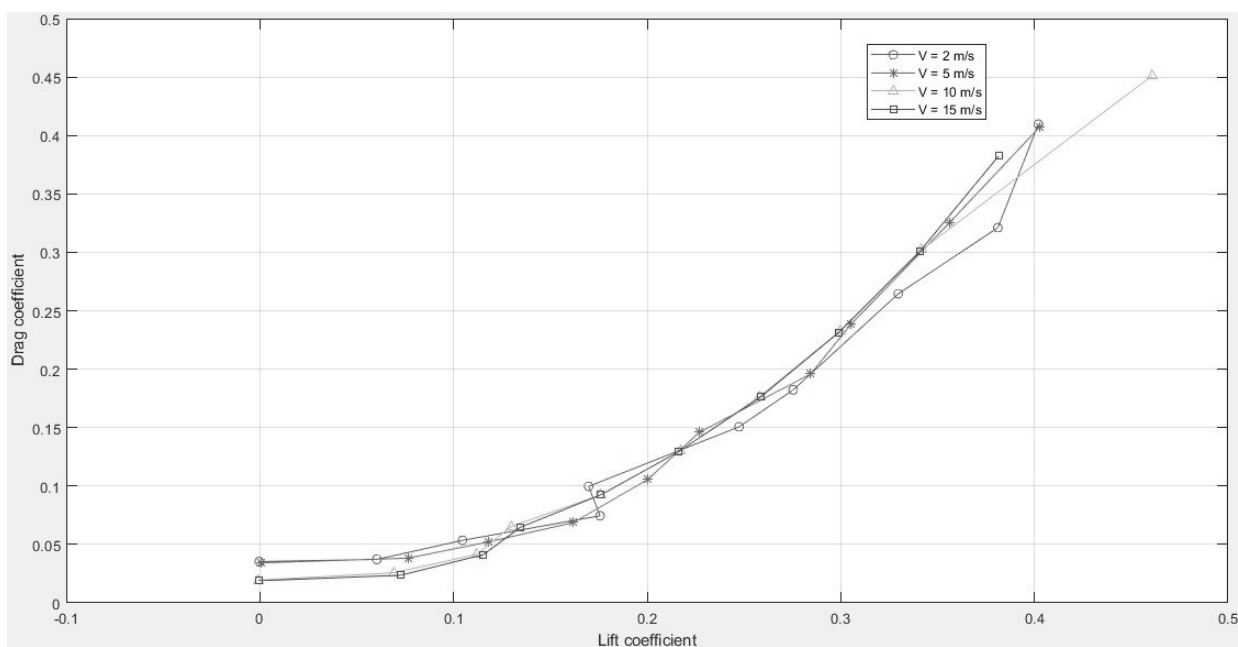


Рисунок 2.26 Графік залежності коефіцієнта сили супротиву від коефіцієнта підйимальної сили із урахуванням кута нахилу для різних значень швидкості

Отримані результати дослідження свідчать про наступне [72]:

1) Пораховано гідродинамічні сили, які діють на рульові поверхні стабілізаторів в залежності від різних швидкостей та різних кутів нахилу.

2) На основі отриманих значень сил, було обчислено коефіцієнти сили супротиву та підйимальної сили. Аналіз значень отриманих коефіцієнтів показує високу подібність значень коефіцієнтів при різних швидкостях на одних і тих самих кутах нахилу.

3) Подібність отриманих значень коефіцієнтів свідчить про те, що обрана конструктивну схему об'єкта можна використовувати при подальшому дослідженні рівнянь руху автономного безпілотного підводного апарата та дослідженні системи автоматичного керування, орієнтації та навігації із застосуванням MEMS технологій.

Висновки по Розділу 2

1. Проведено чисельні дослідження найпоширеніших типів автономних безпілотних підводних апаратів, глайдерного та гвинтового, для простого прямолінійного руху. На основі отриманих результатів моделювання простого прямолінійного руху обрано дві моделі апарата для дослідження гідроабатичних властивостей;

2. Проведено гідроабатичне дослідження. Результати гідроабатичного дослідження свідчать про здатність апарату глайдерного типу краще виконувати маневрування та краще виконувати маневрування у обмеженому просторі. За результатами дослідження обрано конкретну модель автономного безпілотного підводного апарата для визначення конструктивних характеристик та гідродинамічних коефіцієнтів для застосування у дослідженні рівнянь керування;

3. Проведено чисельне програмне моделювання обраної конструктивної форми автономного безпілотного підводного апарата – глайдерний тип торпедоподібної форми із «плюс»-подібним розташуванням гідродинамічних рульових поверхонь у кормовій частині;

4. Отримані результати дослідження показують подібність значень гідродинамічних коефіцієнтів при різних швидкостях та кутах нахилу, що свідчить про ефективність обраної конструкції здійснювати як прямолінійний так і складний гідроабатичний рух;

5. Отримані значення гідродинамічних сил та коефіцієнтів будуть використовуватися у рівняннях руху апарата та будуть враховані при синтезуванні алгоритмів керування автономним безпілотним підводним апаратом.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ

У даному розділі будуть розглядатися питання вибору схеми побудови системи орієнтації та навігації, проведення дослідження чутливих елементів та комплексне моделювання системи орієнтації та навігації із урахуванням параметрів чутливих елементів.

Автономні системи визначення просторового положення та місцезнаходження – це, зазвичай, інерціальні системи орієнтації та навігації (ІСО, ІНС), які використовують властивості інерції маси для визначення як просторового положення так і для визначення навігаційних параметрів. Метод навігації у таких системах базується на методі числення шляху. Реалізація цього метода, у даних системах, потребує знання початкових координат місцеположення об'єкта, а при русі цього об'єкта необхідно вимірювати проекції прискорень на відповідні вісі об'єкта та подвійним інтегруванням отримувати значення швидкості об'єкта та координат місцеположення [79-82,85,91,92].

Розвиток промисловості та галузей електроніки, мікроелектроніки, машинобудування та комп'ютерно-інтегрованих технологій спонукають до розвитку систем безплатформної інерціальної навігації на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [79,81].

Переваги БІНС у порівнянні із класичною платформною ІНС наступні [79-81]:

- Склад та точність системи залежить від характеру руху об'єкта;
- Вихідна інформація, суттєво, не залежить від маневреності об'єкта;
- Частота оновлення сигналу мінімум у 2 рази більша;
- Значно менший час початкової виставки та підготовки до роботи [88];
- Висока надійність та велике значення напрацювання на відмову: для платформних ІНС напрацювання на відмову складає близько 1500 – 2500 годин у залежності від якості виготовлення елементів, для БІНС – не менше 5000 годин [89,90];

- Масо-габаритні характеристики відносно менші;
- Значно менше енергоспоживання;
- Відносна стійкість до кліматичних, вібраційних та ударних навантажень [89,90];
- Відносно низька вартість.

У залежності від характеру руху об'єкта БІНС діляться за рівнем точності вихідної інформації на системи: низької, середньої та високої точності.

БІНС низької точності переважно використовуються у системах стабілізації антенних та телескопічних систем. Похибка визначення координат у таких БІНС варіюється від 5 до 40 км за годину роботи [85,91,92]. Чутливі елементи такої системи це зазвичай низькоякісні мікромеханічні гіроскопи (ММГ) та мікромеханічні акселерометри (ММА).

Системи БІНС середньої та високої точності застосовуються для забезпечення автономної навігації рухомих об'єктів. Похибки для БІНС середньої точності знаходяться у діапазоні від 1,85 км (одна морська миля) до 7,4 км за годину роботи, а для систем високої точності – від 0,3 км до 2,035 км за годину роботи [85,91,92]. Чутливі елементи такої системи – середньоякісні та високоякісні мікромеханічні гіроскопи (ММГ) та мікромеханічні акселерометри (ММА).

Також, перевагою БІНС перед іншими системами (СНС, радіонавігаційні чи акустичні системи) у застосуванні в автономних безпілотних підводних апаратах є автономність роботи, низьке енергоспоживання, малі габарити та завадостійкість. Недоліком БІНС є накопичення похибок у часі. Цей недолік, на сьогодні, може бути компенсований наступними способами:

- 1) Інтегруванням двох систем для корегування показань БІНС;
- 2) Алгоритмічними методами інтегрування та корегування;
- 3) Підбором таких чутливих елементів, які за своїми характеристиками будуть забезпечувати задане функціонування системи протягом необхідного часу роботи із мінімальним коригуванням, а також розробкою алгоритмів роботи системи, які враховують та компенсують похибки ЧЕ.

3.1 Структура системи орієнтації та навігації автономного безпілотного підводного апарата

Вище зазначалося про градацію БІНС за ступенем точності. Точність БІНС – комплексна величина яка залежить не тільки параметри ЧЕ, але і від схеми побудови та алгоритму визначення параметрів орієнтації, які реалізуються у обчислювальному блоці.

Існують наступні схеми побудови БІНС: БІНС на вільних гіроскопах (ВГ), БІНС на акселерометрах та БІНС на акселерометрах та датчиках кутової швидкості [91-96]. Коротко розглянемо кожен із схем та оберемо найбільш прийнятну схему побудови для дослідження і застосування у АБПА.

БІНС на некерованих гіроскопах вирішує задачу орієнтації об'єкта за допомогою вільних (іноді – некерованих) гіроскопів. У загальному випадку задача орієнтації вирішується двома ВГ, у яких у початковий момент часу кінетичні моменти перпендикулярні один одному. Задача орієнтації та навігації вирішується одним ВГ та двома акселерометрами. Така БІНС може бути реалізована за схемою, яка зображена на рис. 3.1 [91,93,94].

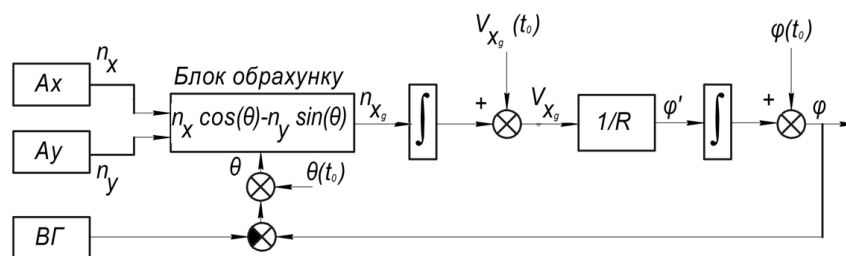


Рисунок 3.1 Схема реалізації північного каналу БІНС на вільних гіроскопах

Недоліками БІНС на ВГ є складність конструкції та обмежене застосування алгоритмів, а також значні накопичення похибок у часі.

Побудова БІНС на акселерометрах полягає у встановленні двох акселерометрів на кожен вісь зв'язаної із об'єктом системи координат. Існує декілька способів розташування вісей чутливості акселерометрів [93]. У першому способі – пара акселерометрів встановлюється вздовж кожної вісі зв'язаної системи координат.

Вісі чутливості цих акселерометрів перпендикулярні відповідним осям зв'язаної системи. У другому способі також встановлюються два акселерометри, проте вісі чутливості акселерометрів паралельні відповідним вісям об'єкта. Схеми побудови БІНС на акселерометрах зображені на рис. 3.2.

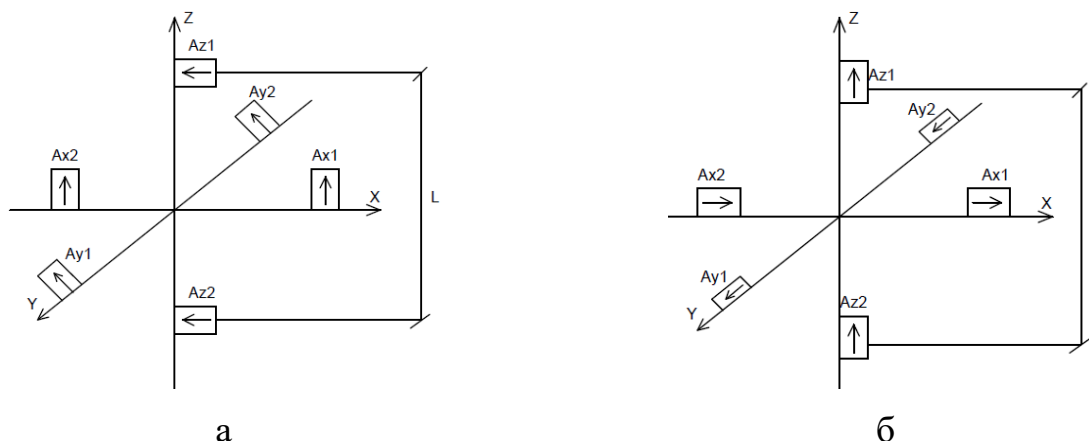


Рисунок 3.2 Схеми побудови БІНС на акселерометрах

а – вісі чутливості перпендикулярні осям зв'язаної СК

б – вісі чутливості паралельні осям зв'язаної СК

Чутливість БІНС на акселерометрах до кутового руху об'єкта залежить від відстані між акселерометрами.

Недоліками таких БІНС є складність визначення знака кутової швидкості та значними похибками, які можуть виникнути при неточності задання відстані між акселерометрами [91,93]. БІНС на акселерометрах можуть бути корисними у тих випадках, коли виміряти кутову швидкість за допомогою ДКШ не є можливим. До таких випадків можуть бути віднесені підводні апарати, які здійснюють обертання відносно будь-якої із вісей із частотою 20 Гц та більше, кутова швидкість обертання становить більше ніж 7200 град/сек. Однак такі БІНС не знайшли широкого використання у АБПА [92-93].

БІНС на акселерометрах та датчиках кутової швидкості – найпоширеніша БІНС у використанні та виробництві. Така БІНС реалізується за наступною схемою, яка показана на рис. 3.3 [79,81,91-96].

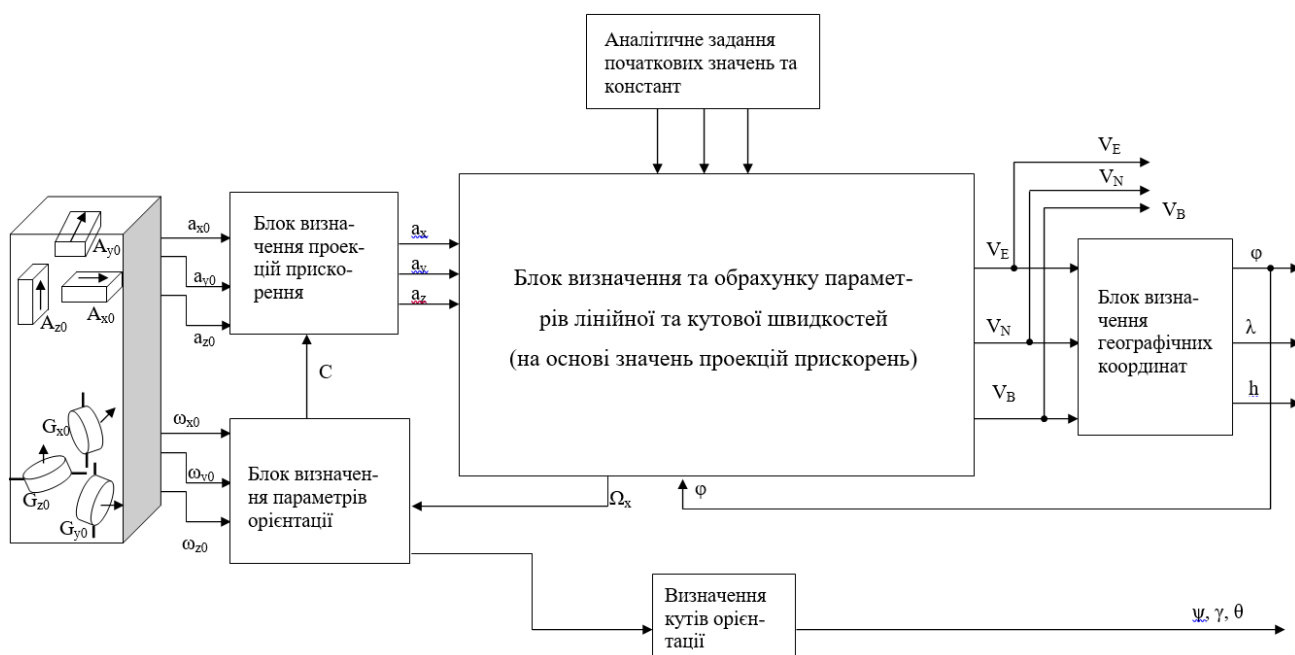


Рисунок 3.3 Схема побудови БІНС на ДКШ та акселерометрах

Проводячи аналіз схем побудови БІНС, які зображені на рис. 3.1 – рис. 3.3, можна зазначити:

1. Схема БІНС на вільних гіроскопах за своєю структурою придатна до використання лише в обмежених апаратах, які працюють нетривалий час;
2. Застосування БІНС на вільних гіроскопах потребує застосування лише електромеханічних ДКШ, оскільки тільки у таких елементів є напрямлений кінетичний момент, який можна спозиціонувати у відповідному напрямку, як того потребує використання у БІНС;
3. Найбільш придатними до використання із МЕМС елементами є БІНС на акселерометрах та БІНС на акселерометрах та ДКШ;
4. БІНС на акселерометрах має недоліки у визначенні знаку кутової швидкості – виходячи із цього положення така БІНС може бути обмежено застосовна у роботі автономних безпілотних підводних апаратів;
5. БІНС на акселерометрах та датчиках кутової швидкості є найбільш прийнятним варіантом до застосування у якості системи орієнтації та навігації у автономному безпілотному підводному апараті класу Міні.
6. Структура БІНС на акселерометрах та ДКШ надає змогу варіювати ЧЕ.

Для подальшого дослідження будемо розглядати та моделювати схему побудови БІНС на акселерометрах та гіроскопах, яка зображена на рис. 3.3.

Для правильної роботи БІНС, яка буде впроваджена і застосована у АБПА необхідно обґрунтувати вибір ЧЕ, а також комплексно перевірити чутливі елементи у складі системи та оцінити роботу БІНС. У загальному випадку реалізацію такого комплексного дослідження можна подати у вигляді інформаційно-структурної моделі дослідження, яка наведена на рис. 3.4 [109].

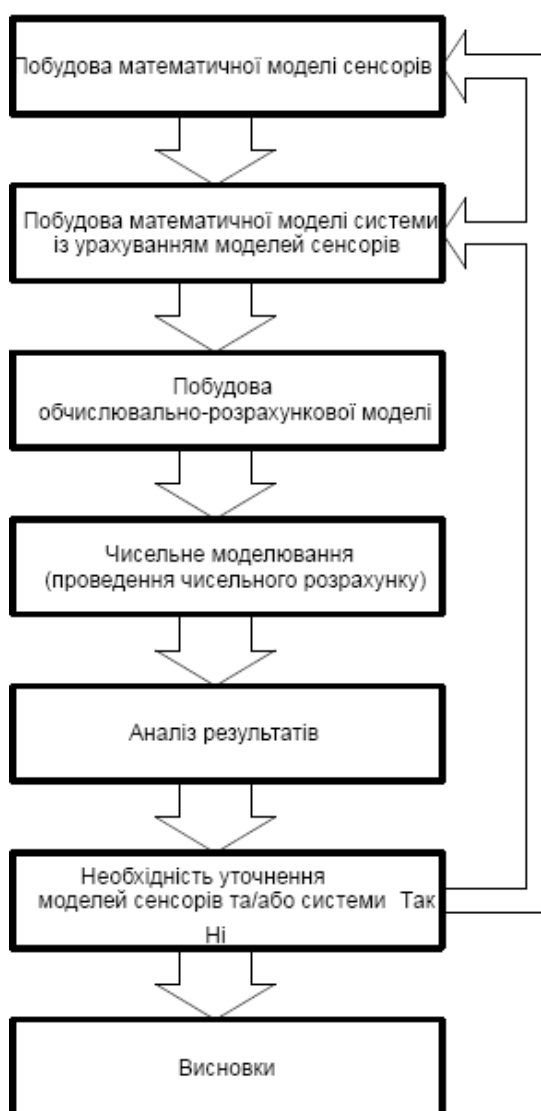


Рисунок 3.4 Інформаційно-структурна модель комплексного дослідження
ІНС

3.2 Обґрунтування вибору мікроелектромеханічних чутливих елементів для інерціальної системи орієнтації та навігації

Як зазначалося раніше – до складу БІНС можуть входити: датчики кутової швидкості та акселерометри.

Акселерометри у БІНС використовуються як для початкової виставки так і для реалізації алгоритму навігації. Параметри і характеристики акселерометрів важливі для синтезу та розробки адекватної системи, яка б задовольняла поставленим вимогам.

У якості ДКШ у БІНС можуть застосовуватися різні, за фізичним принципом, гіроскопи. Це можуть бути: двоступеневий поплавковий гіроскоп, динамічно налаштований гіроскоп, хвильовий твердотільний гіроскоп (коріолісовий гіроскоп), волоконно-оптичний гіроскоп, кільцевий лазерний гіроскоп та мікроелектромеханічний гіроскоп (МЕМС гіроскоп). Характеристики кожного із цих гіроскопів впливають на точність БІНС. До ключових характеристик гіроскопів можна віднести: діапазон вимірювання кутових швидкостей, зміщення нуля, нестабільність зміщення нуля (дрейф), чутливість показань до вібрації, лінійність характеристики, тип сигналу [91,97,98].

Серед різних гіроскопічних ЧЕ ІНС постає питання вибору гіроскопічного ЧЕ. Важливість та необхідність вибору гіроскопічного ЧЕ можна оцінити у дослідженні компанії Safran Electronics & Defense під час розробки БІНС для ракети-носія Ariane 6. Дослідники компанії провели порівняльний аналіз найпоширеніших гіроскопічних ЧЕ інерціальних систем, таких як: динамічно налаштовані гіроскопи (ДНГ), волоконні оптичні гіроскопи (ВОГ), кільцеві лазерні гіроскопи (КЛГ), хвильові твердотільні гіроскопи (ХТГ). Оцінили переваги та недоліки кожного із них і зробили наступні висновки [97]:

- Електромеханічні гіроскопи, наприклад двоступеневий поплавковий гіроскоп чи ДНГ на сьогоднішній день можна вважати морально застарілими;
- ВОГ широкоживані у цивільній авіації, а також поступово починають тестуватися та застосовуватися у бортових системах супутників та ракет-носіїв;

- КЛГ більше застосовуються у авіації спеціального призначення та є стандартом застосування у ракетно-космічній техніці;
- ХТГ знайшли своє застосування у супутниках із тривалим періодом функціонування та у апаратах далекої космічної навігації;
- МЕМС датчики – перспективні, однак на сьогодні не забезпечують необхідний рівень точності.

Висновки дослідження [97] показують, що використання МЕМС гіроскопів, а також і акселерометрів, мають значні перспективи та переваги: мінімальна ціна, мінімальні габарити, мінімальне енергоспоживання, можливість отримати на виході як аналоговий так і цифровий сигнал і відносно висока надійності. Однак необхідно зазначити – попри постійний розвиток мікроелектроніки точність мікроелектромеханічних датчиків, на даний момент, не досягає рівня точності середніх гіроскопів типу ВОГ чи КЛГ.

Виходячи з цього, використання МЕМС датчиків у складі автономного безпілотного підводного апарата потребує, як і будь-яких інших, чіткого математичного опису та проведення аналізу характеру вихідного сигналу для подальшого прийняття рішення щодо використання та впровадження цього датчика у склад системи.

Мікроелектромеханічні технології це надмініатюрні тривимірні механічні структури, які характеризуються: малою масою, малими габаритами, низьким енергоспоживанням, здатністю функціонувати в жорстких умовах експлуатації, невеликою вартістю в порівнянні з традиційними приладами [96,102-104].

У якості датчика кутової швидкості у системах орієнтації та навігації для автономного безпілотного підводного апарата класу Міні може застосовуватися мікромеханічний гіроскоп (ММГ). ММГ конструктивно виконаний у вигляді інтегрованої мікросхеми чи пристрою з розмірами до декількох десятків міліметрів. Топологія такої мікросхеми складається з напівпровідникових механічного чутливого елемента та електронних систем управління (підсилювачі, діоди, транзистори тощо) [96,102-104].

У загальному випадку відомі ММГ, умовно, діляться на два типи: роторні та осциляторні гіроскопи. Основою такого ділення є ознака, яка обумовлена характером первинного руху ЧЕ. У свою чергу, осциляторні гіроскопи діляться на два види: гіроскопи з зосередженими параметрами та гіроскопи із розподіленими параметрами [96,102-104].

3.3 Дослідження чутливих елементів інерціальної системи орієнтації та навігації

Параметри чутливих елементів впливають на якість роботи обчислювальних алгоритмів БІНС. Чим точнішими (тобто ближчими до реальних) будуть вихідні сигнали моделей датчиків тим якісніше можна оцінити вихідні сигнали ІНС та компенсувати параметри ЧЕ у алгоритмах роботи ІНС.

Для проведення дослідження та оцінювання характеристик ЧЕ БІНС у спеціалізованому середовищі MATLAB та SIMULINK розроблено імітаційні моделі акселерометра та гіроскопа.

3.3.1 Дослідження акселерометра

Акселерометр – чутливий елемент інерціальної системи навігації, який вимірює проекцію уявного прискорення на вісь чутливості. Подвійним інтегруванням значення вихідного сигналу акселерометра обчислюються швидкість та координати об'єкта на якому встановлено акселерометр.

Схема побудови БІНС на рис. 3.3, надає змогу використовувати як блок одновісних акселерометрів так і один тривісний акселерометр. Незважаючи на те який блок акселерометрів використовується усі акселерометри мають певні групи похибок. Однією із важливих похибок акселерометра є зміщення нуля. Зміщення нуля акселерометра впливає: при одноразовому інтегруванні на значення лінійної швидкості, дворазового інтегрування – на значення місцеположення. Оцінити значення похибки можна за наступною формулою [79,91,92,110]:

$$\delta_p = \iint b_a dt dt = \int b_a t dt = \frac{1}{2} b_a t^2, \quad (3.1)$$

де b_a - зміщення нуля акселерометра; δ_p - похибка визначення швидкості або координати; t – час руху.

Значення похибки залежить від значення зміщення нуля акселерометра, що є комплексною величиною, яка залежить від багатьох факторів.

Зазвичай ці похибки можна якісно оцінити провівши лабораторні дослідження. Однак, такі дослідження дуже витратні за часом їх проведення – у зв'язку із цим доцільно проводити такі дослідження чисельно та із використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій попередньо розробивши математичну та імітаційну модель прилада.

У роботах [111-114] наводиться така модель вихідного сигналу акселерометра:

$$a = (a_i + Na_i + B + k_c a_c + \nu) \left(1 + \frac{\Delta K}{K} \right), \quad (3.2)$$

де: a - вихідне прискорення датчика у м/сек²; a_i - вхідне прискорення у м/сек²; N - чутливість вісі до розбалансування, виражена у радіанах; B - зміщення нуля, виражено у відсотках від діапазону (span) прискорення; k_c - чутливість до перехресної вісі (може бути виражено у відсотках від a_c); a_c - прискорення перехресної вісі у м/сек²; ν - шум датчика (представлена щільністю, яка виражена у мкг/(Гц^{1/2})); K - масштабуючий коефіцієнт (може бути виражений у мВ/(м/сек²)); ΔK - похибка масштабуючого коефіцієнта (може бути виражена у відсотках від K).

Як показує залежність (3.2) – зміщення нуля залежить від діапазону вимірювання, а також від діапазону стабільності масштабного коефіцієнта. На основі характеру вихідного сигналу моделі акселерометра (3.2) можна оцінити значення впливу похибки.

Рівняння (3.2) описує модель вихідного сигналу одновісного акселерометра без урахування, які впливають на кінцеві показання датчика та не показують, як

коефіцієнти математичної моделі пов'язані із реальними коефіцієнти акселерометра, які наведено у технічному описі прилада [109].

Врахуємо в моделі (3.2) наявність впливу усіх перехресних осей, в результаті отримаємо модель вихідного сигналу акселерометра у вигляді [109].

$$a = (a_i + N_{xy}a_y + N_{xz}a_z + B + k_{xy}a_y + k_{xz}a_z + \nu) \left(1 + \frac{\Delta K}{K}\right) \quad (3.3),$$

де: $a(a_x)$ - вихідне прискорення датчика у м/сек² або g; a_i - вхідне прискорення, яке діє вздовж вісі чутливості у м/сек² або g; a_y, a_z - вхідне прискорення по осях Y та Z у м/сек² або g; N_{xy}, N_{xz} - чутливість вісей до розбалансування, виражена у радіанах (градусах); B - зміщення нуля, виражено у відсотках від діапазону (span) прискорення; k_{xy}, k_{xz} - чутливість до перехресних вісей (може бути виражено у відсотках від a_i); ν - шум датчика (представлена величиною спектральної щільності потужності, яка виражена у мкг/(Гц^{1/2}) ((мк м/сек²)/(Гц^{1/2}))); K - масштабуючий коефіцієнт (може бути виражений у мВ/(м/сек²), мВ/g, LSB/(м/сек²) або LSB/g у залежності від типу вихідного сигналу датчика); ΔK - похибка масштабуючого коефіцієнта (може бути виражена у відсотках від K).

Значення діапазону вимірювального прискорення (span) обчислюється різниця максимального та мінімального вимірювальних значень.

Розширивши математичну модель (3.3) можна отримати повну систему рівнянь, яка описує вихідні сигнали тривісного акселерометра [109]:

$$\begin{cases} a_x = (a_x + N_{xy}a_y + N_{xz}a_z + B + k_{xy}a_y + k_{xz}a_z + \nu) \left(1 + \frac{\Delta K}{K}\right) \\ a_y = (a_y + N_{yx}a_x + N_{yz}a_z + B + k_{yx}a_x + k_{yz}a_z + \nu) \left(1 + \frac{\Delta K}{K}\right) \\ a_z = (a_z + N_{zx}a_x + N_{zy}a_y + B + k_{zx}a_x + k_{zy}a_y + \nu) \left(1 + \frac{\Delta K}{K}\right) \end{cases} \quad (3.4)$$

Користуючись системою рівнянь (3.4) розроблено імітаційну модель тривісного акселерометра, яка зображена на рис. 3.5.

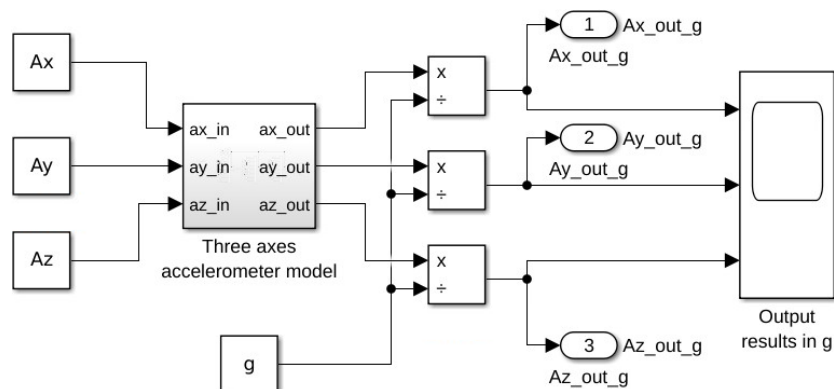


Рисунок 3.5 Імітаційна модель тривісного акселерометра у SIMULINK

Для перевірки працездатності імітаційної моделі розроблено керуючу програму, у якій ініціалізуються параметри акселерометра. Ці параметри зазвичай наведені та описані у технічній документації на виріб. Для прикладу та моделювання було використано параметри тривісного акселерометра ADXL 335 виробництва фірми Analog Devices [116]. Із технічної документації ADXL 335:

- Повний діапазон: $\text{span} = 3.6 - (-3.6) = 7.2$; – Measure range: ± 3.6 g;
- $K = 300$; – Sensitivity at X_OUT, Y_OUT, Z_OUT mV/g;
- $d_K = 60$; – $\Delta K = \text{Sensitivity_Max} - \text{Sensitivity_Min} = 330 - 270 = 60$;
- Зміщення нуля виражено у відсотках від повного діапазону та обчислено враховуючи особливості вихідного сигналу і живлення акселерометра: живлення акселерометра складає 3 вольти; акселерометр видає аналоговий сигнал напруги у вольтах від 0 вольт до 3 вольт, що відповідає показанням від -3.6g до +3.6g відповідно, для показання 0g вихідна напруга складає для вісей X та Y макс. 1,65 В, мін. 1.35 В, для вісі Z макс 1,8 В, мін. 1,2 В. Згідно із цим [109,116]:

Для вісей X та Y: $1.65 - 1.35 = 0.3$ (В), що складає 10% від вихідного діапазону напруги тобто 10% від повного діапазону вимірювального прискорення:

$$B_x = B_y = 0,1 * 7,2 = 0,72(g);$$

Для вісі Z: $1.8 - 1.2 = 0.6$ (В), що складає 20% від вихідного діапазону напруги тобто 20% від повного діапазону вимірювального прискорення:

$$B_z = 0,2 * 7,2 = 1,44(g);$$

1. $N = 0.1 \cdot \pi / 180$ – чутливість вісей до розбалансування (Interaxis Alignment Error) виражена у градусах, які переведені у радіани;

2. $k = 1 \cdot \text{span} / 100$ – чутливість до перехресних вісей (Cross-Axis Sensitivity) у % від повного діапазону прискорення;

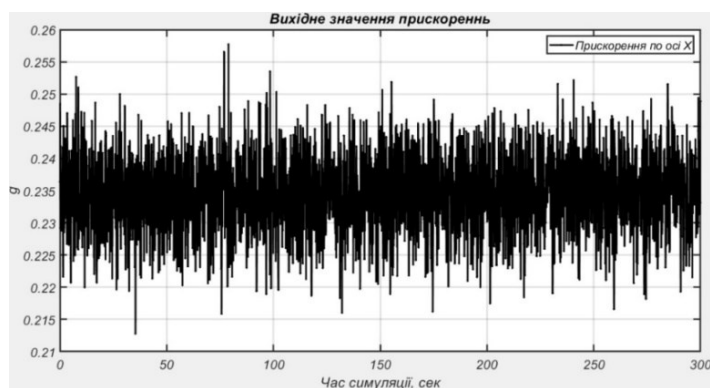
3. $\nu_x = \nu_y = 150 \cdot 10^{-6} \left(\frac{g}{\sqrt{G_u}} \right)$ ($\text{nu_xy} = 150 \cdot \text{power}(10, -6)$) – шум датчика (Noise Density) по осях X, Y; $\nu_z = 300 \cdot 10^{-6} \left(\frac{g}{\sqrt{G_u}} \right)$ ($\text{nu_z} = 300 \cdot \text{power}(10, -6)$) – шум датчика (Noise Density) по осі Z.

У загальному випадку коефіцієнти перехресної чутливості системи (3.4) можуть не дорівнювати один одному. Для простоти моделювання та у відповідності до технічного опису приладу було введено такі позначення та спрощення [109,116]:

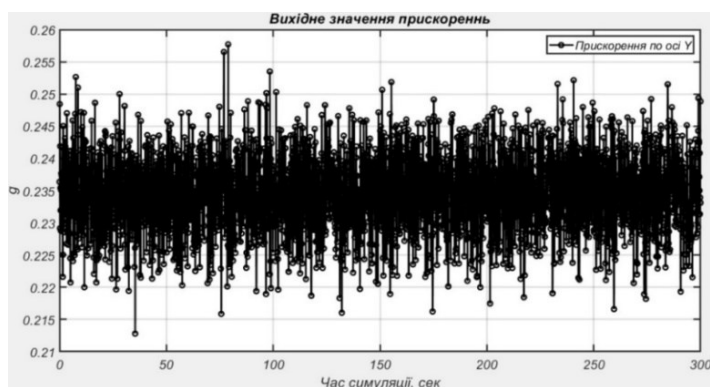
- $N_{xy} = N_{yx} = N_{xz} = N_{zx} = N_{yz} = N_{zy} = N$;
- $k_{xy} = k_{yx} = k_{xz} = k_{zx} = k_{yz} = k_{zy} = k$;

Вхідним діям керуючої програми – прискорення сили тяжіння, яке діє на території м. Києва та розраховане із урахуванням значень констант геодезичної опорної системи WGS1980 [109,117], параметри та коефіцієнти вхідного діяння мають такі значення: $g_0 = 9.78$ - Початкове прискорення сили тяжіння, м/сек²; $\varphi = 50.27^\circ$ - широта Києва; $\lambda = 30.30^\circ$ - довгота Києва; $\beta_1 = 0.0053024$ - гравітаційна константа 1 згідно із Geodetic Refernce System [109,117]; $\beta_2 = 5.8 \cdot 10^{-6}$ - гравітаційна константа 2 згідно із Geodetic Refernce System [109,117]; $s_2 = \sin^2 \varphi$ - множник 1; $s_{22} = \sin^2 2\varphi$ - множник 2; $K_h = 3.086 \cdot 10^{-6}$ - константа зміни барометричної висоти у 1/сек²; $H = 0$ – барометрична висота у метрах; $g = g_0 \cdot (1 + \beta_1 s_2 - \beta_2 s_{22}) - K_h H$ - вихідне прискорення сили тяжіння на обраній широті місця.

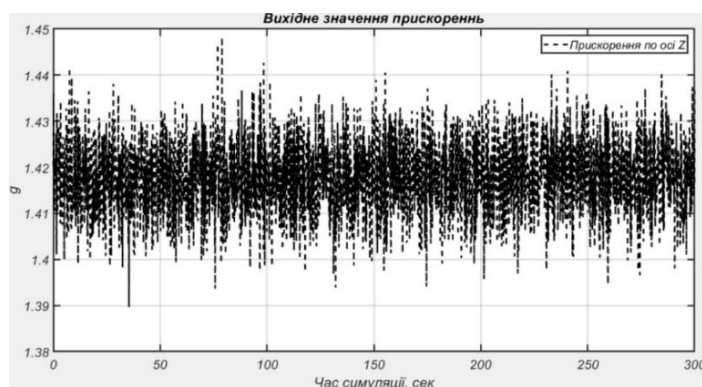
Результат роботи імітаційної моделі наведено на рис. 3.6.



а



б



в

Рисунок 3.6 Вихідні значення прискорення імітаційної моделі

а – Вихідне значення по осі X; *б* – Вихідне значення по осі Y; *в* – Вихідне значення по осі Z

Як видно із графіків вихідного сигналу моделі акселерометра:

1. При вхідному діянні $0g$ по осях X та Y, вихідні значення прискорень по цих осях становлять $0,235g$;
2. Вихідне значення прискорення по осі Z, при дії $1g$, становить $1,42g$.

Підтвердженням адекватності роботи розробленої математичної моделі (3.4) є порівняння отриманих значень із реальним дослідженням прилада.

Отримання реальних даних проводилося за схемою, яка зображена на рис. 3.7.

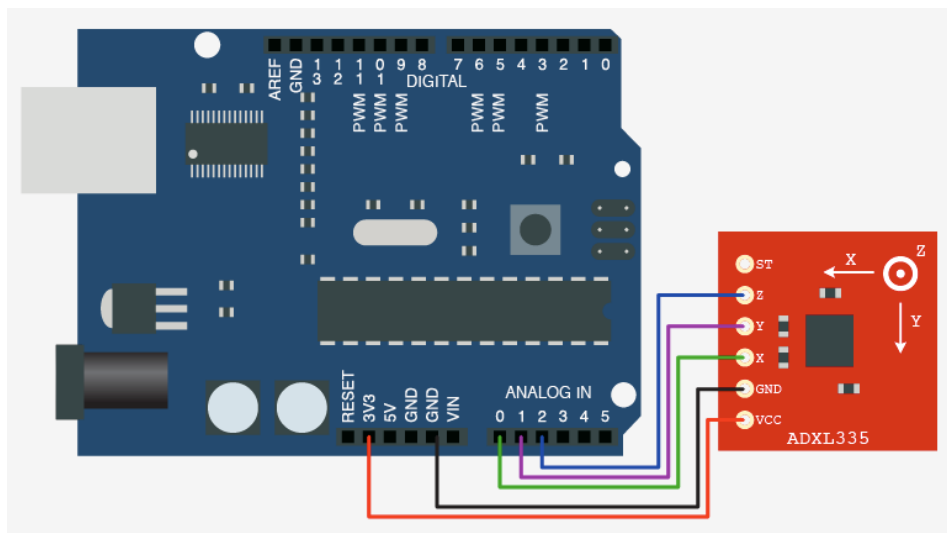
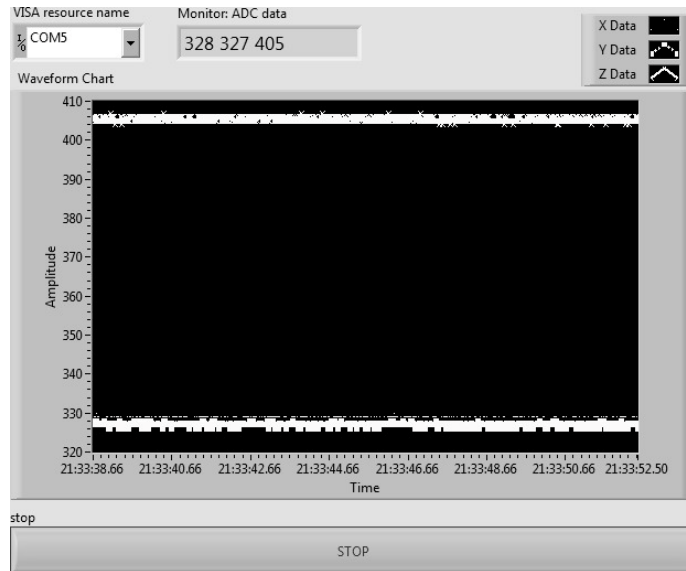


Рисунок 3.7 Схема підключення досліджуваного акселерометра до мікроконтролера

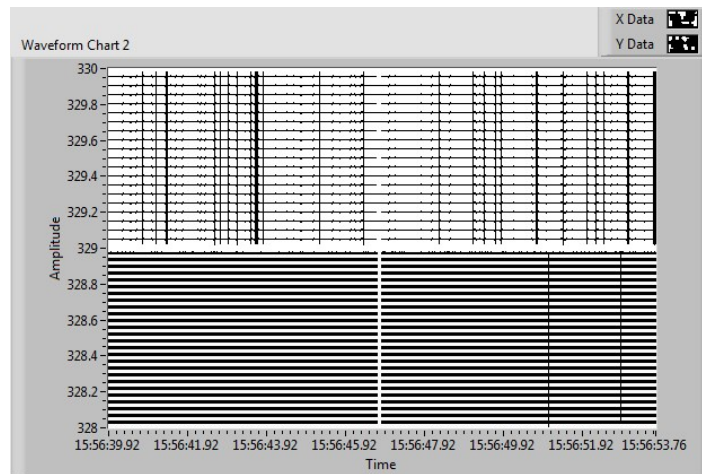
В свою чергу, мікроконтролер було під'єднано до персонального комп'ютера, на якому, за допомоги середовища LabVIEW розроблено віртуальний прилад для збору та відображення значень отриманих від акселерометра. У якості мікроконтролера використовувалася відладочна плата ARDUINO UNO в основі якої є мікроконтролер ATmega328 із вбудованими аналого-цифровими перетворювачами розрядністю 10 біт.

Тестову установку було спозиціоновано таким чином аби вісь Z була спрямована вертикально вниз у напрямку дії сили тяжіння. Вісі X Y ортогональні до вісі Z та не сприймають дію прискорення сили тяжіння. Вхідним діянням для акселерометра є прискорення сили тяжіння, яка діє на території Києва.

На рис. 3.8 зображено реальні («сирі») значення, тобто необроблені вихідні значення аналого-цифрового перетворення (АЦП) вихідних сигналів акселерометра [109].



a



б

Рисунок 3.8 Вихідні значення прискорення вимірюного акселерометром після АЦП

a – Загальна віртуальна панель;

б – Віртуальна панель із значеннями по осях X (верхній графік) та Y (нижній графік)

Отримані дані потребують перерахунку від значень коду АЦП до значень g або прискорення (м/сек^2) який було за такою емпіричною формулою [109]:

$$A_{out} = \frac{\frac{ADC_{out} V_{ref}^{ADC}}{2^n - 1} - \frac{V_{Sup}^{ADC}}{2}}{Sensitivity}, \quad (3.5)$$

де: A_{out} - розраховане вихідне значення прискорення у м/сек² або g; ADC_{out} - вихідне значення АЦП; V_{ref}^{ADC} - опорна напруга АЦП; V_{Sup}^{ADC} - напруга живлення акселерометра, яка береться із технічної документації, у даному випадку ця напруга складає 3 В; n – розрядність (бітність) АЦП; Sensitivity – чутливість акселерометра, яка береться із технічної документації.

Як зазначалось раніше АЦП має 10-бітну розрядність. Напруга живлення мікроконтролера а відповідно і АЦП 5 Вольт. На графіках, які наведено на рис. 3.8, спостерігаються коливання показників у межах одного біта, що може бути обумовлене шумовими характеристиками прилада. Для поточного розрахунку візьмемо мінімальне значення для кожної із вісей і за (3.5) розрахуємо вихідне значення прискорення для типового та максимального значення параметру Sensitivity, а результати порівняльного аналізу наведемо в табл. 3.1 та табл. 3.2:

- Для типового значення Sensitivity = 0.3

$$A_x = \frac{\frac{329 \cdot 5}{2^{10} - 1} - \frac{3}{2}}{0.3} = 0.34 \text{ g}; \quad A_y = \frac{\frac{328 \cdot 5}{2^{10} - 1} - \frac{3}{2}}{0.3} = 0.33 \text{ g}; \quad A_z = \frac{\frac{406 \cdot 5}{2^{10} - 1} - \frac{3}{2}}{0.3} = 1.61 \text{ g};$$

Таблиця 3.1 Значення прискорення за результатами експерименту та імітаційного моделювання при Sensitivity = 0.3

	<i>Імітаційна модель</i>	<i>Експеримент</i>	<i>Похибка у %</i>
Прискорення по X у g	0,235	0,34	50
Прискорення по Y у g	0,235	0,33	50
Прискорення по Z у g	1,42	1,61	13

- Для максимального значення Sensitivity=0.33

$$A_x = \frac{\frac{329 \cdot 5}{2^{10} - 1} - \frac{3}{2}}{0.33} = 0.313 \text{ g}; \quad A_y = \frac{\frac{328 \cdot 5}{2^{10} - 1} - \frac{3}{2}}{0.33} = 0.297 \text{ g}; \quad A_z = \frac{\frac{406 \cdot 5}{2^{10} - 1} - \frac{3}{2}}{0.33} = 1.467 \text{ g};$$

Таблиця 3.2 Значення прискорення за результатами експерименту та імітаційного моделювання при Sensitivity = 0.33

	<i>Імітаційна модель</i>	<i>Експеримент</i>	<i>Похибка у %</i>
Прискорення по X у g	0,235	0,313	32
Прискорення по Y у g	0,235	0,297	32
Прискорення по Z у g	1,42	1,467	3

Порівняння значень результату роботи імітаційної моделі чутливого елемента із отриманими значеннями реального прилада показує адекватність та працездатність розробленої моделі. Розроблена математична та імітаційна моделі акселерометра можуть використовуватися для проведення комплексного дослідження як БІНС так і систем керування рухомими об'єктами у тому числі і АБПА [109,113].

3.3.2 Дослідження гіроскопа

Вихідний сигнал МЕМС гіроскопа, у порівнянні із сигналом акселерометра, має дві важливі групи похибок. Перша група – детерміновані похибки, такі як зміщення нульового сигналу та нелінійність. Такі похибки можуть бути виправлені калібруванням або правильним вибором масштабуючого та перехідного коефіцієнтів. Друга важлива група похибок – стохастичні процеси. Як правило стохастичні процеси – непередбачувані, до яких відносяться: шум квантування, нестабільність нульового сигналу (bias instability), випадкове блукання кута (angle random walk), дрейф кутової швидкості та випадкове блукання кутової швидкості (rate random walk). У більшості випадків такі шумові процеси проявляються як повільна зміна параметрів у часі. Оцінити таку зміну можна за формулою [79,84]:

$$\delta\theta = \int b_g dt = b_g t \quad (3.6)$$

де b_g - некомпенсоване зміщення вихідного сигналу кутової швидкості гіроскопа.

Формула (3.6) показує, що некомпенсоване зміщення вихідного сигналу призводить до створення похибки у визначені кута, яка пропорційна часу [79,84,91,92,96,110].

Відповідно до (3.6) невеликий кут похибки орієнтації призводить до хибного проектування прискорення на вісі опорної СК, що в свою чергу призводить до похибки визначення проекції прискорення, яка оцінюється величиною $\delta a = g \sin(\delta\theta) \approx g\delta\theta \approx gb_g t$, де g – прискорення вільного падіння.

$$\delta_p = \iint gb_g t dt dt = \int \frac{1}{2} gb_g t^2 dt = \frac{1}{6} gb_g t^3 \quad (3.7)$$

Залежність (3.7) показує – зміщення нуля гіроскопа (ДКШ) призводить до похибки визначення лінійної швидкості, яка пропорційна квадрату часу та похибки визначення місцезнаходження, яка пропорційна часу у третьому ступені [79,84,91,92,96,110].

Подібно до акселерометра ці похибки якісно та кількісно оцінюються шляхом лабораторних досліджень. Такі лабораторні дослідження, у порівнянні із дослідженнями акселерометра займають, що найменше, у двічі більше часу. Для визначення параметрів гіроскопа чи ДКШ особливо доцільно проводити такі дослідження шляхом чисельного моделювання із використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій попередньо розробивши математичну та імітаційну модель прилада.

У роботі [114,118] наведено приклад моделі вихідного сигналу гіроскопічного датчика кутової швидкості.

$$\omega = (\omega_i + Sa_r + B + \nu) \left(1 + \frac{\Delta K}{K} \right), \quad (3.8)$$

де: ω - вихідна кутова швидкість, виміряна датчиком зазвичай вимірюється у рад/сек, також може бути вимірювана у °/г або у °/сек – залежить від масштабуючого коефіцієнта; ω_i - вхідна кутова швидкість у рад/сек; S - чутливість до прискорення a_r , яке прикладене в довільному напрямку (може бути виражено у (°/сек)/g); B - зміщення нуля, виражено у відсотках від діапазону (span)

прискорення; a_r - прискорення у довільному напрямку у м/сек²; ν - шум датчика (представлена спектральної щільністю потужності, яка виражена у (рад/сек)/(Гц^{1/2}) або (°/сек)/(Гц^{1/2})); K - масштабуючий коефіцієнт (може бути виражений у мВ/(рад/сек)); ΔK - похибка масштабуючого коефіцієнта (може бути виражена у відсотках від K);

Недоліками моделі (3.8) [114,118] є обмеженість у вхідних параметрах та коефіцієнтах моделі. Залежність (3.8) моделює одновісний датчик кутової швидкості без урахування прискорень по відповідних вісях, а також не враховує перехресну чутливість кутових швидкостей.

Доповнюючи модель (3.8) значеннями перехресної чутливості від кутових швидкостей ортогональних вісей та чутливістю до прискорень отримаємо наступну залежність, яка описує вихідний сигнал одновісного датчика кутової швидкості.

$$\omega = \left(\omega_i + M_{xy}\omega_y + M_{xz}\omega_z + B_\omega + k_{xx}^\omega a_x + k_{xy}^\omega a_y + k_{xz}^\omega a_z + \nu_i^\omega \right) \left(1 + \frac{\Delta K}{K} \right), \quad (3.9)$$

де: $\omega(\omega_x)$ - вихідна кутова швидкість датчика у °/сек (або рад/сек); ω_i - вхідна кутова швидкість, яка діє вздовж вісі чутливості у °/сек (або рад/сек); ω_y, ω_z - вхідна кутова швидкість по осях Y та Z у °/сек (або рад/сек); M_{xy}, M_{xz} - коефіцієнт перехресного зв'язку (може бути виражений у відсотках від діапазону вимірювання); B_ω - зміщення нуля, виражено у відсотках від діапазону (span) вимірювання; $k_{xx}^\omega, k_{xy}^\omega, k_{xz}^\omega$ - чутливість до прискорення, якщо значення рівне то позначається як k^ω (може бути виражено у (°/сек)/g); ν_i^ω - шум датчика (представлена густиною, яка виражена у (°/сек)/(Гц^{1/2})); K - масштабуючий коефіцієнт (може бути виражений у мВ/(°/сек), мВ/(рад/сек), LSB/(°/сек) або LSB/(рад/сек) у залежності від типу вихідного сигналу датчика); ΔK - похибка масштабуючого коефіцієнта (може бути виражена у відсотках від K);

Значення діапазону вимірювання кутової швидкості (span) обчислюється як різниця максимального та мінімального вимірювального значень.

Розширюючи та доповнюючи математичну модель (3.9) отримаємо повну систему рівнянь, для проекцій кутової швидкості тривісного гіроскопа:

$$\begin{cases} \omega_x = \left(\omega_i^x + M_{xy} \omega_y + M_{xz} \omega_z + B_\omega + k_{xx}^\omega a_x + k_{xy}^\omega a_y + k_{xz}^\omega a_z + v_x^\omega \right) \left(1 + \frac{\Delta K}{K} \right) \\ \omega_y = \left(\omega_i^y + M_{yx} \omega_x + M_{yz} \omega_z + B_\omega + k_{yx}^\omega a_x + k_{yy}^\omega a_y + k_{yz}^\omega a_z + v_y^\omega \right) \left(1 + \frac{\Delta K}{K} \right), \\ \omega_z = \left(\omega_i^z + M_{zx} \omega_x + M_{zy} \omega_y + B_\omega + k_{zx}^\omega a_x + k_{zy}^\omega a_y + k_{zz}^\omega a_z + v_z^\omega \right) \left(1 + \frac{\Delta K}{K} \right) \end{cases} \quad (3.10)$$

У загальному випадку значення шуму $v_x^\omega, v_y^\omega, v_z^\omega$ відмінні один від одного.

Як показує практика та досвід використання гіроскопічних сенсорів у системах інерціальної навігації – найбільш поширеним є використання одновісних гіроскопів, які розташовуються ортогонально і створюють блок орієнтації. Таке використання одновісних гіроскопів обумовлене мінімізацією похибок вихідного сигналу датчика. Доцільно розглянути роботу одновісного гіроскопа за математичним описом (3.9).

Користуючись залежністю (3.9) розроблено імітаційну модель одновісного гіроскопа, яка зображена на рис. 3.9.

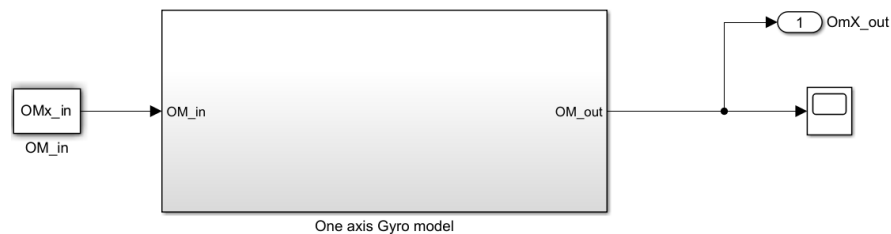


Рисунок 3.9 Імітаційна модель одновісного гіроскопа у SIMULINK

Перевірки адекватності роботи імітаційної моделі здійснюється шляхом порівняння вихідних розрахованих значень із реальними каліброваними значеннями реального прилада. Параметри для ініціалізації моделі взяті із технічного опису прилада. Для прикладу, досліджувався одновісний гіроскоп ADXRS610 (ADXRS300) виробництва фірми Analog Devices [119]. У відповідності до технічної документації ADXRS610:

- Повний діапазон: $\text{span} = 300 - (-300) = 600$; – Measure range: ± 300 °/сек;
- $K = 6$; – Sensitivity, mV/(°/сек);
- $d_K = 0,96$; – $\Delta K = \text{Sensitivity_Max} - \text{Sensitivity_Min} = 6,48 - 5,52 = 0,96$ mV/(°/сек);

• Зміщення нуля виражено у % від повного діапазону. Зміщення нуля обчислюється враховуючи особливості вихідного сигналу та живлення гіроскопа: живлення гіроскопа складає 5 вольт; гіроскоп видає аналоговий сигнал напруги у вольтах від 0 вольт до 5 вольт, що відповідає показанням від -300 °/сек до +300 °/сек відповідно. У відповідності до живлення прилада та технічного опису [119]:

Нульове вихідне значення: $2.8 - 2.2 = 0.6$ (В), що складає 12% від вихідного діапазону напруги тобто 12% від повного діапазону вимірювання кутової швидкості: $B_\omega = B = 0,12 * 600 = 72$ (°/сек);

4. $M = 0.1 * \text{span} / 100$ – коефіцієнт перехресного зв'язку (Nonlinearity) виражено у відсотках від повного діапазону вимірювання;

5. $k = 0.1 * a_x / 100$ – дрейф від g (Linear Acceleration Effect) у (°/сек)/g);

6. $\nu_i^\omega = 5000 * 10^{-6} \left(\frac{^\circ / \text{сек}}{\sqrt{Hz}} \right)$ ($\text{nu_om} = 5000 * \text{power}(10, -6)$) – шум датчика (Noise Density).

У загальному випадку коефіцієнти перехресного зв'язку (3.9) можуть не дорівнювати один одному. Для простоти моделювання та у відповідності до технічного опису приладу було введено наступні позначення та спрощення [119]:

- $M_{xy} = M_{yx} = M_{xz} = M_{zx} = M_{yz} = M_{zy} = M$;
- $k_{xx}^\omega = k_{xy}^\omega = k_{xz}^\omega = k_{yx}^\omega = k_{yy}^\omega = k_{yz}^\omega = k_{zx}^\omega = k_{zy}^\omega = k_{zz}^\omega = k^\omega$;

У якості вхідного діяння керуючої програми буде виступати чисельне значення кутової швидкості та прискорення сили тяжіння, яке діє на території Києва, розраховане із урахуванням значень констант геодезичної опорної системи WGS1980, параметри якої наведено у п.3.4.1 [91,92,109,117]. Чисельне дослідження проводиться для нульової вхідної кутової швидкості із обчисленням зміщення нуля

та його подальшим урахуванням для проміжку вхідних кутових швидкостей у діапазоні від -100 °/сек до $+100$ °/сек із кроком 20 °/сек.

На рис. 3.10 показано чистий розрахунковий вихідний сигнал моделі гіроскопа.

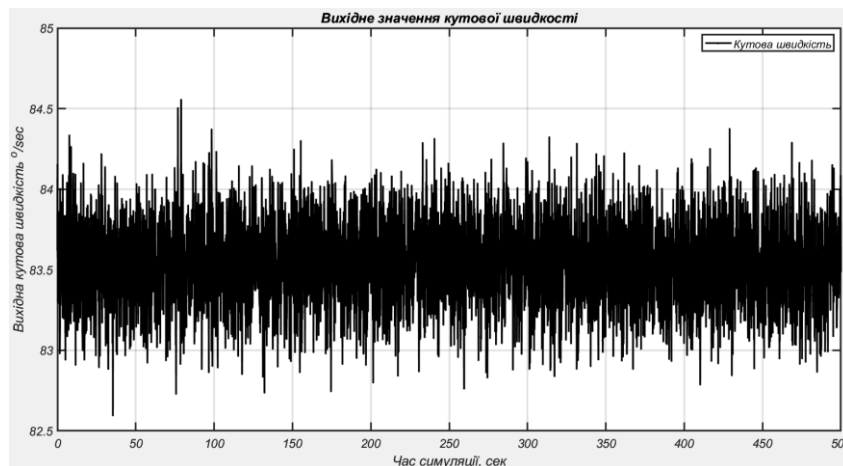


Рисунок 3.10 Розрахунковий вихідний сигнал гіроскопа при нульовій вхідній кутовій швидкості

Як видно із графіка, рис. 3.10, вихідне значення ДКШ при нульовій вхідній кутовій швидкості становить $83,5$ °/сек – що дорівнює значенню зміщення нуля вихідного сигналу гіроскопа.

На рис. 3.11 наведено центрований нульовий сигнал кутової швидкості при дії нульового значення вхідної кутової швидкості.

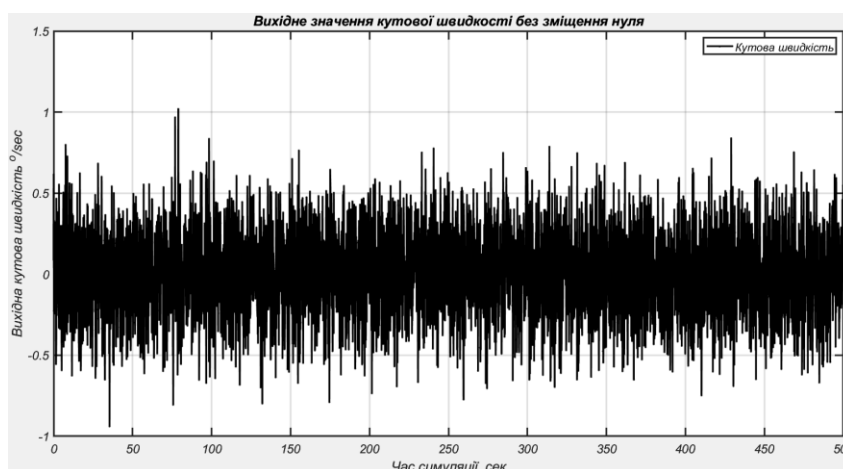


Рисунок 3.11 Нульовий сигнал вихідної кутової швидкості із компенсацією зміщення нуля прилада

Експериментальне дослідження реального прилада проведено за допомогою лабораторного обладнання: оптичної ділильної головки, яка застосовується для визначення коефіцієнтів дрейфу від g та малогабаритної обертової установки, яка застосовується для калібрування гіроскопа, імітуючи точну кутову швидкість у обраному діапазоні. Тестовий зразок зібрано у вигляді готового модуля, який зображено на рис. 3.12 та попередньо відкалібровано.

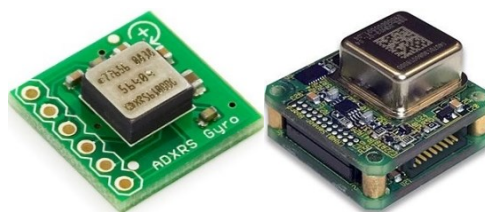


Рисунок 3.12 Зразок мікробірки досліджуваного прилада ADXRS600 із окремою платою датчика та окремою платою живлення і мікроконтролера

Процедури калібрування широковідомі та досліджені і описані у роботах [79,84,88,90-92,94]. На рис. 3.13 наведено графік значень ідеальної вихідної кутової швидкості, виміряної кутової швидкості та розрахункової кутової швидкості.

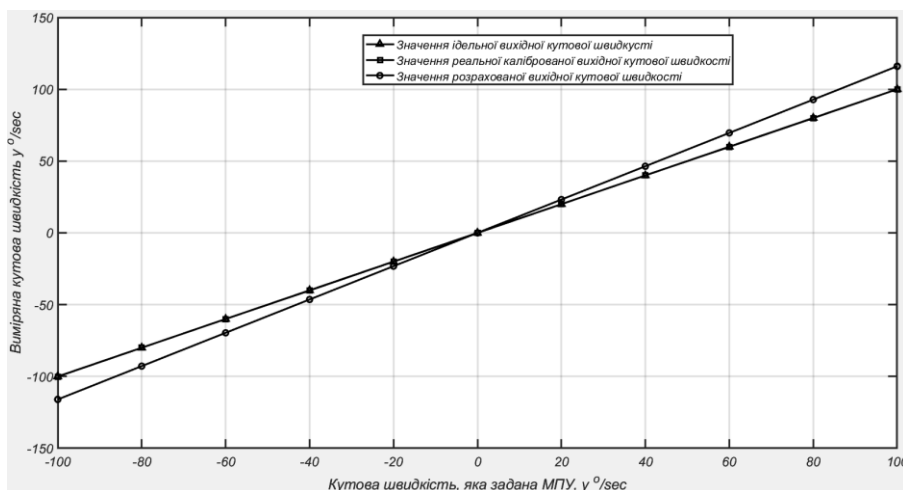


Рисунок 3.13 Графіки значень ідеальної, реальної та розрахункової кутових швидкостей ADXRS610

Як видно із графіка, на рис. 3.13, похибка, між ідеальною та реально виміряною кутовими швидкостями, має мінімальне значення. Похибка між розрахунковими значеннями та реальними у діапазоні вимірювань становить 16%. Слід врахувати, що досліджуваний датчик попередньо був відкалібрований.

Результати роботи математичної моделі (3.9) та її імітаційної моделі рис. 3.9 дають підставу для розробки імітаційної моделі тривісного гіроскопа на основі математичної моделі (3.10). Імітаційну модель тривісного гіроскопа зображено на рис. 3.14.

Математичний опис (3.10) та імітаційна модель на рис. 3.14 можуть бути застосовані, коли розглядається та досліджується тривісний MEMС гіроскоп, який інтегровано у мікросхему. Наприклад для оцінки ефективності роботи гіроскопа типу MAX21000 3-Axis Digital Output Gyroscope або IAM-20380 компанії TDK InvenSense.

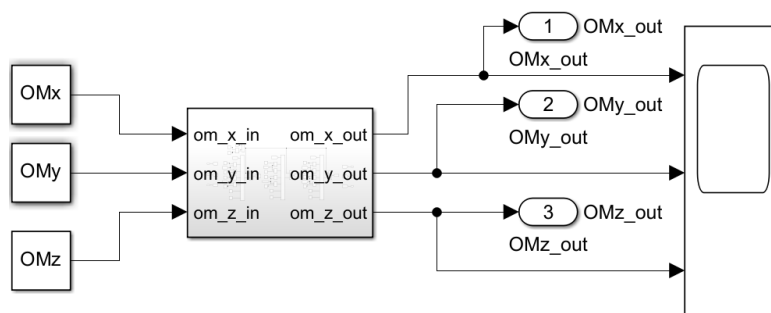


Рисунок 3.14 Імітаційна модель тривісного гіроскопа у SIMULINK

Аналіз графіків значень ідеальної, реальної та розрахункової кутових швидкостей показує – розроблена математична та імітаційна моделі мають адекватні значення та придатні до використання у комплексному дослідженні ІНС для АБПА із застосуванням MEMС технологій.

3.4 Кінематичні рівняння орієнтації інерціальних навігаційних систем

Основою роботи є математичний апарат, який описує орієнтацію об'єкта у просторі, тобто описує зв'язану систему координат відносно географічної системи.

У системі БІНС цю задачу виконує система БІСО (безплатформна інерціальна система орієнтації). Інформація про просторове положення об'єкта використовується як безпосередньо при керуванні рухом об'єкта, так і для визначення проекцій вектору прискорення із подальшим вирішенням навігаційної задачі шляхом подвійного інтегрування [79,82].

Розрахунок кінематичних параметрів орієнтації у БІСО може бути реалізовано різними способами у залежності від характеру руху об'єкта [82,83]. Такими способами можуть бути обрахунки із використанням кутів Ейлера, Ейлера-Крилова, різноманітні вектори орієнтації, матриця напрямних косинусів, параметри Родріга-Гамільтона [82,83,91-96]. Суть алгоритмів БІСО полягає у використанні проекцій кутової швидкості обертання зв'язаної із об'єктом СК, які виміряні датчиками кутової швидкості (гіроскопами, ДКШ) БІНС. Знаючи проекції кутової швидкості – розробляється кінематичні рівняння орієнтації, які після проведення інтегрування визначають поточну просторове положення об'єкта відносно географічної СК. Для проведення інтегрування необхідно знати початкові значення певних величин. Такі початкові значення отримуються системою від сигналів ДКШ та акселерометрів а також можуть задаватися аналітично.

У відповідності до схеми, яка зображена на рис. 3.4, одним із основних блоків навігаційної системи є блок визначення параметрів орієнтації. Визначення параметрів орієнтації відбувається шляхом обрахунку кінематичних рівнянь орієнтації [79-83,91-96,110]. У інерціальних навігаційних системах використовуються наступні рівняння орієнтації:

1. Рівняння орієнтації Ейлера (Ейлера-Крилова);
2. Рівняння орієнтації Пуассона;
3. Вектор повороту Ейлера;
4. Кватерніонні рівняння орієнтації.

Між цими кінематичними рівняннями є зв'язок і можливо перейти від одного типу рівняння до іншого. Однак, застосування кожного рівняння орієнтації обумовлене як динамікою та характером руху об'єкта так і обчислювальними потужностями мікроконтролера чи мікропроцесора. Розглянемо кожне із цих

рівнянь орієнтації та визначимо найбільш оптимальне для реалізації у бортовому обчислювачі навігаційної системи АБПА.

3.4.1 Рівняння орієнтації Ейлера (Ейлера-Крилова)

Рівняння орієнтації Ейлера або Ейлера-Крилова є найбільш поширеною формою кінематичних рівнянь. Ці кінематичні рівняння подані через кути послідовних поворотів Ейлера або Ейлера – Крилова [79-85,91-96]. Порядок подання повороту через кути повороту не є визначеним, у цьому випадку форма кінематичних рівнянь визначається послідовністю поворотів і також не є єдиною.

Перевагою кінематичних рівнянь орієнтації Ейлера (Ейлера-Крилова) є зрозумілий фізичний і наочний сенс подання поворотів, а також мінімальна кількість параметрів, яка відповідає кількості ступенів вільності.

Недоліком кінематичних рівнянь орієнтації Ейлера (Ейлера-Крилова) – при куті диферента $\vartheta = \pm 90^\circ$ відбувається виродження однієї із ступенів вільності, що унеможливорює однозначне визначення інших кутів. Також, до недоліків можна віднести неможливість складання поворотів та лінійність рівнянь, у разі коли діапазон зміни кутів значно менший 1 радіана.

3.4.2 Рівняння орієнтації Пуассона (матриця напрямних косинусів)

Рівняння орієнтації Пуассона заснована на теоремі диференціювання вектора у рухомій системі координат [83,92]:

$$\frac{da}{dt} = \frac{\tilde{a}}{dt} + \omega^P \times a, \quad (3.15)$$

де $\frac{\tilde{a}}{dt}$ - локальна похідна вектора **a** (швидкість відносно рухомої СК), ω^P - вектор абсолютної кутової швидкості.

Проводячи математичні перетворення на основі (3.15) отримаємо диференціальне рівняння:

$$\frac{dC_P^{SP}}{dt} = C_P^{SP} (\omega_P^{PS} \times) \quad (3.16)$$

Диференціальне матричне рівняння (3.16) і є рівнянням Пуассона.

Перевагою використання матриці напрямних косинусів та рівнянь орієнтації Пуассона є пристосованість до обчислення проекцій прискорення об'єкта, матричне подання, що може бути легко обчислене у бортовому обчислювачі об'єкта.

Недоліком використання матриці напрямних косинусів та рівнянь орієнтації Пуассона є необхідність вводити 9 параметрів, які представляють поворот.

3.4.3 Вектор повороту Ейлера (вектор орієнтації Ейлера)

Проблему виродження рівнянь орієнтації у кутах Ейлера-Крилова можна частково вирішити застосувавши опис повороту об'єкта у вигляді вектора повороту.

Для цього поворот зображають у вигляді вектор-стовпця та застосовують процедуру інтегрування вектора у обертовій системі координат. Вектор повороту Ейлера відомий та вивчений метод знаходження кутів орієнтації, який детально описано та розглянуто у таких роботах як [82,83,122]. Наведемо переваги та недоліки застосування такого методу.

Перевагою застосування вектора повороту Ейлера — мала кількість параметрів та наочне подання повороту об'єкта.

Недоліком застосування вектора повороту Ейлера є непристосованість проведення процедури проєціювання прискорень об'єкта, відсутність складання поворотів та виродження вектора.

3.4.4 Кватерніонні рівняння орієнтації

Кватерніон – гіперкомплексне число із трьома уявними одиницями. Кватерніонні рівняння орієнтації добре відомі та описані у [79-83,91-96]. Наведемо переваги та недоліки застосування кватерніонних рівнянь орієнтації.

Переваги застосування кватерніонного рівняння орієнтації: мала кількість параметрів, існує правило складання поворотів, існує зв'язок із іншими параметрами та рівняннями орієнтації.

Недолік застосування кватерніонного рівняння орієнтації: відсутня наочність подання повороту об'єкта, одне кутове положення об'єкта описується двома кватерніонами \mathbf{Q} та $-\mathbf{Q}$ [79-83,91-96,123].

Для реалізації алгоритму визначення орієнтації будуть використовуватися кінематичні рівняння Пуассона [79-83,91-96]. Використання рівнянь Пуассона, як зазначалося у пп.3.4.2, легко подаються у матричному вигляді та із легкістю можуть бути реалізовані у обчислювальному програмному середовищі MATLAB та можуть бути легко імплементовані у схему, яка розробляється у SIMULINK.

3.5 Синтез та імітаційне моделювання інерціальної системи орієнтації та навігації

У п.3.1, п.3.3 та п.3.4 було наведено схеми побудови інерціальних систем орієнтації та навігації, моделі основних чутливих елементів інерціальної системи орієнтації та навігації та відповідно рівняння, які реалізують обчислення орієнтації. Отримані результати цих напрацювань можна використати для синтезу повного алгоритму повноцінної безплатформної інерціальної навігаційної системи для застосування у АБПА класу Міні.

Рівняння навігації будемо розробляти на основі другого закону Ньютона. У відповідності до якого: вектор абсолютного прискорення центра мас об'єкта

виражається через вектор усіх рівнодіючих прикладених до тіла сил \mathbf{F} та масу цього об'єкта m [79-81,91-96,118,120].

$$W = \frac{F}{m} \quad (3.17)$$

Сила \mathbf{F} є сумою всіх діючих на тіло активних сил $\mathbf{F}_{акт}$ (сила тяги, гідродинамічна сила і т.п.) та сил гравітаційної взаємодії \mathbf{G} тіл, тоді залежність (3.17) можна записати у наступному вигляді:

$$W = \frac{F_{акт} + G}{m} \quad (3.18)$$

Відношення $\frac{F_{акт}}{m}$ - це питома сила, яка називається уявним прискоренням і позначається вектором \mathbf{a} . Відношення $\frac{G}{m} = g_{грав}(R, h, \varphi)$ - гравітаційне прискорення об'єкта, яке визначається геопотенціалом у даній точці і залежить від геоцентричного радіуса Землі R (інколи вектор місцеположення), висоти функціонування h та широти φ [79-81,91-96,118,120]. Абсолютне прискорення \mathbf{W} , із іншого боку, можна виразити, як другу похідну від зміни геоцентричного місцеположення радіус-вектора \mathbf{R} :

$$W = \frac{d^2 R}{dt^2} \quad (3.19)$$

Підставляючи вираз (3.19) у співвідношення (3.18) та враховуючи усі припущення, отримаємо:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = a + g_{грав}(R, h, \varphi) \quad (3.20)$$

Залежність (3.20) – основне рівняння інерціальної навігації, основі якого розробляються алгоритми функціонування для всіх типів ІНС, і яке надає змогу визначити радіус-вектор місцеположення \mathbf{R} (відповідно координати об'єкта) та похідні від радіус-вектора (відповідно швидкість та прискорення об'єкта) на основі векторів \mathbf{a} (показання акселерометра) та $g_{грав}(\mathbf{R}, h, \varphi)$ – розрахункових значень на основі параметрів Землі.

Вектор уявного прискорення \mathbf{a} , як правило, вимірюється трьома ортогонально розташованими акселерометрами. Гравітаційне прискорення $\mathbf{g}_{\text{грав}}(\mathbf{R}, h, \varphi)$, зазвичай, задається у вигляді відомої функції від радіус-вектора \mathbf{R} та широти місця φ для конкретно обраної моделі Землі [79-81,91-96,110].

Для реалізації та простоти обчислень у бортовому обчислювачі рівняння (3.20) подаються у формі Коші.

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \mathbf{a} + \mathbf{g}_{\text{грав}}(\mathbf{R}, h, \varphi) \\ \frac{d\mathbf{R}}{dt} = \mathbf{V} \end{cases} \quad (3.21)$$

де \mathbf{V} – вектор абсолютної швидкості руху об'єкта.

Для кожного із рівнянь системи (3.21) застосуємо теорему про диференціювання вектора у рухомій системі координат, отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{d\tilde{V}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{V} \\ \frac{d\mathbf{R}}{dt} = \frac{d\tilde{\mathbf{R}}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{R} \end{cases} \quad (3.22)$$

де $\frac{d\tilde{V}}{dt}$ та $\frac{d\tilde{\mathbf{R}}}{dt}$ - локальні похідні від \mathbf{R} та \mathbf{V} , у базисі що обертається із кутовою швидкістю $\boldsymbol{\Omega}$. Вектор $\boldsymbol{\Omega}$ - абсолютна кутова швидкість координатного базиса (тригранника). Координатний базис, у загальному випадку, обирається у відповідності до характеру руху об'єкта під час проектування об'єкта та системи.

У практиці розробки навігаційних систем, у якості базової системи координат, прийнято обирати географічну систему координат $O\xi\eta\zeta$. Географічна СК характеризується такими параметрами: широта φ , довгота λ та висота h .

Оскільки ортогонально розташовані акселерометри вимірюють проекції прискорення, яке складається із $\frac{d\tilde{V}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{V}$ розрахуємо проекції кутової швидкості обертання Землі у географічному базисі [79-81,91-96,118,120]:

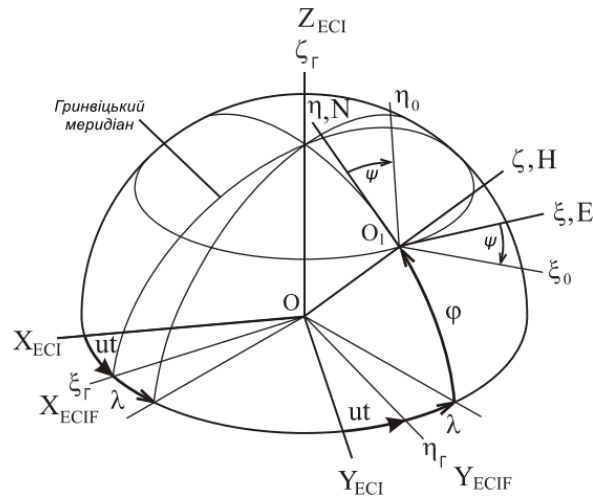


Рисунок 3.15 Кінематична схема визначення проєкцій кутової швидкості обертання Землі

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\xi} = -\dot{\zeta} \quad \frac{V_{\eta}}{R_3} = -\frac{V \cos \psi}{R_3} \\ \omega_{\eta} = (u + \dot{\lambda}) \cos \varphi + \frac{V \sin \psi}{R_3} = \frac{V_E}{R_3} = \frac{V_{\xi}}{R_3} \\ \omega_{\zeta} = (u + \dot{\lambda}) \sin \varphi + \frac{V \sin \psi}{R_3} \tan \varphi = \frac{V_{\xi}}{R_3} \tan \varphi = \omega_{\eta} \tan \varphi \end{array} \right. \quad (3.23)$$

де $R_3 = 6378.137$ км – радіус Землі, V – швидкість руху об'єкта, $u = 7.27 * 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$ – кутова швидкість обертання Землі, $\varphi, \dot{\zeta}$ – широта та швидкість зміни широти місцеположення, $\dot{\lambda}$ – швидкість зміни довготи місцеположення.

Розкриємо перше рівняння системи (3.22) у проєкціях, отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{\xi} = \frac{d\tilde{V}}{dt} + \omega_{\eta} V_{\zeta} - \omega_{\zeta} V_{\eta} \\ W_{\eta} = \frac{d\tilde{V}}{dt} + \omega_{\zeta} V_{\xi} - \omega_{\xi} V_{\zeta} \\ W_{\zeta} = \frac{d\tilde{V}}{dt} + \omega_{\xi} V_{\eta} - \omega_{\eta} V_{\xi} \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Зауважимо: $V_{\xi} = V_E + u R_3 \cos \varphi$. Підставимо (3.23) у (3.24):

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{\xi} = \dot{V} \quad \sin \varphi + \omega_{\zeta} + (u \cos \varphi + \frac{V \sin \psi}{R_3}) V_{\zeta} \\ W_{\eta} = \dot{V} \quad \sin \varphi + \omega_{\zeta} + R_3 u^2 \cos \varphi \sin \varphi + \frac{V_N V_{\zeta}}{R_3} \\ W_{\zeta} = \dot{V} \quad \frac{(\sin \psi)^2 + (V \sin \psi)^2}{R_3} - 2Vu \cos \varphi \sin \psi - R_3 u^2 \cos^2 \varphi \end{array} \right. \quad (3.25)$$

З іншого боку – показання акселерометра у проекціях на вісі об'єкта мають наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_x = a_x + g_x \\ W_y = a_y + g_y \\ W_z = a_z + g_z \end{array} \right. \quad (3.26)$$

Матричним перемноженням (3.26) на матрицю напрямних косинусів отримаємо значення прискорень, які будуть інтегруватися у навігаційному блоці БІНС АБПА:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{\xi} = (a_x + g_x)(\cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \vartheta \sin \psi) - (a_y + g_y) \cos \vartheta \sin \psi + \\ + (a_z + g_z)(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \vartheta \sin \psi) \\ W_{\eta} = (a_x + g_x)(\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \sin \vartheta \cos \psi) + (a_y + g_y) \cos \vartheta \cos \psi + \\ + (a_z + g_z)(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \vartheta \sin \psi) \\ W_{\zeta} = -(a_x + g_x) \sin \gamma \cos \vartheta - (a_y + g_y) \sin \vartheta + (a_z + g_z) \cos \vartheta \cos \gamma \end{array} \right. \quad (3.27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_N = \int_0^t (a_y - (u \sin \varphi + \omega_{\zeta}) V_E + V_{\zeta} \omega_{\xi}) dt \\ V_E = \int_0^t (a_x + (u \sin \varphi + \omega_{\zeta}) V_N - V_{\zeta} (u \cos \varphi + \omega_{\eta})) dt \\ V_{\zeta} = \int_0^t (a_z + (u \cos \varphi + \omega_{\eta}) V_E - V_N \omega_{\xi} + g_z) dt \end{array} \right. \quad (3.28)$$

$$\omega_{\xi} = -\frac{V_N}{R_3}; \omega_{\eta} = \frac{V_E}{R_3} + U \cos \varphi; \omega_{\zeta} = \frac{V_E}{R_3} \operatorname{tg} \phi + u \sin \varphi$$

$$\varphi = \int_0^t \frac{V_N}{R_3} dt, \lambda = \int_0^t \frac{V_E}{R_3 \cos \varphi} dt, h = \int_0^t V_{\zeta} dt$$

Враховуючи обрану схему побудови БІНС на рис. 3.3, алгоритми орієнтації та навігації, розроблено імітаційну модель у середовищі SIMULINK, яка враховує моделі основних чутливих елементів системи та компенсує значення характеристик датчиків.

Імітаційна модель зображено на рис. 3.16

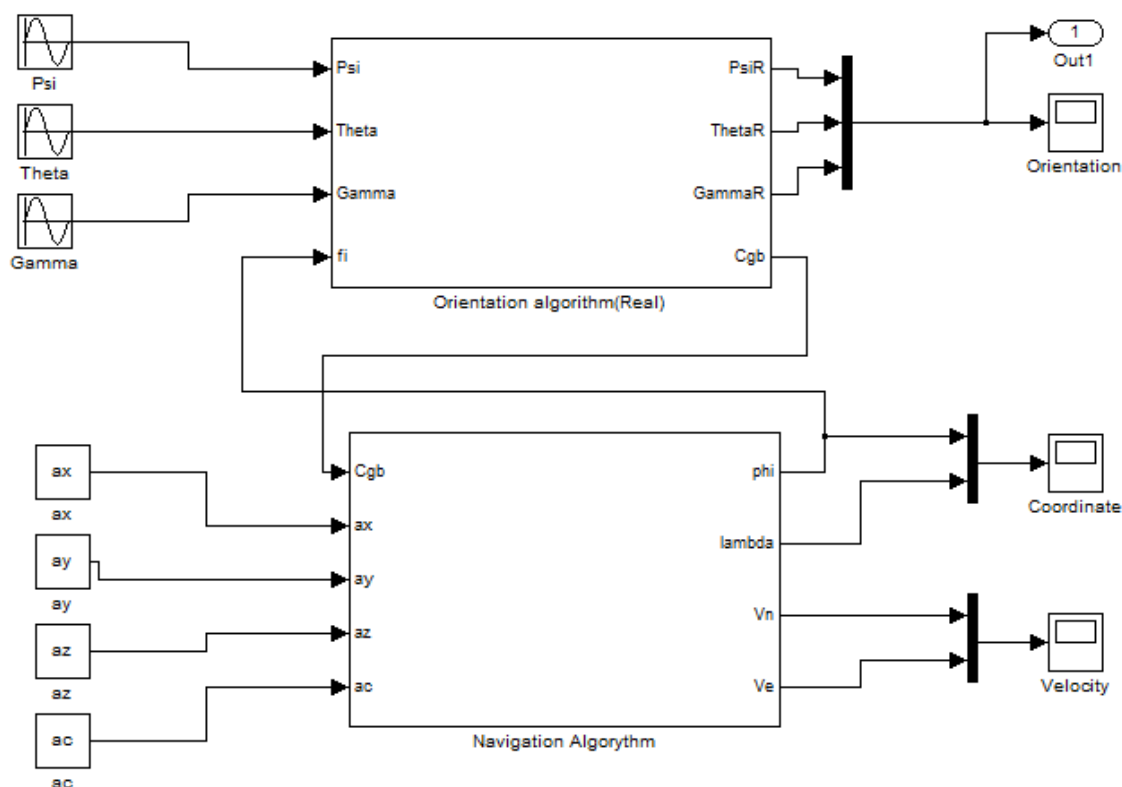


Рисунок 3.16 Імітаційна модель БІНС

Блоки орієнтації та навігації показано на рис. 3.17 та рис. 3.18 відповідно.

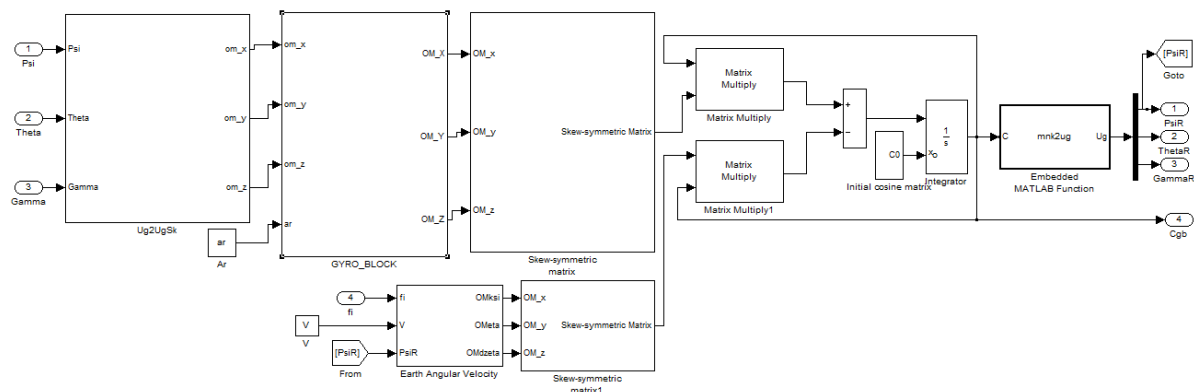


Рисунок 3.17 Блок визначення кутів орієнтації

Блок визначення кутів орієнтації на вході сприймає значення проекцій кутової швидкості, яка виміряна датчиками кутової швидкості. Далі проводиться інтегрування рівнянь Пуассона та на виході отримуються значення кутів орієнтації та значення матриці напрямних косинусів, яка використовується у навігаційному блоці для визначення проекцій прискорення.

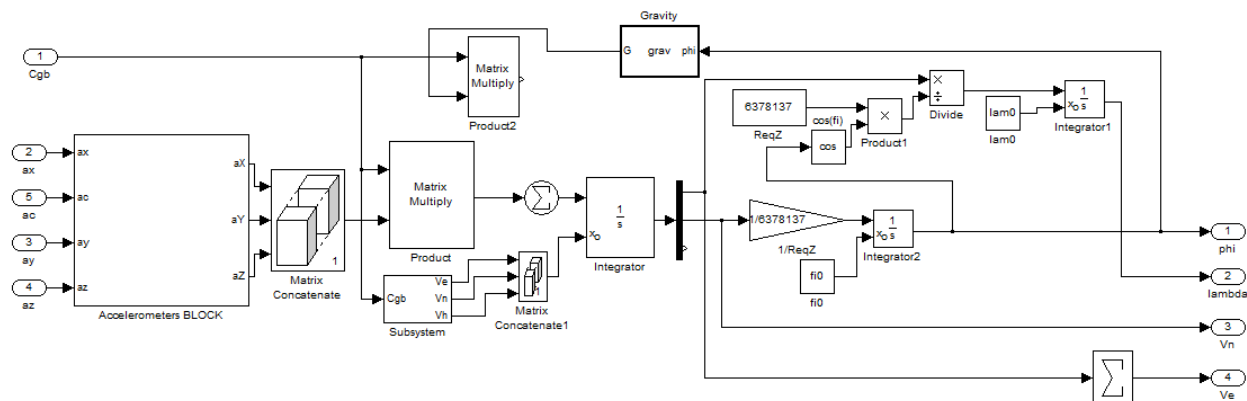


Рисунок 3.18 Блок визначення параметрів навігації

Інтегрування в БІНС відбувалося чисельним методом Ейлера першого порядку дослідженим у роботі [82].

Моделювання будемо проводити для таких умов:

- Початкові координати: довгота 30° , широта 60° , висота над рівнем моря 0 м;
- Швидкість руху об'єкта 2,5 м/с;
- Моделювання відбувається при різних сталих значеннях напрямку руху (кут курсу): 0° , 30° , 45° , 90° , 180° , 270° та 360° ;
- Тривалість руху одна година;
- Інерційні датчики: тривісний акселерометр ADXL 335 та три одновісних ортогонально розташованих гіроскопа ADXRS610;

Вихідними значеннями системи є: швидкість руху (північний напрям та східний напрям), координати (довгота та широта), кути орієнтації (кут курсу – yaw, кут диференту – pitch та кут крену – roll), вихідні величини, які показано на рис. 3.16, також будуть оцінюватися похибки інтегрування, похибки визначення кутів орієнтації, швидкості та координат. Значення вертикального каналу оцінюватися не будуть через його нестабільність.

На рис. 3.19 наведено часові реалізації зазначених вище вихідних величин та похибок, отриманих при моделюванні БІНС для руху АБПА курсом 0^0 . Результати моделювання БІНС у вигляді часових реалізацій при інших сталих значеннях напрямку руху (кут курсу: 30^0 ; 45^0 ; 90^0 ; 180^0 ; 270^0 та 360^0) наведено в Додатку Г.

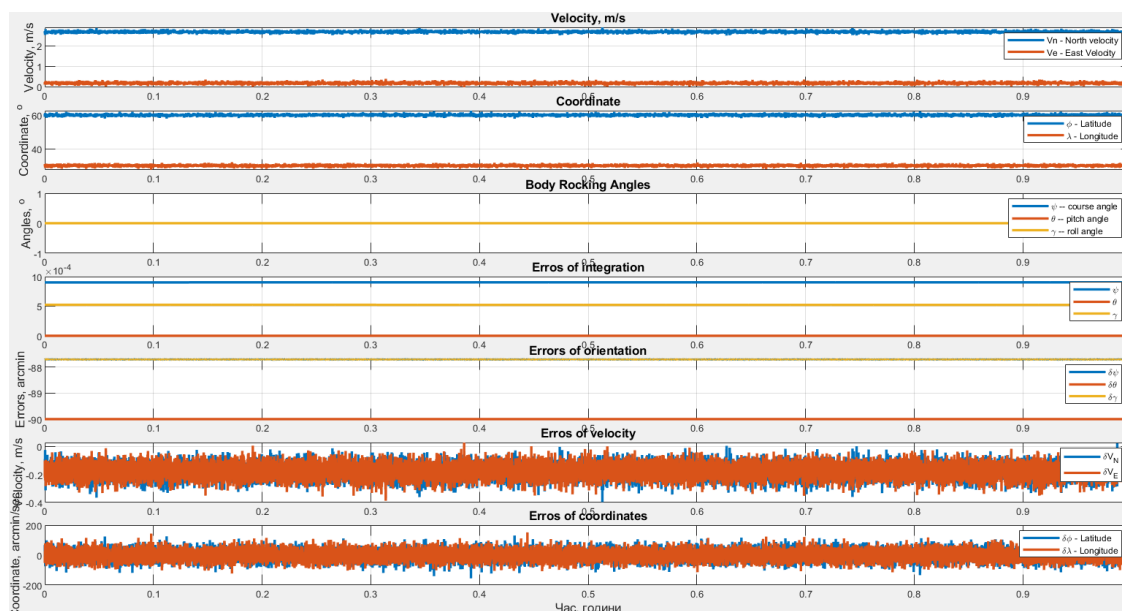


Рисунок 3.19 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 0^0

Як видно з наведених на рис. 3.19 результатів, має місце сталий рух об'єкту зі швидкістю $V_N=2,65$ м/с у північному напрямку та $V_E=0,15$ м/с у східному напрямку. Спостерігається прогнозована зміна за координатою по широті. Похибки визначення швидкості складають $-0,15$ м/с і коливаються у межах шумової складової акселерометра. Похибка визначення координат складає 150 кутових секунд. Похибки інтегрування кутів орієнтації складають 85 кутових хвилин за кутом курсу і крену та 90 кутових хвилин за кутом диференту.

У табл. 3.3 наведено значення швидкості та оцінок похибок, отриманих в результаті проведеного моделювання для різних значень кута курсу.

Таблиця 3.3 Результати моделювання БІНС

Кут курсу	V_N м/с	V_E м/с	δV_N м/с	δV_E м/с	$\delta \varphi$, кут. с	$\delta \lambda$, кут. с	$\delta \psi$, кут.хв.	$\delta \theta$, кут.хв.	$\delta \gamma$, кут.хв.
0^0	2,65	0,15	-0,15	-0,15	150	150	85	90	85

<i>Кут курсу</i>	<i>V_N, м/с</i>	<i>V_E, м/с</i>	<i>δV_N, м/с</i>	<i>δV_E, м/с</i>	<i>$\delta\varphi$, кут. с</i>	<i>$\delta\lambda$, кут. с</i>	<i>$\delta\psi$, кут.хв.</i>	<i>$\delta\theta$, кут.хв.</i>	<i>$\delta\gamma$, кут.хв.</i>
30°	2,36	1,3	-0,2	-0,05	150	150	85	90	85
45°	2	1,75	-0,2	0,0	150	150	85	90	85
90°	0,15	2,65	-0,15	0,15	150	150	85	90	85
180°	-2,65	-0,15	0,15	0,15	150	150	85	90	85
270°	-0,15	-2,65	0,15	-0,15	150	150	85	90	85
360°	2,65	0,15	-0,15	-0,15	150	150	85	90	85

Аналіз наведених в табл. 3.3 результатів показав, що визначення швидкості руху об'єкта відповідає розрахунковим значенням у межах похибки датчика прискорення, похибка визначення координат складає 150 кутових секунд, що при русі протягом однієї години зі швидкістю 2,5 м/с відповідає похибці у 150 метрів, похибки визначення кутів при інтегруванні складають не більше 90 кутових хвилин що обумовлене алгоритмом інтегрування.

Проведено моделювання БІНС для швидкості руху АБПА 2,5 м/с, для кута курсу 0°, 30, 45°, 90°, 180°, 270° та 360°, тривалість руху 1 година з урахуванням впливу хитами об'єкта за кутами крену та диференту із частотою 3 Гц та амплітудою 10° за кутом крену та амплітудою 5° за кутом диференту із урахуванням параметрів інерціальних датчиків тривісного акселерометра ADXL 335 та трьох одновісних ортогонально розташованих гіроскопів ADXRS610.

Часову реалізацію вихідних сигналів БІНС та оцінок похибок при русі курсом 0° з бічними коливаннями амплітудою 10° за креном та амплітудою 5° за диферентом наведено на рис. 3.20. Результати моделювання БІНС у вигляді часових реалізацій при інших сталих значеннях напрямку руху (кут курсу: 30°; 45°; 90°; 180°; 270° та 360°) наведено в Додатку Г.

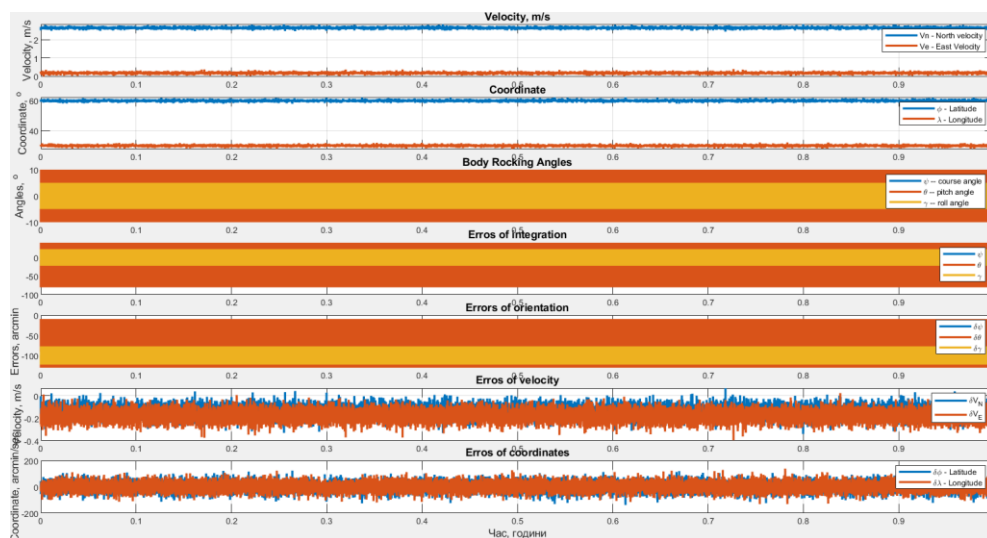


Рисунок 3.20 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 0° та із бічними коливаннями із амплітудою 10° за креном, амплітудою 5° за диферентом

Як видно з наведених на рис. 3.19 часових реалізацій вихідних сигналів, має місце сталий рух об'єкту зі швидкістю $V_N=2,65$ м/с у північному напрямку та $V_E=0,15$ м/с у східному напрямку. Спостерігається прогнозована зміна за координатою по широті. Похибки визначення швидкості складають $-0,15$ м/с і коливаються у межах шумової складової акселерометра. Похибка визначення координат складає 150 кутових секунд. Похибки інтегрування кутів орієнтації складають 95 кутових хвилин за кутом крену та 75 кутових хвилин за кутом диференту.

У табл. 3.4 наведено значення швидкості та оцінок похибок, отриманих в результаті проведеного моделювання з урахуванням впливу хитаவிці при різних значеннях кута курсу.

Таблиця 3.4 Результати моделювання БІНС при впливі хитаவிці

Кут курсу	V_N , м/с	V_E , м/с	δV_N , м/с	δV_E , м/с	$\delta \varphi$, кут. с	$\delta \lambda$, кут. с	$\delta \psi$, кут.хв.	$\delta \theta$, кут.хв.	$\delta \gamma$, кут.хв.
0°	2,65	0,15	-0,15	-0,15	150	150	75	75	95
30°	2,36	1,3	-0,2	-0,05	150	150	75	95	75
45°	2	1,75	-0,2	0,0	150	150	75	95	75

<i>Кут курсу</i>	V_N , <i>м/с</i>	V_E , <i>м/с</i>	δV_N , <i>м/с</i>	δV_E , <i>м/с</i>	$\delta \varphi$, <i>кут. с</i>	$\delta \lambda$, <i>кут. с</i>	$\delta \psi$, <i>кут.хв.</i>	$\delta \theta$, <i>кут.хв.</i>	$\delta \gamma$, <i>кут.хв.</i>
90 ⁰	0,15	2,65	-0,15	0,15	150	150	75	95	75
180 ⁰	-2,65	-0,15	0,15	0,15	150	150	75	95	75
270 ⁰	-0,15	-2,65	0,15	-0,15	150	150	75	95	75
360 ⁰	2,65	0,15	-0,15	-0,15	150	150	75	75	95

Аналіз наведених в табл. 3.4 результатів показав, що вплив хитавиці апарата не впливає на визначення швидкості та координат.

Таким чином, порівняльний аналіз отриманих результатів моделювання БІНС свідчить про стабільність роботи та працездатність обраної схеми БІНС, яка враховує значення характеристик датчиків для їх компенсації. Похибки визначення координат та швидкості не перевищують похибок обраних сенсорів. Слід зауважити, що для забезпечення більш тривалого функціонування необхідно здійснювати корегування показань один раз на одну годину роботи, наприклад за супутниковою системою позиціонування [79,91,92], шляхом сплиття на глибину меншу ніж 0,5 метра для СНС. Додатково корекція показань БІНС може здійснюватися: за кутом курсу по магнетометрах, за швидкістю по гідродинамічному лагу, а для показань по вертикальному каналу – за дачиком глибини або ехолотом. Також, для підвищення точності та стабільності роботи, необхідно використовувати калібрування ЧЕ та алгоритми комплексування систем на основі оптимальної фільтрації за Калманом, а також використання багатокрокових методів інтегрування, що зменшують алгоритмічну похибку [79,82,84,88,92,122,125].

Висновки по Розділу 3

1. На основі проведеного аналізу способів та схем побудови безплатформних інерціальних навігаційних систем для використання в АБПА обрано схему побудови БІНС на акселерометрах та гіроскопах, перевагою якої є можливість

застосовування чутливих елементів різного фізичного принципу дії та комбінування чутливих елементів для отримання найбільш точних вихідних даних.

2. У якості чутливих елементів БІНС використані інерційні сенсори на основі мікроелектромеханічних технологій (акселерометри та гіроскопи), які можуть забезпечити вимоги мінімізації габаритів, зменшення енергоспоживання, а у подальшому - необхідну точність та стабільність роботи для забезпечення довготривалого функціонування об'єкта.

3. Обґрунтовано та розроблено імітаційні моделі акселерометра та гіроскопа, які враховують параметри сигналу, живлення датчиків та інші характеристики які наводяться у технічному описі, проведено їх чисельне дослідження, в результаті якого встановлено:

- Імітаційна модель акселерометра враховує усі параметри, які можуть бути важливими при дослідженні акселерометра, ці параметри отримуються із технічного опису приладу та використовуються в моделі, що створює повний цифровий опис приладу. Вихідний сигнал імітаційної моделі відрізняється від сигналу реального датчика не більше ніж на 32%. Значення у 32 % може бути обумовлене неякісним тестовим обладнанням, проте таке значення є прийнятним при оцінці та дослідженні моделі датчика та подальшим її застосуванням у комплексному дослідженні БІНС;

- Імітаційна модель гіроскопа, враховує його основні параметри, які отримуються із технічного опису приладу та вносяться у модель, що створює цифровий опис датчика. Вихідні дані імітаційної моделі при дослідженні на проміжку від $-100^\circ/\text{сек}$ до $+100^\circ/\text{сек}$ на 16% відрізняються від даних отриманих для реального сенсора. Розроблена модель надає змогу оцінити шумові характеристики гіроскопа за методом варіації Аллана. Похибка у 16% є прийнятним результатом, який дозволяє застосовувати дану модель для комплексного дослідження БІНС.

4. На основі аналізу алгоритмів орієнтації обрано алгоритм матриці напрямних косинусів та кінематичних рівнянь орієнтації Пуассона, як такий, який показує наочність поворотів, має однозначний опис зв'язаної із об'єктом СК та

легко застосовується для знаходження проекцій векторів уявного прискорення, вимірюваних акселерометрами, а також відносно легко реалізується у бортовому обчислювачі БІНС.

5. Створено імітаційну модель безплатформної інерціальної навігаційної системи, яка дозволяє проводити дослідження із урахуванням параметрів та характеристик основних чутливих елементів (акселерометри та гіроскопи). Проведено моделювання БІНС, в результаті якого встановлено:

- Імітаційна модель БІНС працює адекватно;
- Точність роботи системи при різному напрямку руху та хитах об'єкта при швидкості об'єкта $V=2,5$ м/с знаходиться у межах похибки датчиків. Похибка визначення координат складає 150 кутових секунд, що дорівнює похибці місцеположення у 150 метрів. Час функціонування системи на МЕМС елементах складає одну годину, що є прийнятним результатом для автономного безпілотного підводного апарата класу Міні.

Обрані рівняння орієнтації та навігації, а також метод інтегрування показують адекватні результати та стабільність роботи і придатні до застосування у реальній системі БІНС на МЕМС датчиках.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Як зазначено у [1-4,5,6,124-127] – виконання завдання, яке поставлено перед АБПА (огляд портів або корпусів суден, дослідження корисних копалин на дні, проведення пошукових робіт тощо) вимагає високої та стабільної точності переміщення у просторі. При цьому, точність переміщення залежить не тільки від систем визначення просторового положення та місцезнаходження (орієнтації та навігації, БІНС), а також і від якості системи керування, яка використовується.

Для забезпечення відповідних характеристик керування АБПА основі огляду існуючих систем керування потрібно обґрунтувати та розробити систему управління, яка найбільше буде відповідати АБПА як об'єктові керування так і задовольняти вимогам точності та якості перехідних процесів.

4.1 Автономний безпілотний підводний апарат як об'єкт управління

Існуючі системи управління АБПА: гідроакустична та кабельна – найбільш поширені та широко використовуються, проте ці системи вимагають значних витрат та допоміжних елементів, що призводить до нагромадження та ускладнення функціоналу системи у цілому та збільшенню витрат на розробку системи. Також традиційні системи висувають вимоги до кваліфікації технічного персоналу, що обслуговує та проводить моніторинг технічного стану та забезпечує функціонування комплексу АБПА.

У зв'язку із таким положенням найбільш оптимальною та доцільною системою є автоматична система управління [128,129,134,136].

До автоматичної системи управління відносяться апаратно-програмні, програмні та алгоритмічні рішення, які забезпечують відповідне керування АБПА до поставлених завдань [128,129,134,136].

Сучасну автоматичну систему управління автономним безпілотним підводним апаратом класу Міні можна зобразити функціональною схемою, яку наведено на рис. 4.1 [129].

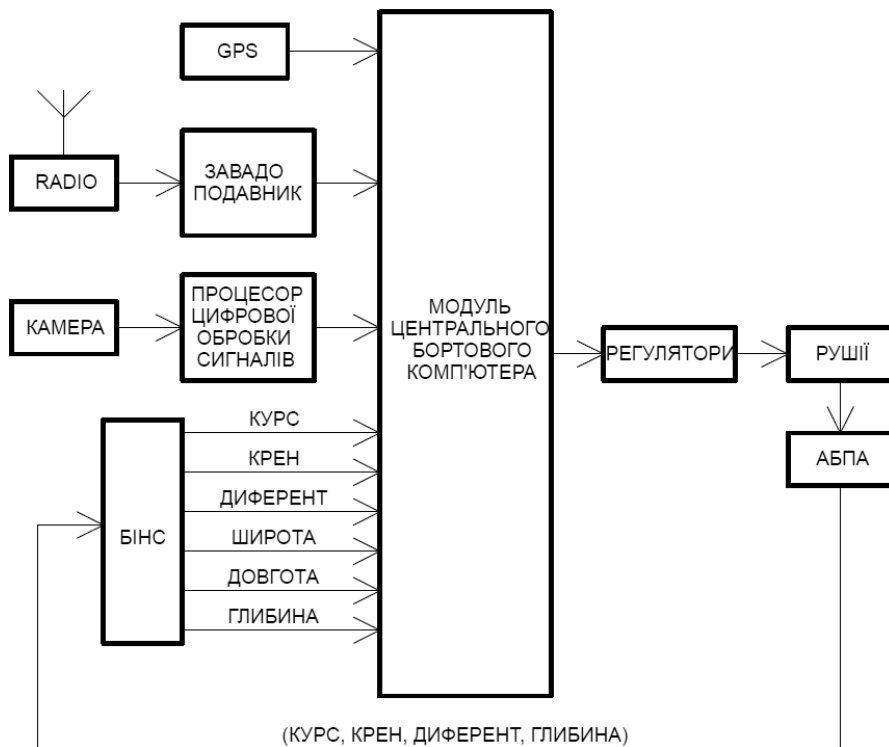


Рисунок 4.1 Функціональна схема системи автоматичного керування АБПА

Схема управління, яка зображена рис. 4.1, у своєму складі має інерціальну навігаційну систему, радіохвильову систему із спеціальною захищеною від завад антеною для забезпечення зв'язку та передачі вагомих даних, коли об'єкт знаходиться на глибині менше 10 метрів, та для корекції місцеположення під час надводного плавання (разом із системою GPS), та камеру із процесором для цифрової обробки образів. Застосування камери та цифрової обробки зображень та сигналів надає змогу використовувати алгоритми машинного зору, що забезпечать більш високоточне маневрування та додання перешкод під час виконання місій [62,128,129,134,136].

Функціональна схема на рис. 4.1 надає загальне уявлення про концепт апарата та його здатність бути маневровим та багатоцільовим об'єктом. Однак, перш ніж розробляти певні алгоритмічні та програмні рішення для АБПА, а також

виконувати підбір відповідної апаратури (рушії, рульові поверхні, редуктори тощо), яка буде використана для безпосереднього керування об'єктом, необхідно розглянути та дослідити апарат як об'єкт управління.

Розгляд та дослідження апарата як об'єкта управління розпочнемо із формування рівнянь руху.

Рухи АБПА описується системою із шести рівнянь: три рівняння сили та три рівняння моментів сил, які описують плоско-паралельний рух АБПА та обертовий рух АБПА [15,57,59,124-126,141-142]. Система рівнянь динаміки руху АБПА розроблена із використанням системи координат, яку наведено на рис. 4.2, а самі рівняння описані у [125,126,142].

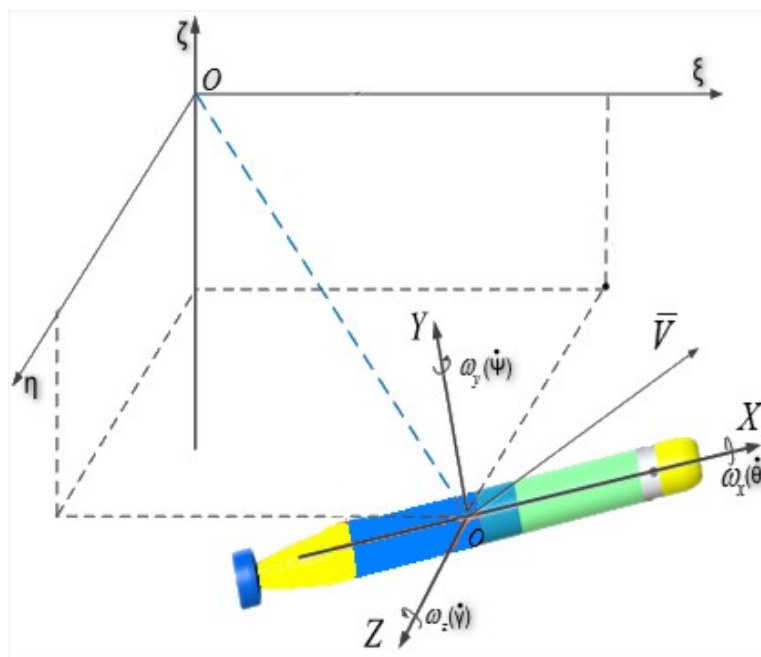


Рисунок 4.2 Система координат, яка обрана для розробки рівнянь руху

Система рівнянь руху апарата надає змогу розробити математичні моделі каналів керування та визначитися із вимогами, які будуть висуватися до якості керування за цими каналами під час розробки та проектування апарата.

Розглянемо рівняння динаміки руху апарата [125,126,142].

$$\left\{ \begin{array}{l}
1. \quad (M + \lambda_{11}) \frac{dV_X}{dt} + \lambda_{12} \frac{dV_Y}{dt} + (M + \lambda_{16}) \frac{d\omega_z}{dt} - \lambda_{26} \omega_y = T - 0.5 C_x \rho S V_X^2 - \\
- P \sin \gamma - (M + \lambda_{33}) V_Z \omega_y + (M + \lambda_{22}) V_Y \omega_z; \\
2. \quad (M + \lambda_{22}) \frac{dV_Y}{dt} + \lambda_{12} \frac{dV_X}{dt} + (M + \lambda_{16}) \frac{d\omega_z}{dt} = -0.5 C_y^\delta \delta_z \rho S V_X^2 - \\
- 0.5 C_y^\alpha \rho S V_X V_Y - M V_X \omega_z - P \cos \gamma \cos \theta; \\
3. \quad (M + \lambda_{33}) \frac{dV_Z}{dt} - (M + \lambda_{35}) \frac{d\omega_y}{dt} - (M + \lambda_{34}) \frac{d\omega_x}{dt} = -0.5 C_z^\beta \rho S V_X V_Z - \\
- 0.5 C_z^\delta \rho S V_X^2 \delta_b - M V_X \omega_y + P \cos \gamma \sin \theta; \\
4. \quad (I_x + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} - (M + \lambda_{34}) \frac{dV_Z}{dt} - \lambda_{45} \frac{d\omega_x}{dt} = m_x^\beta \rho S L V_X V_Z + m_x^{\alpha\beta} \rho S L V_Y V_Z - \\
- (m_x^\delta \delta_z + m_x^\delta \delta_b) \rho S L V_X^2 - G \cos \gamma \sin \theta; \\
5. \quad (I_y + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} - (M + \lambda_{35}) \frac{dV_Z}{dt} + \lambda_{45} \frac{d\omega_x}{dt} = m_y^\beta \rho S L V_X V_Z - \\
- m_y^\delta \rho S L V_X^2 \delta_b - M \omega_y V_X - G \cos \gamma \sin \theta; \\
6. \quad (I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + (M + \lambda_{25}) \frac{dV_Y}{dt} + (M + \lambda_{16}) \frac{dV_X}{dt} = m_z^\alpha \rho S L V_Y V_X - \\
- M V_X \omega_z - G (\cos \gamma \cos \theta + \sin \gamma) - m_z^\delta \rho S L V_X^2 \delta_z
\end{array} \right. \quad (4.1)$$

У рівняннях системи (4.1) використані наступні позначення:

M – маса апарата;

$\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{16}, \lambda_{22}, \lambda_{25}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{44}, \lambda_{45}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$ – приєднані маси;

$\frac{dV_X}{dt}, \frac{dV_Y}{dt}, \frac{dV_Z}{dt}$ – проекції прискорення центру мас на відповідні осі;

V_X, V_Y, V_Z – проекції швидкості центру мас на відповідні осі;

$\frac{d\omega_x}{dt}, \frac{d\omega_y}{dt}, \frac{d\omega_z}{dt}$ – проекції кутового прискорення на відповідні осі координат;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції кутової швидкості;

T – головний момент від маршового рушія;

C_x, C_y, C_z – коефіцієнти опору; ρ – густина середовища;

S – площа поперечного перерізу апарата;

G – вага апарата; L – довжина апарата;

δ_z - кут відхилення горизонтальних рулів;

δ_b - кут відхилення вертикальних рулів;

I_x, I_y, I_z - моменти інерції торпеди відносно координатних осей;

γ - кут диференту; θ - кут крену;

$m_x^{\alpha, \beta}, m_x^{\beta}, m_y^{\beta}, m_y^{\delta}, C_y^{\alpha}, C_y^{\delta}, C_z^{\beta}, C_z^{\delta}$ - коефіцієнти пропорційності, які характеризують ефективність відповідних органів керування;

P – плавучість.

У наведеній системі рівнянь (4.1) рівняння 1) описує рух об'єкта вздовж повздовжньої осі, а рівняння 3) – вздовж поперечної осі; рівняння 2) описує зміну положення об'єкта вздовж вертикальної вісі, а рівняння 6) описує кутовий рух за кутом диферента, тобто разом рівняння 2) та рівняння 6) описують рух при занурення об'єкта; рівняння 4) описує обертальний рух навколо повздовжньої осі (за кутом крену); рівняння 5) – кутовий рух відносно вертикальної осі (за кутом курсу).

Зазвичай систему рівнянь (4.1) у повному виді не досліджують. Для більш чіткого та цілеспрямованого дослідження систему (4.1) розділяють на прості рухи: рух по площині – плоско-паралельний рух, рух із глибини чи на занурення.

Відповідно до обраного простого руху розглядають лише одне рівняння у залежності від того, як планується виконувати маневри об'єкта.

Такий підхід дозволяє верифікувати правильність обрання конструкції апарата та параметрів системи [142-144].

4.2 Моделювання системи управління руху занурення (руху з глибини) автономного безпілотного підводного апарата

Одним із головних режимів руху автономного безпілотного підводного апарата є рух занурення (або рух з глибини). Виконання занурення може бути різним за своїм фізичним принципом: набирання вади у баластні баки та зміна кута диференту за допомоги імерсійної системи чи гідродинамічних поверхонь.

Для апарату глайдерного типу, який наведено та розглянуто у розділі 2, найбільш поширеною схемою керування зануренням є зміна кутового положення за диферентом, яка супроводжується зміною положення за вертикальною віссю шляхом заповненням баластних ємностей, що забезпечують достатній рівень від'ємної плавучості.

Для аналізу руху занурення на основі системи рівнянь (4.1) будемо вважати:

1) рух відбувається лише в вертикальній площині, яка проходить через поздовжню вісь апарата; тобто, будемо вважати, що рух за курсом відсутній (не враховуємо рівняння 5);

2) рух вздовж поздовжньої і поперечної осей будемо вважати рівномірним, а значить не враховуємо рівняння 1 і 3;

3) рух за кутом крена відсутній (не враховуємо рівняння 4).

Враховуючи зроблені припущення розглянемо два рівняння, які описують занурення апарата.

$$\left\{ \begin{array}{l} (M + \lambda_{22}) \frac{dV_Y}{dt} + \lambda_{12} \frac{dV_X}{dt} + (M + \lambda_{16}) \frac{d\omega_z}{dt} = -0.5C_y^\delta \delta_z \rho S V_X^2 - \\ -0.5C_y^\alpha \rho S V_X V_Y - M V_X \omega_z - P \cos \gamma \cos \theta; \\ (I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + (M + \lambda_{25}) \frac{dV_Y}{dt} + (M - \lambda_{16}) \frac{dV_X}{dt} = m_z^\alpha \rho S L V_Y V_X - \\ - M V_X \omega_z - G(\cos \gamma \cos \theta + \sin \gamma) - m_z^\delta \rho S L V_X^2 \delta_z \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Для системи рівнянь (4.2), для спрощення, введемо наступні позначення:

$$V_X = V = const, \frac{dV_X}{dt} = 0$$

$$V_Y = \frac{dh}{dt}$$

$$\omega_z = \frac{d\gamma}{dt}$$

$$\frac{dV_Y}{dt} = \frac{d^2 h}{dt^2}$$

Із урахуванням даних спрощень отримаємо:

$$\begin{cases} (M + \lambda_{22}) \frac{d^2 h}{dt^2} + C_y^\alpha \rho S V \frac{dh}{dt} + (M + \lambda_{16}) \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + MV \frac{d\gamma}{dt} = -P - 0.5 C_y^\delta \rho S V^2 \delta_z \\ (I_z + \lambda_{66}) \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + MV \frac{d\gamma}{dt} + G\gamma + (M + \lambda_{25}) \frac{d^2 h}{dt^2} = -m_z^\delta \rho S L V^2 \delta_z \end{cases} \quad (4.3)$$

Для простоти запису та наочності сприйняття введемо наступні позначення:

$$A = M + \lambda_{22}, \quad B = C_y^\alpha \rho S, \quad C = M + \lambda_{16}, \quad J = G, \quad F = C_y^\delta \rho S, \quad G = I_z + \lambda_{66}, \\ Q = M + \lambda_{25}, \quad E = m_z^\delta \rho S L.$$

Із урахуванням позначень система (4.3) набуде вигляду:

$$\begin{cases} A \frac{d^2 h}{dt^2} + BV \frac{dh}{dt} - CV \frac{d\gamma}{dt} = -P - FV^2 \delta_z \\ G \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + MV \frac{d\gamma}{dt} + J\gamma + L \frac{d^2 h}{dt^2} + QV \frac{dh}{dt} = -EV^2 \delta_z \end{cases} \quad (4.4)$$

Система (4.4) описує рух апарата за кутом диференту та зануренням. Зв'язок кута диференту та занурення визначаються останніми членами лівих частин системи рівнянь (4.4).

Аналізувати систему рівнянь (4.4) прямим методами обрахунку диференціальних рівнянь трудомістка задача. Застосувавши методи операторного числення можна перейти від диференційних рівнянь до алгебраїчних. На основі утворених алгебраїчних рівняння можна синтезувати передатні функції, які нададуть змогу оцінити якість системи та її стійкість [143]. Наведемо процес отримання передатних функцій системи. Для цього до системи рівнянь (4.4) застосуємо перетворення Лапласа, отримаємо:

$$\begin{bmatrix} Ap^2 + BVp; & -CVp \\ Lp^2 + QVp; & Gp^2 + WVp + J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(p) \\ \gamma(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P \\ 0 \end{bmatrix} + V^2 \begin{bmatrix} -F \\ -E \end{bmatrix} \delta_z(p) \quad (4.5)$$

Запишемо визначники $\Delta(p), \Delta_{11}(p), \Delta_{12}(p)$:

$$\Delta(p) = AGp^4 + (AWV + BVG + CVL)p^3 + (AJ + BV^2W + CV^2Q)p^2 + BVJp$$

$$\Delta_{11}(p) = V^2 [FGp^2 + V(WF - CE)p + FJ]$$

$$\Delta_{12}(p) = -V^2 [(EA + FL)p + V(EB + FQ)]p$$

Тоді:

$$W_{h\delta}(p) = \frac{h(p)}{\delta(p)} = \frac{\Delta_{11}(p)}{\Delta(p)} = \frac{FV^2Gp^2 + (WV^3 - CEV^3)p + FJV^2}{\Delta(p)}$$

$$W_{\theta\delta}(p) = \frac{\theta(p)}{\delta(p)} = \frac{\Delta_{12}(p)}{\Delta(p)} = \frac{-(EV^2A + FV^2L)p^2 - (EV^2BV + FQV^3)p}{\Delta(p)}$$

де $\Delta(p) = AGp^4 + V(AW + BG + CL)p^3 + [AJ + V^2(BW + CQ)]p^2 + BVJp$

характеристичний поліном системи.

Для проведення моделювання руху занурення апарата, на основі системи (4.3), у середовищі SIMULINK розробимо імітаційну модель, яку наведено на рис. 4.3.

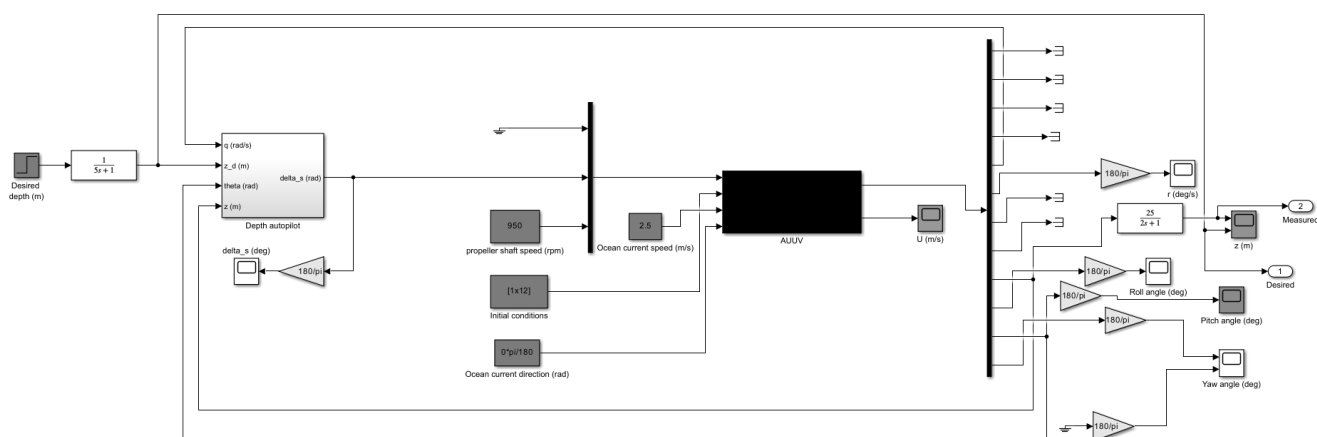


Рисунок 4.3 Імітаційна модель системи керування рухом занурення апарата

Проведемо моделювання системи при таких умовах:

- Оберти двигуна 950 об/хв, що приблизно дорівнює тязі у 35 Н;
- Густина середовища 999,1026 кг/м³ – що відповідає морській солоній воді;
- Коефіцієнт сили супротиву 0,03;
- Проекційна площа фронтального виду апарата 0,363 м²;
- Маса апарата $m = 60$ кг;
- Момент інерції $J_z = 7,04$ кг*м²;
- час симуляції 50 секунд

Бажана глибина занурення 50 метрів, яка починає набиратися із затримкою на 0,5 секунд.

На графіку, рис. 4.4, наведено залежність зміни глибини апарата при вхідному діянні значення бажаної глибини.

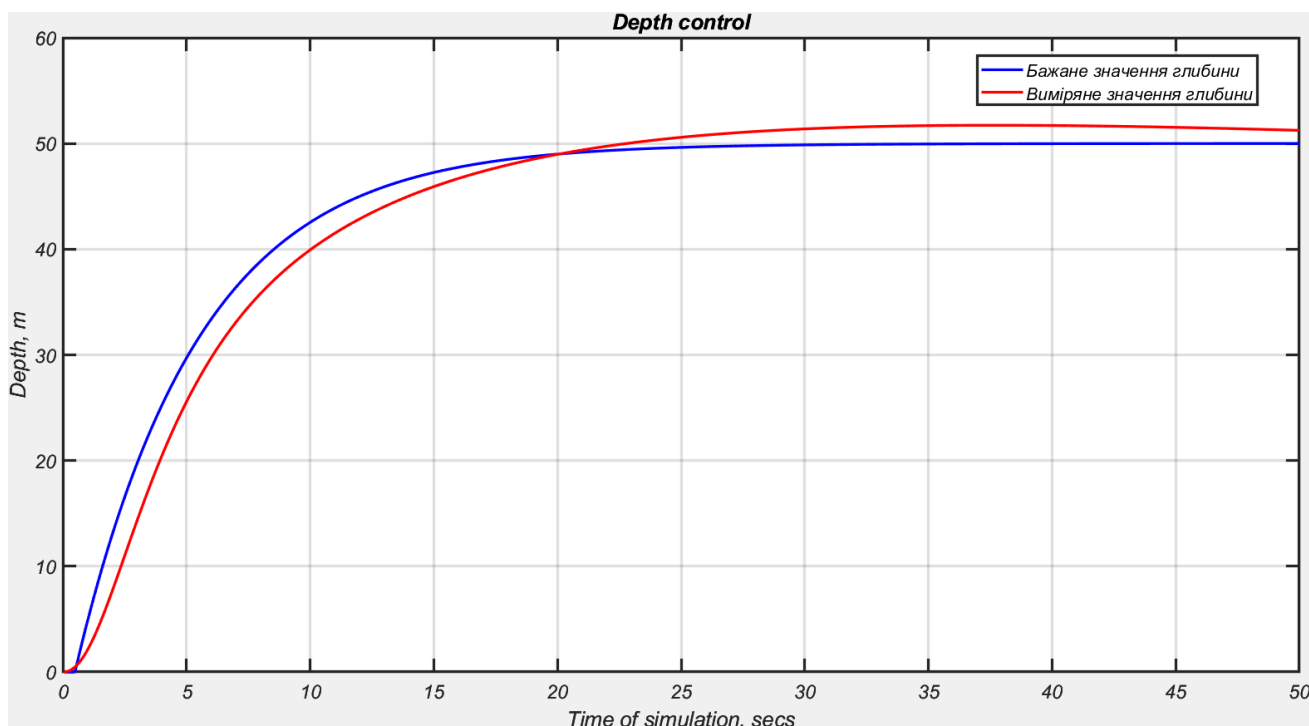


Рисунок 4.4 Графік занурення апарата

Як видно із графіка, система відпрацьовує затримку вхідного сигналу, зміна глибини відбувається за очікуваним, експоненціальним, законом зміни глибини. У точці перерегулювання, яка знаходиться на двадцять п'ятій секунді спостерігається відхилення від заданого значення. починаючи з тридцятої секунди на графіку видно, що значення глибини апарату стабілізується та прямує до заданої глибини.

На основі результату проведеного моделювання розроблено модель об'єкта, що зображує параметри визначення глибини та її зміну і зв'язок між значенням заданої глибини та значенням її досягнення, яку наведено на рис. 4.5. Розроблена інформаційна модель надає змогу поелементно розробити канал керування зануренням АБПА.

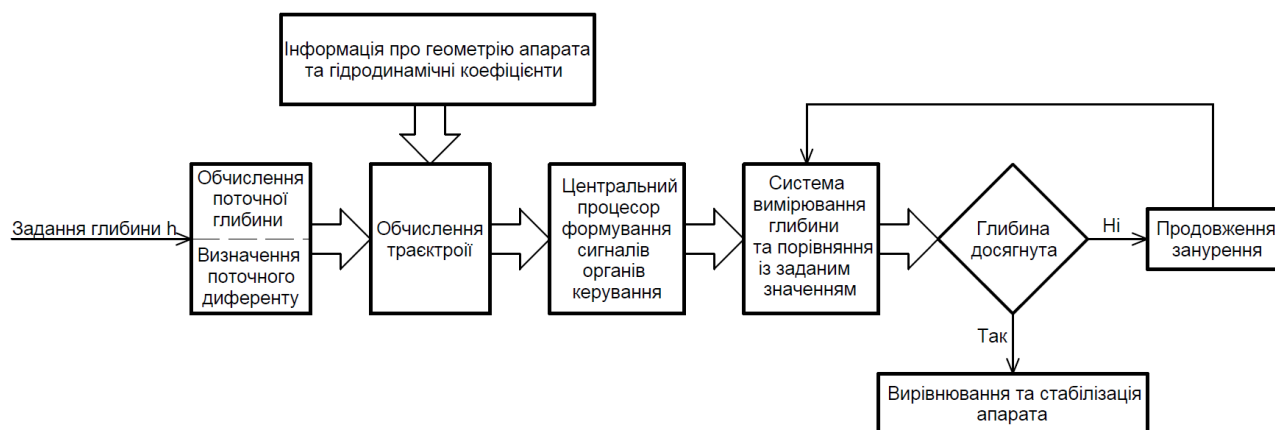


Рисунок 4.5 Інформаційна модель каналу керування зануренням

4.3 Моделювання системи управління кутом курсу за різних режимів руху автономного безпілотної підводного апарата

Більш складним рухом автономного безпілотної підводного апарата, у порівнянні із рухом занурення, є руху за курсом. Особливо складним рух за курсом стає під час функціонування апарата під водою та у близькій відстані до підводного дна.

На основі системи рівнянь (4.1) будемо розглядати рівняння, які забезпечують керування об'єктом за курсом. Для подальшого аналізу зробимо наступні припущення:

1. Відсутній рух по кутам крену та диференту – відповідно рівняння 4 та 6 системи (4.1) відкидаються та не враховуються при моделюванні;
2. Рух вздовж вертикальної та поперечної вісей вважається або рівномірним або відсутнім – відповідно рівняння 2 та 3 системи (4.1) відкидаються та не враховуються при моделюванні;

У відповідності до припущень залишилося лише два рівняння системи (4.1) – рівняння 1 та 5:

$$\left\{ \begin{array}{l} (M + \lambda_{11}) \frac{dV_X}{dt} + \lambda_{12} \frac{dV_Y}{dt} + (M + \lambda_{16}) \frac{d\omega_z}{dt} = T - 0.5C_x \rho S V_X^2 - P \sin \gamma - \\ - C_x^{\omega_z} \rho S L V_X \omega_z - (M + \lambda_{33}) V_Z \omega_y + (M + \lambda_{22}) V_Y \omega_z; \\ (I_y + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} - (M + \lambda_{35}) \frac{dV_Z}{dt} + \lambda_{45} \frac{d\omega_x}{dt} = m_y^\beta \rho S L V_X V_Z - m_y^\delta \rho S L V_X^2 \delta_b - \\ - [M \omega_y + M \omega_x] V_X - G \cos \gamma \sin \theta \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Для системи (4.6) зробимо наступні спрощення:

$$V_X = \frac{dX}{dt}$$

$$V_Y = V_Z = 0$$

$$\omega_y = \frac{d\psi}{dt}, \omega_z = \omega_x = 0, \gamma = \theta = 0$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{12} = \lambda_{16} = \lambda_{22} = \lambda_{33} = \lambda_{35} = \lambda_{45} = \lambda_{55} = 0$$

$$\frac{dV_X}{dt} = \frac{d^2 X}{dt^2}$$

$$M_y = m_y^\delta \rho S L, F(\psi) = V_X^2 \delta_b$$

Із урахуванням таких спрощень та відсутності інших рухів об'єкта система (4.6) набуде наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} M \frac{d^2 X}{dt^2} + 0.5 C_x \rho S \left(\frac{dX}{dt} \right)^2 \delta_b \cos \psi = T; \\ I_y \frac{d^2 \psi}{dt^2} = -M_y F(\psi); \\ \frac{d\psi}{dt} = \omega_y \end{array} \right. \quad (4.7)$$

На основі системи рівнянь (4.7), у середовищі MATLAB із додатком SIMULINK [143], розроблено імітаційну модель для проведення симуляції та моделювання відпрацювання стернового керування за напрямком. Імітаційна модель зображена на рис. 4.6.

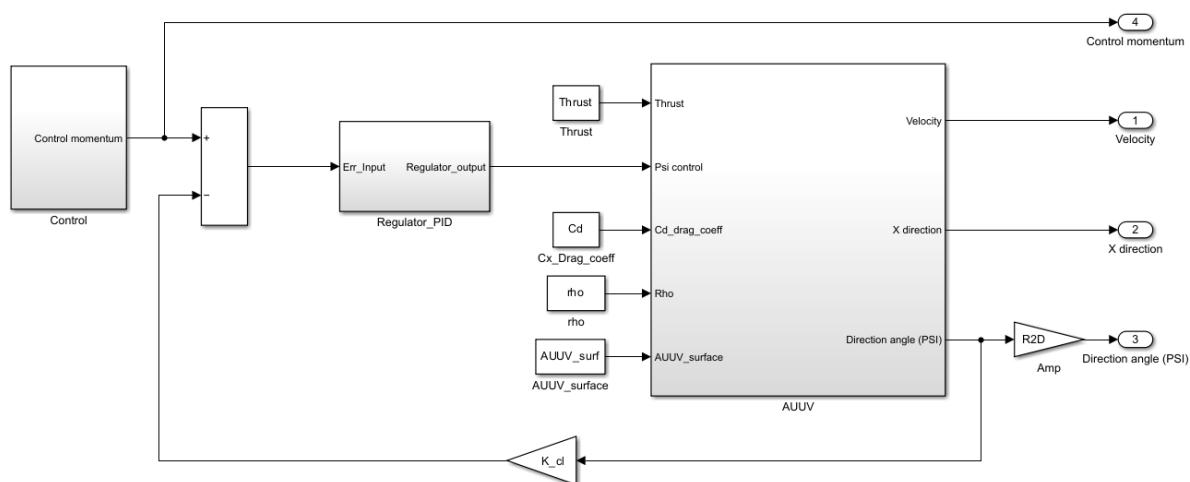


Рисунок 4.6 Імітаційна модель прямолінійного руху автономного безпілотної підводного апарата

Імітаційна модель, яка наведена на рис. 4.6, складається із блоку задання закону керування за кутом курсу, регулятора за кутом курсу, коефіцієнту зворотного зв'язку за кутом курсу та моделі самого апарата у відповідності до рівнянь руху (4.6). Вихідні значення моделі, які досліджуються та аналізуються, це швидкість руху об'єкта (Velocity), зміна кута курсу (Direction angle (Psi)). Вхідними параметрами моделі є: тяга маршового рушія; густина середовища; коефіцієнт сили супротиву, який розраховано у п. 2.4; проекційна площа фронтального виду апарата; маса m апарата та момент інерції J_y навколо вертикальної осі, які наведено у п. 2.4.

Дослідимо модель при таких параметрах:

- Тяга двигуна 35 Н;
- Густина середовища $999,1026 \text{ кг/м}^3$ – що відповідає морській солоній воді;
- Коефіцієнт сили супротиву 0,03;
- Проекційна площа фронтального виду апарата $0,363 \text{ м}^2$;
- Маса апарата $m = 60 \text{ кг}$;
- Момент інерції $J_y = 7,04 \text{ кг*м}^2$;
- Коефіцієнт зворотного зв'язку за кутом курсу $K_{cl} = 59$;
- Час симуляції 50 секунд.

Вхідне діяння закону керування: нульовий момент керування; момент керування за синусоїдальним законом із амплітудою перекидання стерна 10° та частотою 0,16 Гц; момент керування за меандром із амплітудою 10° періодом 25 секунд та скважністю 50%, тривалість симуляції 50 секунд.

Графік на рис. 4.7, показує відпрацювання стерна за кутом курсу при нульовому вхідному діянні.

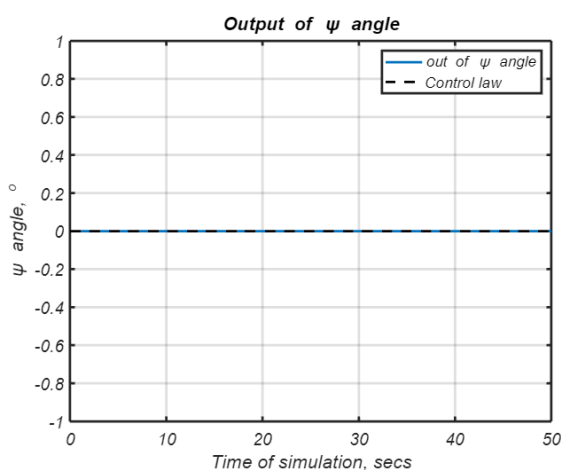


Рисунок 4.7 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при нульовому вхідному діянні

Залежність, яка зображена на рис. 4.8, показує встановлення, за експоненціальним законом, швидкості апарата при нульовому вхідному діянні за кутом курсу та тязі маршового рушія у 35 Н. Усталена швидкість об'єкта при такій тязі досягає значення 2,53 м/с. Вихід на цю швидкість становить близько 10 секунд.

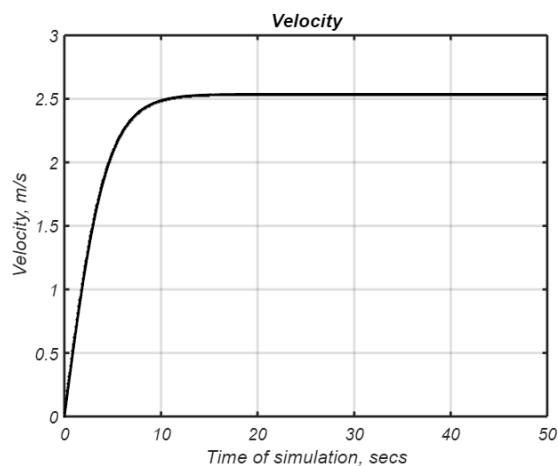


Рисунок 4.8 Графік вихідної швидкості при прямолінійному русі

Графік, який наведено на рис. 4.9, демонструє відпрацювання стерна за кутом курсу при постійному входному діянні заданої величини (12°). На графіку спостерігається синусоїдальне відпрацювання стерна, тобто на постійне входне діяння стерно не реагує та має коливальний характер зміни.

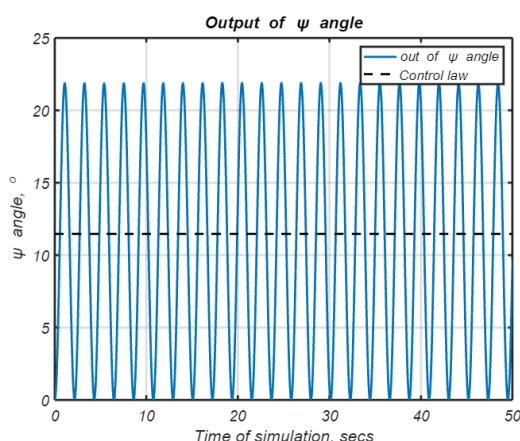


Рисунок 4.9 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при ступінчатому входному діянні за кутом курсу

Графік, який наведено на рис. 4.10, демонструє відпрацювання стерна за кутом курсу при синусоїдальному входному діянні. На графіку спостерігається нелінійність відпрацювання курсового стерна різкі додаткові коливання у піках синусоїди.

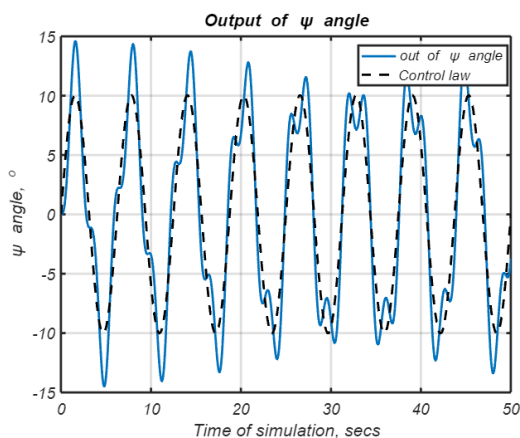


Рисунок 4.10 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при синусоїдальному входному діянні за кутом курсу

На рис. 4.11 наведено графік перехідного процесу, який описується експоненціальним законом, набирання швидкості апарата при синусоїдальному вхідному діянні за кутом курсу та тязі рушія у 35 Н. На графіку видно, що усталена швидкість досягла свого значення 2,53 м/с. Час виходу на усталену швидкість становить десять секунд. Усталене значення швидкості має нелінійні флуктуаційні зміни навколо свого середнього значення.

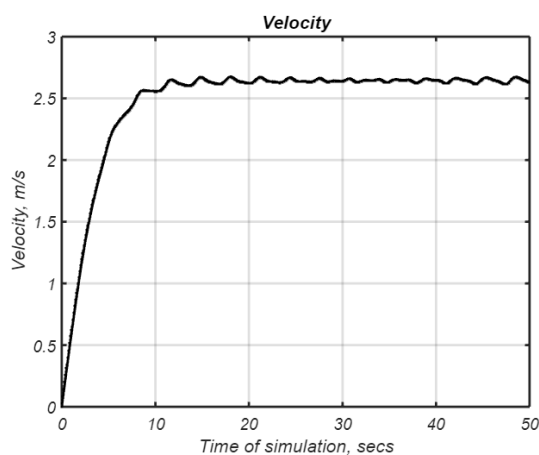


Рисунок 4.11 Графік вихідної швидкості при синусоїдальному вхідному діянні за кутом курсу

Графік, який наведено на рис. 4.12, показує відпрацювання стерна за кутом курсу при зигзагоподібному вхідному діянні (меандр).

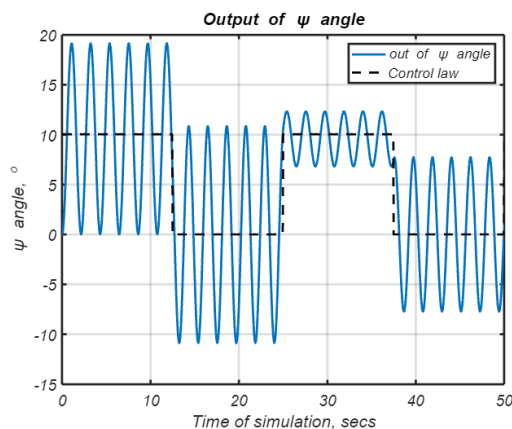


Рисунок 4.12 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при зигзагоподібному вхідному діянні за кутом курсу

Із рис. 4.12 спостерігається характер вихідного сигналу, який є нелінійним та має гармонічні складові відносно піків меандра та протягом дії цих пікових значень.

Залежність, яка зображена на рис. 4.13, показує перехідний процес набирання швидкості апарата при вхідному діянні за кутом курсу типу меандр та тязі рушія у 35 Н.

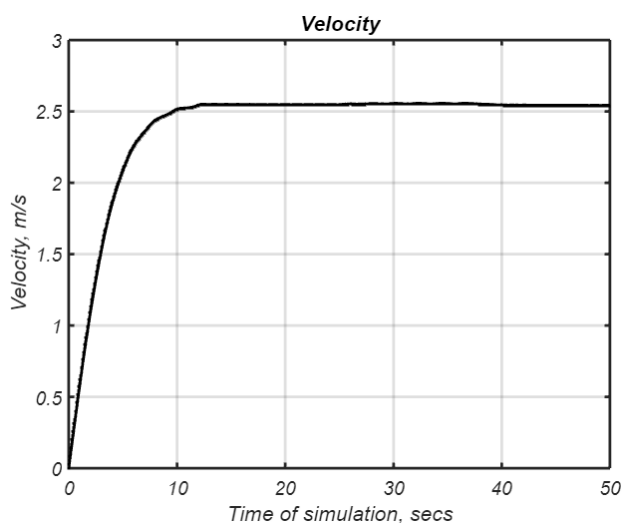


Рисунок 4.13 Графік вихідної швидкості при вхідному діянні типу меандр за кутом курсу

Протягом 10 секунд швидкість прямує до свого максимального значення 2,53 м/с за експоненціальним законом. Після 10 секунд швидкість апарата має усталене значення, яке рівне 2,53 м/с.

Результати моделювання показують стабільність роботи системи керування за прямолінійного руху апарата. Проте, при вхідному діянні відмінному від простого прямолінійного руху. Аналіз графіків, які наведено на рис. 4.9, рис. 4.10 та рис. 4.12 показує, що для кращого та більш стабільного керування необхідно в систему вводити блок регулятора.

На практиці найбільш поширеним регулятором є пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор [143]. У схему, яка наведена на рис. 4.5 введено ПІД регулятор, який реалізовано у блоці Regulator_PID. ПІД регулятор розроблено

як окремі функціональні вузли, у яких коефіцієнти розглядаються як окремі блоки. Таке представлення ПІД регулятора відображає реальну програмовану систему керування та надає змогу швидко варіювати коефіцієнтами для забезпечення кращого наближення вихідного сигналу до сигналу керування. Кожен із коефіцієнтів регулятора має наступні особливості:

- застосування пропорційного управління збільшує відносне перерегулювання, не вносить похибок у час досягнення сталого значення, не змінює статичну похибку;
- застосування інтегрального управління збільшує відносне перерегулювання, збільшує час досягнення сталого значення, має нульову статичну похибку;
- застосування диференційного управління зменшує відносне перерегулювання, зменшує час досягнення сталого значення, не вносить похибок статичних похибок.

Якщо система задана у вигляді простору станів, а головна матриця системи має розмірність $m \times m$, де $m \leq 3$, то коефіцієнти регулятора можна розрахувати аналітично. Однак, якщо розмірність матриці $n \times m$, або якщо де $m > 3$, або якщо система сформована у вигляді рівнянь руху то розрахунок коефіцієнтів регулятора ускладнюється. Розроблена модель надає змогу методом підбору визначити бажані коефіцієнти регулятора. У додатку Д наведено результати моделювання системи за різних значень коефіцієнтів регулятора.

На ведемо результати моделювання системи, використовуючи вище згадані параметри, із урахуванням сигналу регулятора. На основі результатів моделювання, які наведено у додатку Д обрано наступні кращі параметри регулятора:

- Коефіцієнт пропорційного сигналу $K_p = 0,8$;
- Коефіцієнт інтегрального сигналу $K_i = 0,01$;
- Коефіцієнт диференційного сигналу $K_d = 0,5$;

На рис. 4.14 наведено результат моделювання вихідного сигналу керування за синусоїдального вхідного діяння.

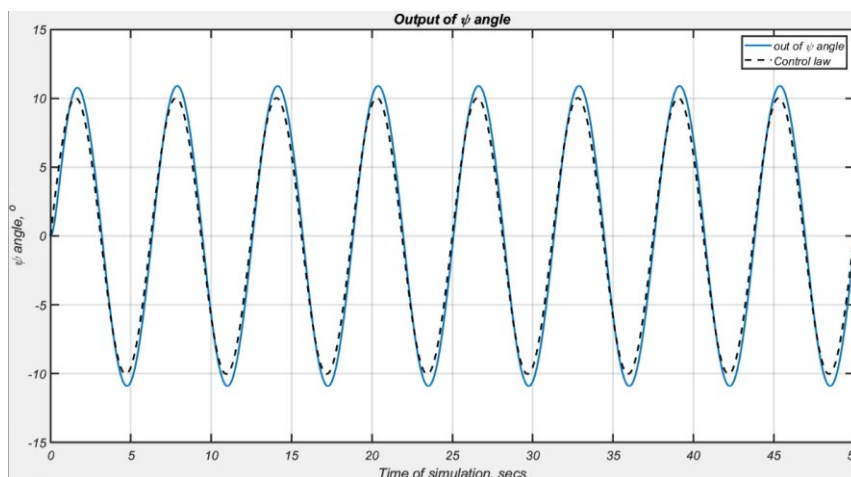


Рисунок 4.14 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при синусоїдальному вхідному діянні із урахуванням параметрів регулятора

Із рис 4.14 видно, що застосування ПД регулятора наближає форму вихідного сигналу керування до бажаного вхідного сигналу керуючого впливу. Похибка між сигналом вхідного діяння та вихідним сигналом керування не перевищує 10%, а форма вихідного сигналу якісно повторює форму вхідного керуючого впливу.

На рис. 4.15 продемонстровано вихідну швидкість при синусоїдальному вхідному діянні.

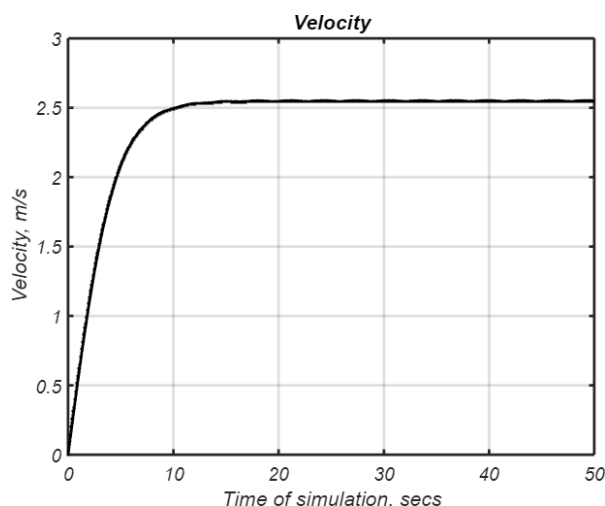


Рисунок 4.15 Графік вихідної швидкості при синусоїдальному вхідному діянні за кутом курсу із урахуванням параметрів регулятора

Із рис. 4.15 видно, що швидкість апарата експоненціально наближається до сталого значення 2,53 м/с протягом 10 секунд. Усталене значення швидкості, у порівнянні із значенням на рис. 4.11, має лінійний характер та відсутні флуктуації відносно середнього положення.

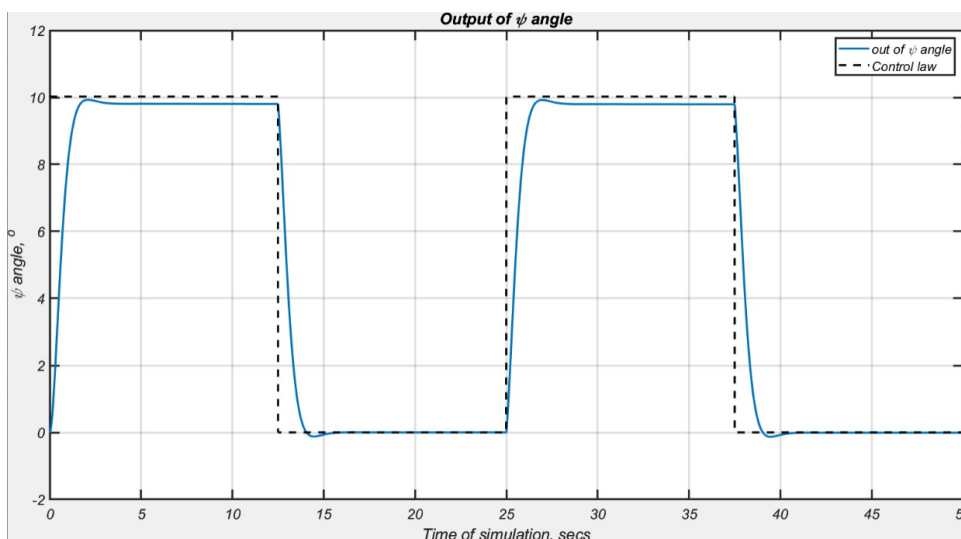


Рисунок 4.16 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при вхідному діянні типу меандр за кутом курсу із урахуванням параметрів регулятора

Із рис. 4.16 видно, що сигнал керування курсовим стерном наближено повторює вхідне зигзагоподібне діяння. На графіку спостерігається якісне повторювання форми сигналу, при наближенні до усталеного значення спостерігається перехідний процес тривалістю приблизно дві секунди, також спостерігається лінійне спадання, в околі максимального значення імпульса, яке прямує до усталеного значення вхідного діяння та лінійне зростання значення, в околі мінімального значення імпульса, яке прямує до усталеного значення вхідного діяння.

На рис. 4.17 показано перехідний процес набирання швидкості апарата при зигзагоподібному вхідному діянні та із урахуванням значень коефіцієнтів регулятора за кутом курсу. Значення швидкості та часових характеристик аналогічні до характеристик, які розглянуто та наведено на рис. 4.13 та рис. 4.15.

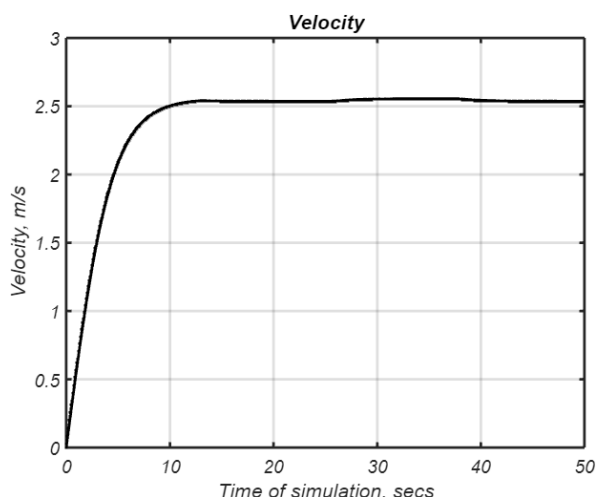


Рисунок 4.17 Графік вихідної швидкості при вхідному діянні типу меандр за кутом курсу із урахуванням параметрів регулятора

Результати моделювання свідчать про ефективність використання регулятора у системі управління. ПД регулятор покращує характеристики керування та підвищує швидкодію системи.

За результатами проведеного моделювання розроблено модель об'єкта, що зображує зміну та визначення кута курсу, зв'язок кута курсу між значенням заданого курсу та досягнення бажаного кута курсу, яку наведено на рис. 4.18. Розроблена інформаційна модель надає змогу поелементно розробити канал керування зміною курсового положення АБПА.

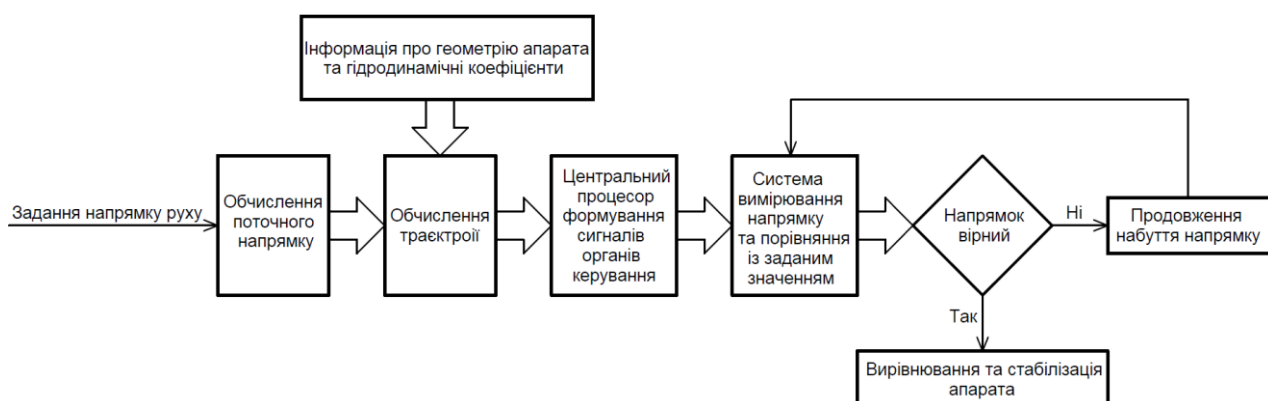


Рисунок. 4.18 Інформаційна модель каналу керування за кутом курсу

Висновки по Розділу 4

1. На основі розглянутих систем управління було обґрунтовано систему, яка забезпечує автономність роботи апарата, для запропоновано та обґрунтовано функціональну схему. Було розглянуто апарат як об'єкт управління. На основі повної системи рівнянь руху апарата було синтезовано та розглянуто два режими руху апарата: рух занурення (із глибини) та рух курсовою траєкторією.

2. Для руху занурення було розроблено імітаційну модель, на основі якої проведено імітаційне моделювання руху занурення. За результатами моделювання встановлено:

- Система із двох рівнянь, яка описує рух занурення цілком та повністю є моделю окремого каналу управління;
- Результати моделювання, які враховують конструкцію і параметри апарата, показують адекватність виконання занурення апарата та показують, що тривалість перехідного процесу становить 20 секунд протягом яких апарат занурюється на задану глибину у 50 метрів із похибкою яка не перевищує 3%.

3. Для руху за кутом курсу, на основі повної системи рівнянь, розроблено імітаційну модель, за якою проведено імітаційне моделювання. За результатами імітаційного дослідження руху за кутом курсу було встановлено:

- Канал управління стерна за кутом курсу без регулятора не відпрацьовує заданий закон зміни ступінчатого вхідного діяння заданої величини та меандру;
- Канал управління стерна за кутом курсу без регулятора має неякісну характеристику відпрацювання синусоїдального закону керування;
- Час перехідного процесу системи без регулятора із набуття апаратом усталеної швидкості при заданій тязі становить 10 секунд;
- У системі без регулятора при набранні швидкості при синусоїдальному впливі спостерігаються флуктуації, які не перевищують 2%, навколо усталеного значення швидкості;

- Застосування пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора якісно поліпшує процес управління при відпрацювання як постійного вхідного діяння так і знакозмінного вхідного діяння (синусоїда);

- Отримані результати свідчать про точність та стабільність відпрацювання курсовим стерном заданого закону керування за курсом із похибкою менше 3%;

- Аналіз результатів показує, що коефіцієнти регулятора додають системі наступні властивості: зменшують процес перерегулювання, вносять зменшення у час досягнення сталого значення, не вносять статичної похибки у систему.

4. На основі проведеного дослідження створено та обґрунтовано інформаційні моделі каналів керування зануренням та зміною кута курсу автономного безпілотного підводного апарата, які враховують інформацію про геометричні та гідродинамічні характеристики об'єкта, задання потрібних значень параметрів руху та обчислення відповідних траєкторій, формування сигналів керування, інформацію про результати керування та значень відхилення глибини та кута курсу.

Дослідження показало адекватну роботу окремих каналів управління та доцільність застосування підходу для проведення верифікації апарата та його програмно-математичного забезпечення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне та важливе науково-практичне завдання вдосконалення систем управління, орієнтації та навігації із застосуванням мікроелектромеханічних технологій для автономного безпілотного підводного апарата класу Міні.

1. Проведено огляд стану проблеми та встановлено, що розробка для автономного безпілотного підводного апарата класу Міні потребує комплексного наукового обґрунтування та вдосконалення існуючих систем управління, орієнтації та навігації, а також використання мікроелектромеханічних технологій. Показано, що значний вплив на покращення маневрових характеристик апарата забезпечується завдяки правильно підібраній конструктивній формі апарата. Також встановлено та наведено зв'язок конструктивної форми апарата із алгоритмічним забезпеченням, яке реалізує управління апаратом. Крім того показано, що застосування мікроелектромеханічних систем та технологій може забезпечити достатню точність визначення параметрів орієнтації та навігації. На основі проведеного аналізу визначено, що конструктивна форма типу «глайдер» автономного безпілотного підводного апарата здатна забезпечити оптимальні характеристики управління та виконувати складні маневрові завдання та потребує більш ретельного вивчення і аналізу.

2. Розглянуто та обґрунтовано чотири моделі конструкції автономного безпілотного підводного апарата. Проведено імітаційне моделювання простого руху та визначено гідродинамічні характеристики кожної із моделей. На основі аналізу отриманих гідродинамічних характеристик обрано модель для подальших досліджень. Проведено імітаційне моделювання складного руху обраної моделі апарата, отримано гідродинамічні характеристики, аналіз яких показав, що розроблена модель може бути використана як для простого руху, так і для складного руху автономного безпілотного підводного апарата. На основі отриманих результатів моделювання визначено коефіцієнти сили супротиву та

підіймальної сили, які будуть використовуватися при моделюванні систем управління.

3. Обґрунтовано використання безплатформної інерціальної навігаційної системи на мікроелектромеханічних акселерометрах та гіроскопах. Вдосконалено імітаційні моделі чутливих елементів навігаційної системи (акселерометра та гіроскопа) параметри яких враховують конструктивні особливості та характеристики реальних датчиків. Проведено чисельне моделювання розроблених моделей та встановлено адекватність розроблених імітаційних моделей. Створено імітаційну модель безплатформної інерціальної навігаційної системи, яка враховує моделі чутливих елементів та їх характеристики. Проведено моделювання та встановлено функціональні залежності параметрів орієнтації та навігації та їх похибок у залежності від напрямку руху автономного безпілотного підводного апарата. Показано, що похибки визначення параметрів орієнтації та навігації не перевищують похибок датчиків.

4. Обґрунтовано та розроблено динамічні моделі основних каналів управління апарату, які враховують конструктивну форму та масо-габаритні характеристики апарата: канал управління зануренням та канал управління рухом за кутом курсу. Проведено імітаційне моделювання та встановлено, що за каналом керування рухом занурення апарат відпрацьовує даний маневр із прийнятною швидкістю та точністю. Проведено імітаційне моделювання та встановлено, що за каналом управління кутом курсу апарат не відпрацьовує задані складні траєкторії. Для усунення такого недоліку до системи управління включено пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, що забезпечує прийнятну точність та швидкість відпрацювання складних траєкторій за кутом курсу. На основі результатів моделювання створено та обґрунтовано інформаційні моделі каналів управління рухом занурення та за кутом курсу.

5. Результати дисертаційного дослідження впроваджено у ТОВ «ISR «TECHNOLOGY» та ПАТ «НТК «ЕЛЕКТРОНПРИЛАД» під час розробки та дослідження систем управління та систем орієнтації та навігації безпілотних апаратів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nicholson, J. W., Healey, A. J. (2008). The Present State of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Applications and Technologies. *Marine Technology Society Journal*, 42(1), 44–51. doi:10.4031/002533208786861272.
2. Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Information Study. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу URL: https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc199/p800838_A1b.pdf
3. Bovio, E., Baralli, F., & Cecchi, D. (2004). Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(10), 1-11, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31703-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31703-2).
4. Bovio, E., Cecchi, D., & Baralli, F. (2006). Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations. *Annual Reviews in Control*, 30(2), 117-130, <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2006.08.003>.
5. Голод, О. С., Гончар, А. И., & Шлычек, Л. И. (2007). Перспективы и концепции разработки автономных необитаемых подводных аппаратов. *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*
6. Бурау Н.І., Яцко Л.Л., Расулов М.Д., Бобрик В.С. Огляд стану сучасних автономних безпілотних підводних апаратів. *Вісник інженерної академії України* – 2017. – №4 – С. 12 – 17.
7. Cellula Robotics Ltd. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.cellula.com/about-cellula>.
8. International Submarine Engineering Ltd. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу URL: <https://ise.bc.ca>.
9. Kongsberg Maritime. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.kongsberg.com/maritime/>.
10. Nortek. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.nortekgroup.com>.

11. Блінцов, О. В. Автоматизація керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системи: Навчальний посібник [Текст] / О. В. Блінцов, В. А. Надточій //—Миколаїв: Вид-во НУК, 2014. –124 с.
12. Курдюк, С. В., Трохименко, І. В. (2023). Загальні напрямки розвитку систем телеметрії, гідроакустичного кодового зв'язку та елементів підводної робототехніки. *Морська безпека*, (1), 46-52. <https://doi.org/10.32782/msd/2023.1.6>.
13. Блінцов В. С. Наукова школа «Підводна техніка»: здобутки та перспективи [Електронний ресурс] / В. С. Блінцов, О. В. Блінцов. – 2511. – Режим доступу до ресурсу URL: <https://shipbuilding.mk.ua/?p=3760>.
14. Wang J., Wu Z., Dong H., Tan M., Yu J. (2022). Development and Control of Underwater Gliding Robots: A Review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(9), 1543-1560, <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105671>.
15. Sands T., Bollino K. (2020). Autonomous Underwater Vehicle Guidance, Navigation, and Control. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.80316.
16. Gafurov S. A., Klochkov E. V. (2015). *Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies*. *Procedia Engineering*, 106, 141–148. doi:10.1016/j.proeng.2015.06.017
17. Autonomous Undersea Vehicle Applications Center (AUVAC) – Режим доступу до ресурсу URL: https://auvac.org/results_purpose-2/.
18. Schmid Korbinian. (2008). Embedded system and controller design for a micro AUV. 10.13140/RG.2.1.3031.2080.
19. German Research Center for Artificial Intelligence GmbH Robotics Innovation Center – Режим доступу до ресурсу URL: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/robot-systems/uauv>.
20. ecoSUB Robotics Limited – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.ecosub.uk/ecosubu5---500-m-rated-micro-auv.html>.
21. SEABER – Режим доступу до ресурсу URL: <https://seaber.fr/why-yuco-is-unique>.
22. RTSYS – Режим доступу до ресурсу URL: <https://rtsys.eu/nemosens-micro-auv>.

23. RTSYS – Режим доступу до ресурсу URL: <https://rtsys.eu/comet-300-auv>.
24. RTSYS – Режим доступу до ресурсу URL: <https://rtsys.eu/sema-training-target>.
25. Huntington Ingalls Industries (HII), REMUS UUVS – Режим доступу до ресурсу URL: <https://hii.com/what-we-do/capabilities/unmanned-systems/remus-uuv/>.
26. BAE Systems – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems-displays-next-generation-uuv-to-international-customers>.
27. IQUA Robotics, Sparus II AUV – Режим доступу до ресурсу URL: <https://iquarobotics.com/sparus-ii-auv>.
28. Teledyne Technologies Incorporated, Teledyne Marine, Slocum Glider – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.teledynemarine.com/brands/webb-research/slocum-glider>.
29. ATLAS ELEKTRONIK GmbH, ATLAS MARIDAN – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.maridan.atlas-elektronik.com/index.html>.
30. General Dynamics Mission Systems, Bluefin-12S Unmanned Underwater Vehicle (UUV) – Режим доступу до ресурсу URL: <https://gdmissionsystems.com/discontinued-products/bluefin-12-s-autonomous-underwater-vehicle>.
31. Rentschler, M.E., Hover, F.S., & Chrysosostomidis, C. (2003). Modeling and control of an Odyssey III AUV through system identification tests. – Режим доступу до ресурсу URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:37723733>.
32. Long Term Mine Reconnaissance System [LMRS] – Режим доступу до ресурсу URL: <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/weaps/lmrs.htm>
33. Kongsberg Maritime, Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Hugin – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-hugin/>.
34. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Autonomous Underwater Vehicle: ОКРО-6000 – Режим доступу до ресурсу URL: https://dsmeu.en.ec21.com/Auv--698356_698435.html.

35. International Submarine Engineering (ISE) – Режим доступу до ресурсу URL: <https://ise.bc.ca>.
36. The National Oceanography Centre (NOC), Autosubs – Режим доступу до ресурсу URL: <https://noc.ac.uk/facilities/marine-autonomous-robotic-systems/autosubs>.
37. Boeing Echo Ranger – Режим доступу до ресурсу URL: <https://secure.boeingimages.com/archive/Boeing-Echo-Ranger-in-cove-of-Two-Harbors-on-Catalina-Island--California-2F3XC5POVE4.html>.
38. SAUVIM (Semi Autonomous Underwater Vehicle for Intervention Missions) – Режим доступу до ресурсу URL: <https://gmarani.org/na/sauvim/index.html>.
39. Bringing together Research and Industry for the Development of Glider Environmental Services (BRIDGES), The Deep and Ultra-Deep sub-sea gliders – Режим доступу до ресурсу URL: <http://www.bridges-h2020.eu/index.php>.
40. Ejeian, F., Azadi, S., Razmjou, A., Orooji, Y., Kottapalli, A., Warkiani, M. E., & Asadnia, M. (2019). *Design and applications of MEMS flow sensors: A review. Sensors and Actuators A: Physical*. doi:10.1016/j.sna.2019.06.020.
41. Snyder, W. E., Renken, M. C., & Van Uffelen, L. J. (2022). Performance of a MEMS IMU for Localizing a Seaglider AUV on an Acoustic Tracking Range. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 48(2), 323-331 – Режим доступу до ресурсу URL: [Performance of a MEMS IMU for Localizing a Seaglider AUV on an Acoustic Tracking Range \(myqcloud.com\)](https://myqcloud.com/Performance-of-a-MEMS-IMU-for-Localizing-a-Seaglider-AUV-on-an-Acoustic-Tracking-Range).
42. Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., & Li, H. (2013). AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 39(1), 131-149, DOI: [10.1109/JOE.2013.2278891](https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2278891).
43. В. С. Давидов, В. І. Богом'я, В. В. Демичев, “Принципи побудови сучасних комплексів орієнтації та навігації автономних підводних апаратів з використанням гідроакустичних систем”, Водний транспорт, вип. 2, № 6, с. 37-41, 2015
44. Kaniewski P., Kazubek J. (2009). Integrated system for heading determination. *Acta Physica Polonica-Series A General Physics*, 116(3), 325, DOI: [10.12693/APhysPolA.116.325](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.325).

45. Ho-Sung Kim, Hyeung-Sik Choi, Jong-su Yoon and P.I. Ro. Study on AHRS Sensor for Unmanned Underwater Vehicle, *International Journal of Ocean System Engineering* 1(3) (2011) 165-170, <http://dx.doi.org/IJOSE.2011.1.3.165>.

46. Sabet M. T., Daniali H. M., Fathi A., Alizadeh E. (2017). A low-cost dead reckoning navigation system for an AUV using a robust AHRS: Design and experimental analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(4), 927-939, doi: 10.1109/JOE.2017.2769838.

47. Aras M. S. M., Abdullah S. S., Shafei S. S., Ab Rashid M. Z., Jamali A. (2012). Investigation and evaluation of low cost depth sensor system using pressure sensor for unmanned underwater vehicle. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 6(2), 21.

48. Ko, N. Y., Choi, H. T., Lee, C.-M., & Moon, Y. S. (2016). *Attitude estimation using depth measurement and AHRS data for underwater vehicle navigation. OCEANS 2016 - Shanghai*. doi:10.1109/oceansap.2016.7485508.

49. Hwang, A., Ahn, N. H., & Yoon, S. I. (2013). Development of Attitude Heading Reference System based on MEMS for High Speed Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(6), 666-673, <https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.6.666>.

50. Hwang, A., & Yoon, S. I. (2015). A study on attitude heading reference system based micro machined electro mechanical system for small military unmanned underwater vehicle. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 39(5), 522-526, <https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.5.522>.

51. Ullah B., Ovinis M., Baharom M. B., Javaid M. Y., Izhar S. S. (2015). Underwater gliders control strategies: A review. *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*. doi:10.1109/ascc.2015.7244859.

52. Блінцов В. С., Грудініна Г. С. (2018). Особливості керування стабілізованим рухом автономним ненаселеним підводним апаратом в умовах дії зовнішніх збурень. *Інформаційні системи, механіка та керування*, (19), 122-137, DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804192018169624>.

53. S. A. Salman, G. A. Sreenatha and Y. C. Jin, Indirect adaptive fuzzy control of unmanned aerial vehicle, Proc. 17th Congr. Int. Federation of Automatic Control (2008) pp. 13229–13243.
54. Yan, Z., Yang, Z., Zhang, G., Zhou, J., Pan, X., & Yue, L. (2019, July). Diving Control of Underactuated UUV Based on Backstepping Upper Bound Sliding Mode Method. In *2019 Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 381-385). IEEE, doi: 10.23919/chicc.2019.8865195.
55. Zhang, W., Liang, Z., Sun, X., Teng, Y., Song, X., & Yan, Z. (2017). Path following control for an under-actuated UUV based on adaptive sliding mode control. *International Journal of Robotics and Automation*, 32(5), 458-470.
56. Liu S., Liu Y., Wang N. Robust adaptive self-organizing neuro-fuzzy tracking control of UUV with system uncertainties and unknown dead-zone nonlinearity //Nonlinear Dynamics. – 2017. – Т. 89. – №. 2. – С. 1397-1414.
57. Ravell D. A. M., Maia M. M., Diez F. J. Modeling and control of unmanned aerial/underwater vehicles using hybrid control //Control Engineering Practice. – 2018. – Т. 76. – С. 112-122, doi: 10.1016/j.conengprac.2018.04.006.
58. Cheng C., Sha Q., He B., Li G. (2021). Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review. *Ocean Engineering*, 235, 109355. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109355>.
59. Mastufa Dinc (2018). Modeling and Simulation of Autonomous Underwater Dynamics. Chapter in Book “Mobile Robots” - Volume 1. Publisher: InTechOpen Ltd. Pp.1-20, Режим доступу до ресурсу URL: https://www.researchgate.net/publication/325828234_Modeling_Simulation_of_Autonomous_Underwater_Vehicle_Dynamics
60. Aras, M. S. M., Zhe, K. L., Aripin, M. K., Chaing, T. P., Shah, H. N. M., Khamis, A. & Rashid, M. Z. A. (2019). Design analysis and modelling of autonomous underwater vehicle (AUV) using CAD. *Indian J. Geo-Marine Sci.*, vol. 48, pp. 1081–1090, 2019.
61. Гуриненко, С., Бурау, Н. (2023). Огляд математичних та алгоритмічних методів систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата із складною динамікою руху. *Measuring and*

computing devices in technological processes, (2), 42–48. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-6>.

62. Бурай Н., Гуриненко С. (2023). Аналіз систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата із складною динамікою руху. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, (65(1), 5–12. [https://doi.org/10.20535/1970.65\(1\).2023.283195](https://doi.org/10.20535/1970.65(1).2023.283195).

63. Alam, K., Ray, T., & Anavatti, S. G. (2015). Design optimization of an unmanned underwater vehicle using low-and high-fidelity models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(11), 2794-2808.

64. Du X., Wang H., Hao C. & Li X. (2014). Analysis of hydrodynamic characteristics of unmanned underwater vehicle moving close to the sea bottom. *Defence Technology*, 10(1), 76–81. doi:10.1016/j.dt.2014.01.007.

65. M. Lombard, *SolidWorks 2013 Bible*, Wiley, 2013.

66. Бурай, Н. І., Величко, С. М., & Гуриненко, С. О. (2021). Моделювання динаміки автономного безпілотного підводного апарата за простого руху. *KPI Science News*, (3), DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.3.243586>.

67. Manual, U. D. F. (2009). ANSYS FLUENT 12.0. *Theory Guide*, 67.

68. Stolarski, T., Nakasone, Y., & Yoshimoto, S. (2018). *Engineering analysis with ANSYS software*. Butterworth-Heinemann.

69. С.О. Гуриненко, Н.І. Бурай, В.О. Суржок. Моделювання та аналіз складного руху автономного безпілотного підводного апарата. *Електронне Моделювання* 2023, 45(3):81-91, DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.081>.

70. S. Bhat & I. Stenius, “Hydrobatics: a review of trends, challenges and opportunities for efficient and agile under actuated AUVs”, [2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop \(AUV\)](https://doi.org/10.1109/AUV.2018.8729805), 1-8. doi: [10.1109/AUV.2018.8729805](https://doi.org/10.1109/AUV.2018.8729805).

71. S. Bhat, I. Stenius & T. Miao, “Real-time flight simulation of hydrobatic AUVs over the full 0° - 360° envelope”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 46, No. 4, 2021, 1114-1131. doi: 10.1109/JOE.2021.3076178.

72. Гуриненко, С. О. (2023) «Моделювання, CFD-розрахунків та оцінка гідродинамічних коефіцієнтів автономного безпілотного підводного

апарата», *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 67(6), с. 5–13. doi: 10.34229/1028-0979-2022-6-1.

73. Safari F., Rafeeyan M., Danesh M. (2022). Estimation of hydrodynamic coefficients and simplification of the depth model of an AUV using CFD and sensitivity analysis. *Ocean Engineering*, 263, 112369. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112369>.

74. Zhang H. X., Pan Y. C. (2006). Application CFD to compare submarine hull forms. *Chuanbo Lixue (Journal of Ship Mechanics)*, 10(4), 1-8.

75. W. H. Wang, X. Q. Chen, A. Marburg, J. G. Chase and C. E. Hann, "A Low-Cost Unmanned Underwater Vehicle Prototype for Shallow Water Tasks," *2008 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, Beijing, China, 2008, pp. 204-209, doi: 10.1109/MESA.2008.4735649.

76. Sivuhin D. V. Obshii kurs fiziki. Tom I. Mehanika., М: Nauka, 1974, — 350 p.

77. ANSYS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.ansys.com/>.

78. ANSYS Meshing [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу URL: <https://simutechgroup.com/why-is-meshing-important-for-fea-fluid-simulations/>.

79. В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко, *Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: Навчальний посібник*. Кировоград: ПОЛИМЕД Сервис, 2011.

80. P. G. Savage, "Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithms," *J. Guid. Control. Dyn.*, pp. 19–28, 1998.

81. P. G. Savage, "Blazing Gyros – The Evolution of Strapdown Inertial Navigation Technology For Aircraft," *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 36, no. 3, pp. 637–655, 2013.

82. Ю. Ф. Лазарев, Я. Г. Бобровицька, Розроблення і моделювання алгоритмів безплатформової системи орієнтації: Навчальний посібник. К: НТУУ "КПІ," 2011.

83. Лазарев Ю. Ф. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації: підруч. / Ю. Ф. Лазарев, П. М. Бондар. – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 644 с.

84. В. В. Мелешко, *Инерциальные навигационные системы. Начальная выставка: Учебное пособие*. К: Корнійчук, 1999.

85. O. J. Woodman, “An introduction to inertial navigation,” Cambridge, 2007.
86. V. V. Avrutov, P. M. Aksonenko, N. I. Bouraou, P. Henaff, and L. Ciarletta, “Expanded calibration of the MEMS inertial sensors,” in *Proc. 2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017* 2017, pp. 675–679.
87. В.В. Аврутов, “Розвиток теорії автономного визначення навігаційних параметрів рухомих та нерухомих об’єктів,” Дис. докт. техн. наук : спец. 05.11.03, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
88. В. В. Аврутов, “О скалярной калибровке блока гироскопов и акселерометров,” *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування*, №. 40, С. 10–14, 2010.
89. В. В. Аврутов, *Испытания инерциальных приборов*. Київ: НТУУ “КПІ,” 2016.
90. С. В. Головач, “Методы испытаний и калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем,” Дис. канд. техн. наук : спец. 05.11.03, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.
91. Titterton, D., Weston, J. L. (2004). Strapdown inertial navigation technology.
92. R. M. Rogers, “Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems,” 2nd Edition, AIAA Series, Virginia, 2003.
93. Селезнев В.П. Навигационные устройства. – Машиностроение, 1974. – 660 с.
94. Эдвардс А. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы // Вопросы ракетной техники. – 1973. №5 С. 47 – 70.
95. Дмитриченко Л.А., Лопатин В.И. Особенности алгоритмов БИНС. – В кн.: Вопросы управления космическими аппаратами. – М.: Мир, 1975, с. 95 – 117.
96. Бромберг Л.В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, 1979. – 296с.
97. Delhayе, F. (Safran Electronics & Defense, France), SpaceNaute® the HRG Based Inertial Reference System of Ariane 6 European space launcher, DOI:[10.1134/S2075108719010036](https://doi.org/10.1134/S2075108719010036).

98. Passaro, V. M. N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., & Campanella, C. E. (2017). *Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective*. *Sensors*, 17(10), 2284. doi:10.3390/s17102284/
99. Lynch D. D. “Coriolis Vibratory Gyroscope”.- IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros, IEEE std.1431TM, Annex B, pp. 56-66, Dec. 2004.
100. Фізичні основи орієнтації і навігації: навч. посіб. / П.М. Бондар, Ю.В. Степанковський. — Кіровоград : ПОЛІМЕД-Сервіс, 2009. — 202 с.
101. Lefevre H. C. (2022). *The fiber-optic gyroscope*. Artech house.
102. Gad-el-Hak, M. (Ed.). (2001). *The MEMS handbook*. CRC press.
103. Judy, J. W. (2001). Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. *Smart materials and Structures*, 10(6), 1115, DOI 10.1088/0964-1726/10/6/301.
104. Ko, W. H. (2007). Trends and frontiers of MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1), 62-67, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.02.001>.
105. Zhang, P., Zhan, X., Zhang, X. *et al.* Error characteristics analysis and calibration testing for MEMS IMU gyroscope. *AS* 2, 97–104 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42401-019-00028-8>.
106. Silicon Sensing, PinPoint MEMS Gyroscopes – Режим доступу до ресурсу URL: <https://www.siliconsensing.com/products/gyroscopes/crm-pinpoint/>.
107. Kant, R. A., & Nagel, D. J. (1996). *Characteristics and performance of MEMS accelerometers*. *AIP Conference Proceedings*. doi:10.1063/1.50336.
108. Varanis, M., Silva, A., Mereles, A., & Pederiva, R. (2018). *MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: a comprehensive review with applications*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(11). doi:10.1007/s40430-018-1445-5.
109. Гуриненко С. О. (2023). Математична та імітаційна моделі мікроелектромеханічного акселерометра автономної інерціальної системи визначення просторового положення та місцезнаходження. *International Scientific*

Technical Journal "Problems of Control and Informatics", 68(4), 38–50.
<https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-4-3>.

110. Инерциальная навигация. Анализ и проектирование./ Под ред. К. Ф. О’Доннела. – М.: Наука, 1969. – 592с.

111. Grigorie T. L. (2008, May). The Matlab/Simulink modeling and numerical simulation of an analogue capacitive micro-accelerometer. Part 1: Open loop. In *2008 International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design* (pp. 105-114). IEEE.

112. Grigorie T. L. (2008, May). The Matlab/Simulink modeling and numerical simulation of an analogue capacitive micro-accelerometer. Part 2: Closed loop. In *2008 International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design* (pp. 115-121). IEEE.

113. Grigorie T. L., Lungu M., Edu I. R., Obreja R. (2010). Concepts for error modeling of miniature accelerometers used in inertial navigation systems. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, 34, 212-219.

114. Grigorie T. L., Jula N., Cepisca C., Racuciu, C., Raducanu D. (2008). Evaluation Method of the Sensors Errors in an Inertial Navigation System. *Wseas Transactions on Circuits and Systems*, 7(12), pp. 977-987.

115. Analog Devices. Low Noise High Frequency MEMS Accelerometers ADXL1001/ADXL1002. Rev.0. 2017.

116. Analog Devices. Adxl335: Small, low power, 3-axis ± 3 g accelerometer. ADXL335 Data Sheet Rev B. 2010 Jan.

117. Moritz H. (2000). Geodetic reference system 1980. *Journal of geodesy*, 74(1), 128-133.

118. Grigorie, T. L., Lungu, M., Edu, I. R., & Obreja, R. (2010, December). Concepts for error modeling of miniature gyros used in inertial navigation systems. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechanical Engineering, Robotics and Aerospace (IC-MERA 2010), Bucharest, Romania*.

119. Analog Devices, ADXRS300 $\pm 300^\circ/\text{sec}$ Yaw Rate Gyro. ADXRS610 datasheet, Rev. A, Feb. 2010.

120. El-Sheimy, N., Hou, H., & Niu, X. (2008). *Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(1), 140–149. doi:10.1109/tim.2007.908635.
121. Galleani, L., & Tavella, P. (2009). *The dynamic Allan variance. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 56(3), 450–464. doi:10.1109/tuffc.2009.1064.
122. J. E. Bortz, “A new mathematical formulation for strapdown inertial navigation,” *IEEE Transactions Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 61–66, 1971.
123. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973 – 303с.
124. Antonelly G. Underwater Robots. – Springer-Verlag, 2006.
125. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. – John Willei and Sons, 1994. – 494 p.
126. Scisiliano B., Khanib O. Handbook of Robotics. – New-York, Springer, 2010. – 1628 p.
127. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles // *Intellegent Service Robotics*. – 2011. – No.2. – P. 221-231.
128. Гуриненко С. О. Організація систем керування сучасних безпілотних підводних апаратів: тези допов. на XIV Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених “ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ”, Київ, 2021, с. 34-37.
129. Гуриненко, С. (2023). Апаратно-програмний комплекс автономного безпілотного підводного апарата: Огляд. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 123–129. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-17>.
130. 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.
131. 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. Marani, G., Choi, S. K., & Yuh, J. (2009). *Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. Ocean Engineering*, 36(1), 15–23. doi:10.1016/j.oceaneng.2008.08.007.

132. Hatem A. Khater, Ashraf. Elsayed, and Noha. El-Shoafy, "Improved Navigation and Guidance System of AUV Using Sensors Fusion," *Journal of Communications* vol. 15, no. 6, pp. 455-468, June 2020. Doi: 10.12720/jcm.15.6.455-468.

133. Бабкін Г. В. Моделі управління проектами створення засобів морської робототехніки : дис. канд. техн. наук : 05.13.22 / Бабкін Георгій Володимирович – Миколаїв, 2016. – 268 с.

134. Гуриченко С.О., Система автоматичного керування автономним безпілотним підводним апаратом на основі мікроелектромеханічних систем, Чотирнадцята міжнарод. Наук.-практ. конф. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2021), Київ, 2021, с. 19-21.

135. Гуриченко С.О., Організація та лабораторне забезпечення дослідження мікро-оптикоелектромеханічних приладів для систем керування автономними безпілотними підводними апаратами. XXI Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 2022, 20-22.

136. Пристрій перетворення інформації універсальний: пат: 152838 Україна: G01R 13/00, G01D 5/00, G06F3/00, H03M 1/12/ С.О. Гуриченко, К.Р. Потапова, - № u202200327; заявл. 27.01.2022, опубл. 20.04.2023 – 3 с.

137. Semantic role labelling and analysis in economic and cybersecurity contexts using natural language processing classifiers. Potapova, K., Nalyvaichuk, M., Meliukh, V., Gurylenko, S., Koliada, K., Scherbyna, A. (2023). Semantic role labelling and analysis in economic and cybersecurity contexts using natural language processing classifiers. *Economic and cyber security*. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 88–122. doi: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-98-5.ch4>

138. Гуриченко С.О., Концепт універсального перетворювача інформації як елемента цифрової системи керування. ВЧЕНІ ЗАПИСКИ Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 34(73), № 1 2023, 18-24. DOI:<https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/03>.

139. Gurynenko S.O. Universal information transducer as part of multi-purpose control system. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-innovationsand-education-problems-and-prospects-15-17-sentyabrya-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>.

140. Gurynenko S.O., 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. 123-130. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiyascience-innovations-and-education-problems-and-prospects-6-8-aprelya-2022-godatokio-yaponiya-arhiv>.

141. Zhu, X., Song, B., Wang, S., & Yang, S. (2018). Safety analysis of resting on the seafloor of an AUV with mooring system. – Режим доступа URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73593485>.

142. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С., Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник - Л.: Судостроение, 1988.-272 с.

143. Dorf R. C. & Bishop R. H. (2017). *Modern control systems* (Thirteenth). Pearson.

144. DO-331: Model Based Development and Verification – Режим доступа URL: <https://www.rapitasystems.com/do-331>.

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1) Бурау, Н., & Гуриненко, С. (2023). Аналіз систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата із складною динамікою руху. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, (65(1), 5–12, ISSN (p) 0321-2211, ISSN (e) 2663-3450. [https://doi.org/10.20535/1970.65\(1\).2023.283195](https://doi.org/10.20535/1970.65(1).2023.283195).

2) Гуриненко, С., & Бурау, Н. (2023). Огляд математичних та алгоритмічних методів систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата із складною динамікою руху. *Measuring and computing devices in technological processes*, (2), 42–48, ISSN 2219-9365. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-6>.

3) Гуриненко, С. О. (2023). Математична та імітаційна моделі мікроелектромеханічного акселерометра автономної інерціальної системи визначення просторового положення та місцезнаходження. *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 68(4), 38–50, ISSN 2786-6491. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-4-3>.

4) С.О. Гуриненко, Н.І. Бурау, В.О. Суржок. Моделювання та аналіз складного руху автономного безпілотного підводного апарата. *Elektronnoe Modelirovanie* 2023, 45(3):81-91, ISSN 0204–3572, DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.081>.

5) Гуриненко, С. (2023). Апаратно-програмний комплекс автономного безпілотного підводного апарата: Огляд. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 123–129, ISSN 2219-9365. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-17>.

6) Гуриненко С.О., Концепт універсального перетворювача інформації як елемента цифрової системи керування. ВЧЕНІ ЗАПИСКИ Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 34(73),

№ 1 2023, 18-24, ISSN 2663-5941 (Print) ISSN 2663-595X (Online).
DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/03>.

7) Гуриченко, С. О. (2023). Моделювання, CFD-розрахунків та оцінка гідродинамічних коефіцієнтів ав-тономного безпілотного підводного апарата. *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 67(6), 5–13, ISSN 2786-6491. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2022-6-1>.

8) Бурай, Н. І., Величко, С. М., & Гуриченко, С. О. (2021). Моделювання динаміки автономного безпілотного підводного апарата за простого руху. *KPI Science News*, (3), ISSN 2617-5509 (друкований), ISSN 2663-7472 (електронний), DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.3.243586>.

9) Гуриченко С.О. Чисельне моделювання та оцінка гідродинамічних коефіцієнтів автономного безпілотного підводного апарата. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2023). Шістнадцята міжнародна науково-практична конференція 23-24 травня 2023 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2023, 30-33 – 402 с. (збірка тез).

10) Гуриченко С.О. Організація та лабораторне забезпечення дослідження мікро-оптикоелектромеханічних приладів для систем керування автономними безпілотними підводними апаратами. XXI Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 2022, 20-22.

11) Gurynenko S.O. 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. 123-130.

12) Gurynenko S.O., Potapova K.R. Universal Information Transducer as part of multi-purpose control system. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 106-110.

13) Гуриченко С.О., Бурай Н.І. Система автоматичного керування автономним безпілотним підводним апаратом на основі мікроелектромеханічних систем. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2021). Чотирнадцята міжнародна науково-практична конференція 18-19 травня 2021 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2021. – 256 с. (збірка тез).

14) Гуриченко С.О. Організація систем керування сучасних безпілотних підводних апаратів. Матеріали Всеукр. XIV наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18–19 трав. 2021 р. Київ : «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 34–37.

15) Патент на корисну модель. ПРИСТРІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНИЙ: пат: 152838 Україна: G01R 13/00, G01D 5/00, G06F3/00, H03M 1/12/ С.О. Гуриченко, К.Р. Потапова, - № u202200327; заявл. 27.01.2022, опубл. 20.04.2023 – 3 с.

ДОДАТОК Б

Документи та акти, які підтверджують впровадження дисертаційної роботи

ISR Technology LTD
19, Chernobylskaya Str. 07141, 02094, Kyiv, Ukraine
+380 95 886 6562

ISR
TECHNOLOGY

ТОВ «АЙ ЕС АР ТЕХНОЛОДЖИ»
12094, м.Київ, вул. Черніобільська, буд. 19, каб. 402 (19-й)
KYIV, UKRAINE 071410940209402094

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ТОВ «АЙ ЕС АР
ТЕХНОЛОДЖИ»
ТРЕТЯК Є.В.
« 202__ р.

АКТ
впровадження результатів наукових досліджень

Ми, що нижче підписалися, директор науково-дослідної фірми ТОВ «АЙ ЕС АР ТЕХНОЛОДЖИ» - Третяк Євгеній Володимирович, технічний директор Косолапкін Павло Ігорович, склали цей акт про те, що наукові дослідження Гуриненка Станіслава Олеговича та їх результати, які були отримані у дисертаційній роботі «Система управління, орієнтації та навігації автономних безпілотних підводних апаратів на основі MEMS технологій» використані у розробках та дослідній роботі ТОВ «АЙ ЕС АР ТЕХНОЛОДЖИ», а саме методи чисельного дослідження конструктивної форми при розробці маневрового дрона та методи дослідження чутливих елементів систем орієнтації та навігації та методи дослідження системи орієнтації та навігації на етапі дослідження та лабораторно-дослідних випробувань окремих вузлів безпілотного літального комплексу.

Технічний директор
ТОВ «АЙ ЕС АР ТЕХНОЛОДЖИ»
Директор науково-дослідної фірми
ТОВ «АЙ ЕС АР ТЕХНОЛОДЖИ»

Косолапкін П.І.
Третяк Є.В.

+380958866562



Публічне акціонерне товариство
Науково-технічний комплекс
ЕЛЕКТРОНПРИЛАД

вул. Богдана Гаврилишина, 27/29, Київ, 04116, Україна,
 Тел.: +38 044 300 10 34 Факс: +38 044 300 10 35
 Email: info@electronprylad.com.ua https://electronprylad.com.ua

№ _____
 На № _____ від _____

АКТ

впровадження результатів наукового дослідження

Ми, що нижче підписалися, заступник генерального директора з розвитку та інновацій - головний конструктор Мацюк Дмитро Михайлович, начальник конструкторського відділу Троїцький Олександр Васильович, склали цей акт про те, що результати наукових досліджень Гуриненка Станіслава Олеговича, які отримано у дисертаційній роботі «Система управління, орієнтації та навігації автономних безпілотних підводних апаратів на основі мікроелектромеханічних технологій», а саме імітаційні моделі чутливих елементів безплатформної інерціальної навігаційної системи, імітаційна модель безплатформної інерціальної навігаційної системи та методи комплексного дослідження апарата використані на етапі розробки апаратного та програмно-математичного забезпечення бортових приладів для безпілотних апаратів.

**Заступник генерального директора
 з розвитку та інновацій –
 головний конструктор**

Дмитро МАЦЮК

**Начальник
 конструкторського відділу**

Олександр ТРОЇЦЬКИЙ

ДОДАТОК В

**Результати розрахунку гідродинамічних сил та коефіцієнтів для кожного
значення швидкості та відповідного кута диференту**

Таблиця В1 Результати розрахунку гідродинамічних сил та коефіцієнтів при
швидкості 2 м/с

$\gamma, ^\circ$	F_x	F_y	C_x	C_y
0	25.6639	-0.249834	0.0353815	-0.000344434
5	26.9076	43.5864	0.0372378	0.0603198
10	38.2705	74.7545	0.0535754	0.10465
15	52.2785	123.064	0.0746161	0.175648
20	67.9854	115.704	0.0997432	0.169752
25	99.0695	162.671	0.150701	0.24745
30	114.502	172.979	0.182279	0.275369
35	157.206	195.894	0.26458	0.329694
40	178.417	211.753	0.321096	0.381091
45	210.134	206.169	0.378177	0.371042

Таблиця В2 Результати розрахунку гідродинамічних сил та коефіцієнтів при
швидкості 5 м/с

$\gamma, ^\circ$	F_x	F_y	C_x	C_y
0	155.6	3.9242	0.0343228	0.000865613
5	172.953	344.931	0.0382962	0.0763768
10	233.624	528.214	0.0523286	0.118313
15	301.428	708.833	0.0688355	0.161873
20	449.467	852.716	0.105508	0.200167
25	600.449	932.76	0.146141	0.227022
30	769.152	1116.72	0.195909	0.284436
35	886.277	1133.95	0.238659	0.305353

$\gamma, ^\circ$	F_x	F_y	C_x	C_y
40	1130.29	1236.84	0.325468	0.356149
45	1304.68	1290.41	0.406999	0.402548

Таблиця В3 Результати розрахунку гідродинамічних сил та коефіцієнтів при швидкості 10 м/с

$\gamma, ^\circ$	F_x	F_y	C_x	C_y
0	351.512	-28.6307	0.0190692	-0.00155319
5	467.642	1249.36	0.0254661	0.0680355
10	742.251	2000.18	0.0408877	0.110182
15	1146.9	2272.18	0.0644134	0.127612
20	1576.51	3001.78	0.0910133	0.173295
25	2140.47	3568.37	0.128123	0.213593
30	2774.28	4054.01	0.173785	0.25395
35	3455.7	4450.64	0.228857	0.294748
40	4195.36	4745.44	0.297105	0.33606
45	5786.84	5909.22	0.443966	0.453355

Таблиця В4 Результати розрахунку гідродинамічних сил та коефіцієнтів при швидкості 15 м/с

$\gamma, ^\circ$	F_x	F_y	C_x	C_y
0	774.07	-28.2096	0.0186634	-0.000680156
5	963.673	2953.14	0.0233236	0.0714743
10	1659.28	4634.45	0.0406237	0.113464
15	2553.99	5303.9	0.0637508	0.132392
20	3547.09	6748.1	0.0910117	0.173144
25	4775.33	7984.13	0.127039	0.212404
30	6223.15	9134.52	0.173257	0.254312
35	7737.72	9992.62	0.227751	0.294121

$\gamma, ^\circ$	F_x	F_y	C_x	C_y
40	9398.93	10649	0.295825	0.335171
45	11039.5	11009	0.376421	0.375381

ДОДАТОК Г

Часові реалізації результатів моделювання БІНС за простого руху та руху із хитавицею

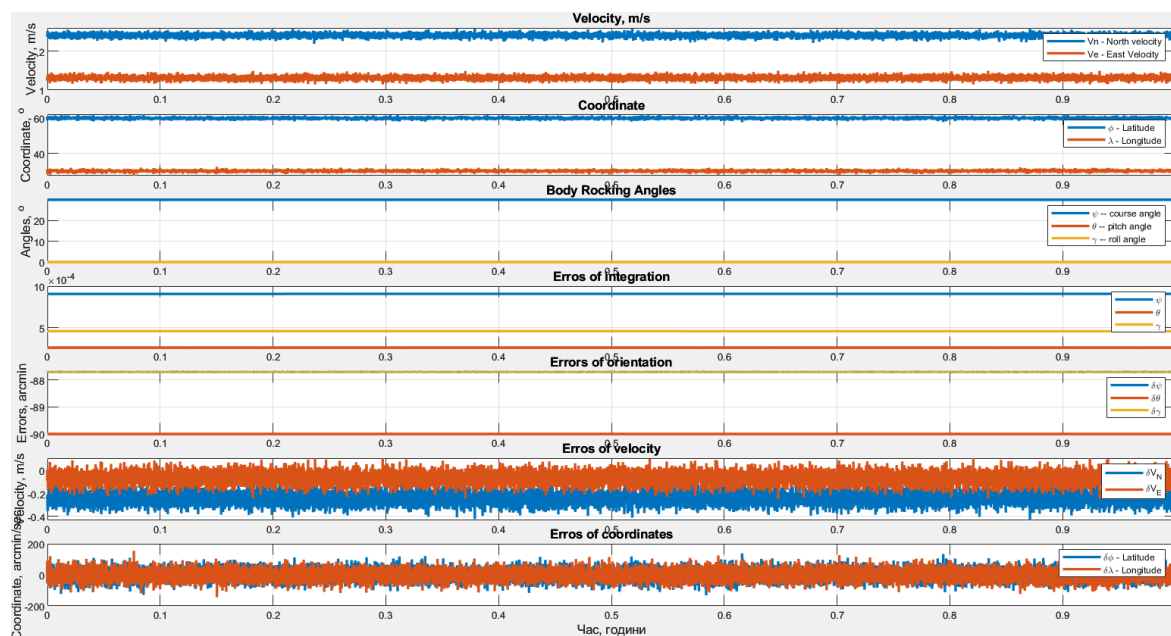


Рисунок Г.1 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 30°

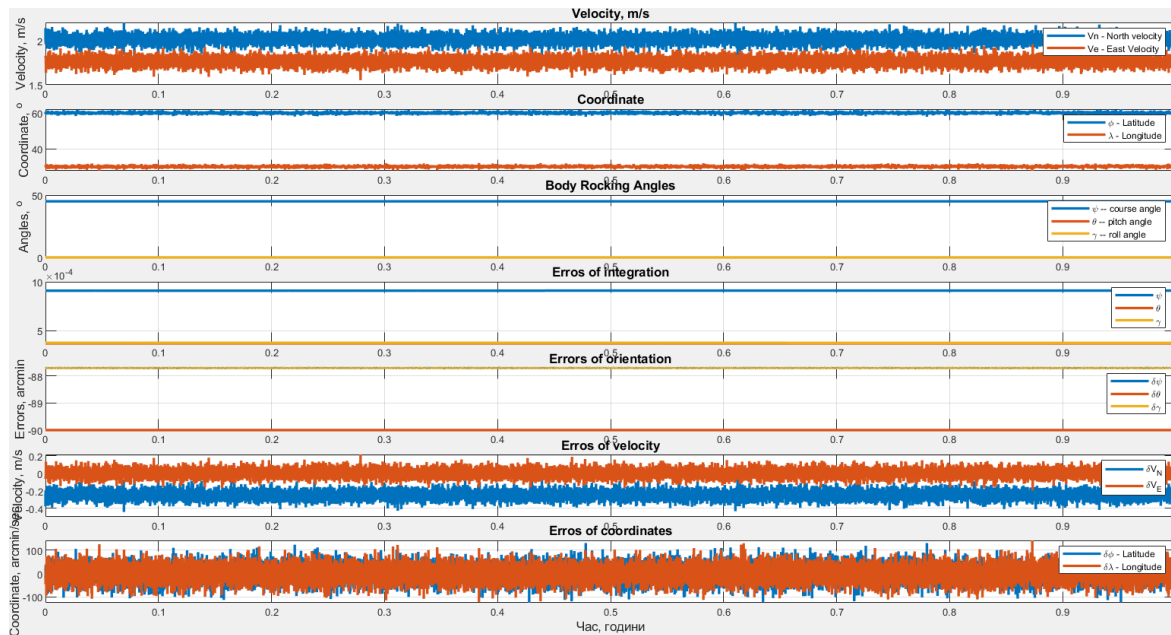


Рисунок Г.2 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 45°

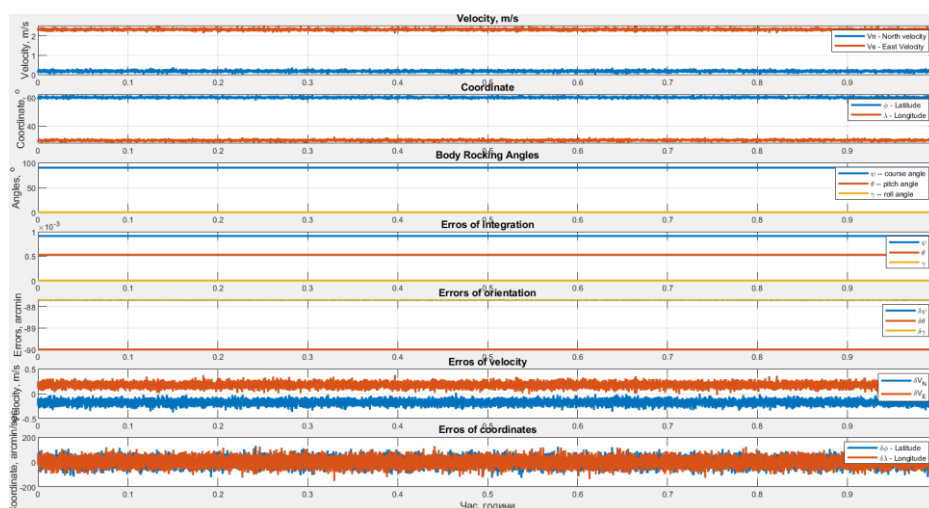


Рисунок Г.3 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 90°

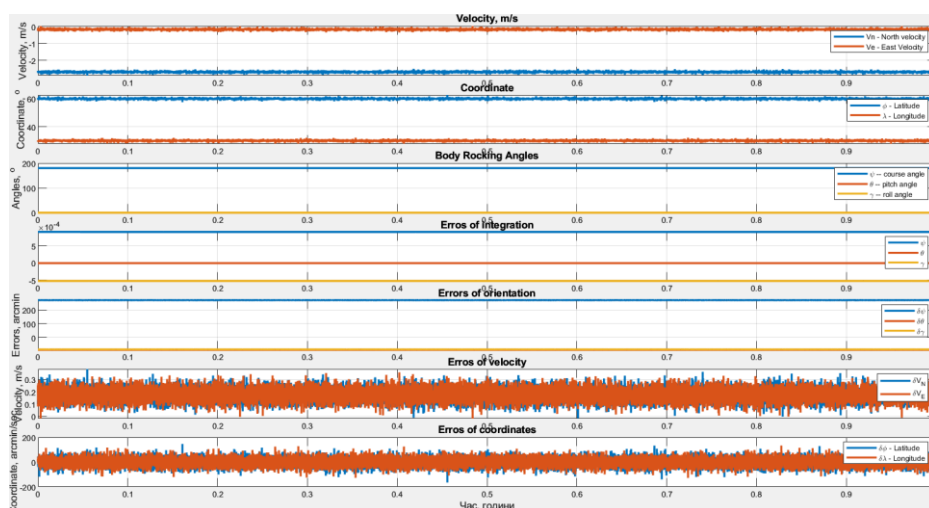


Рисунок Г.4 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 180°

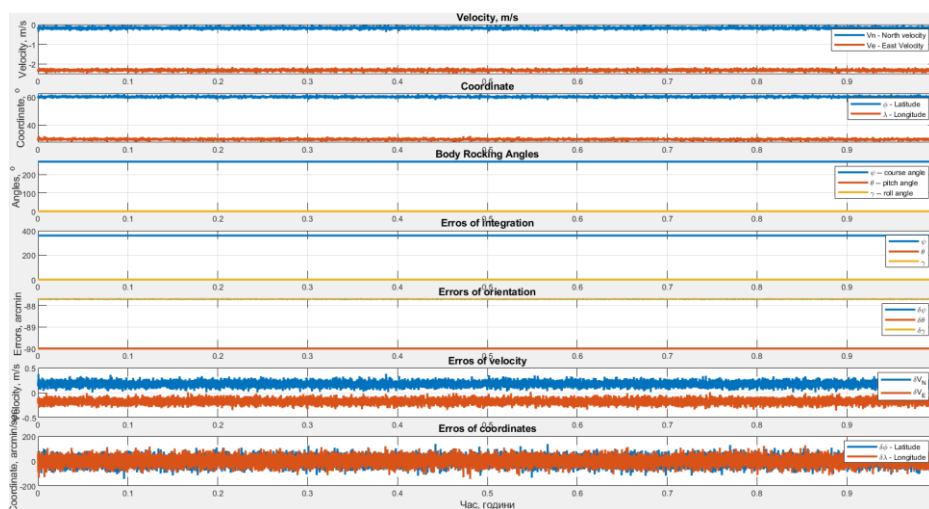


Рисунок Г.5 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 270°

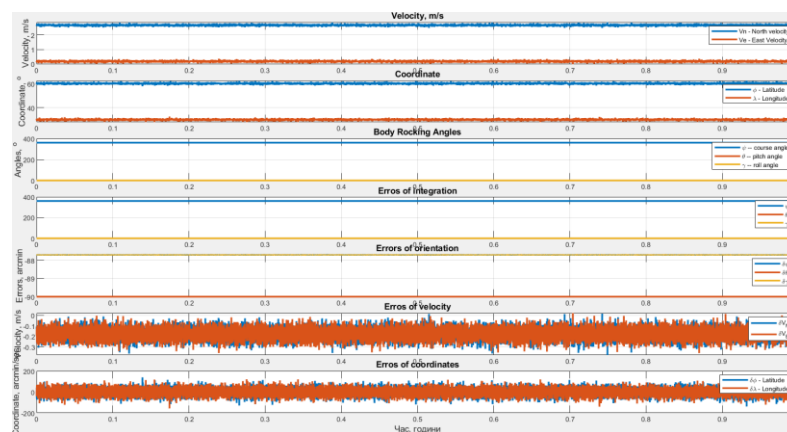


Рисунок Г.6 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 360°

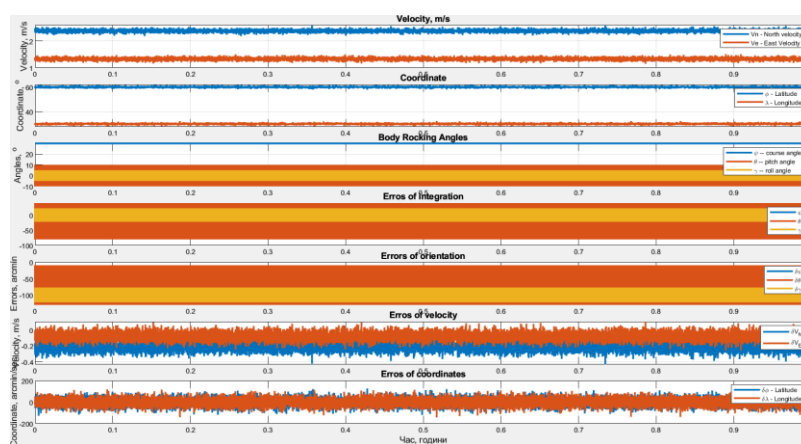


Рисунок Г.7 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 30° та із бічними коливаннями із амплітудою 10° за креном, амплітудою 5° за диферентом

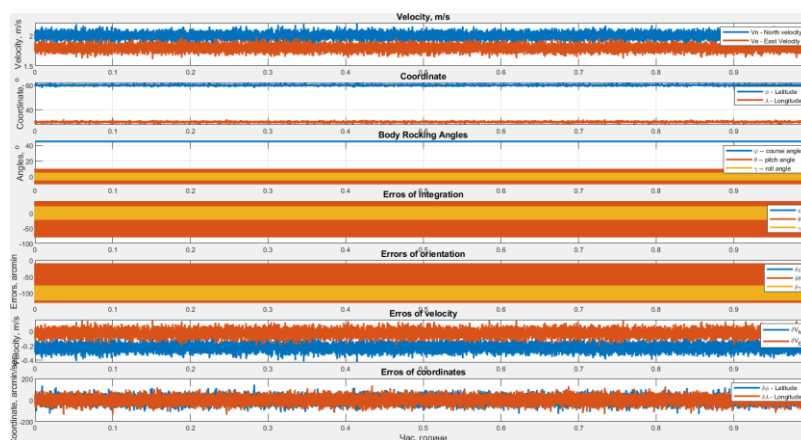


Рисунок Г.8 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 45° та із бічними коливаннями із амплітудою 10° за креном, амплітудою 5° за диферентом

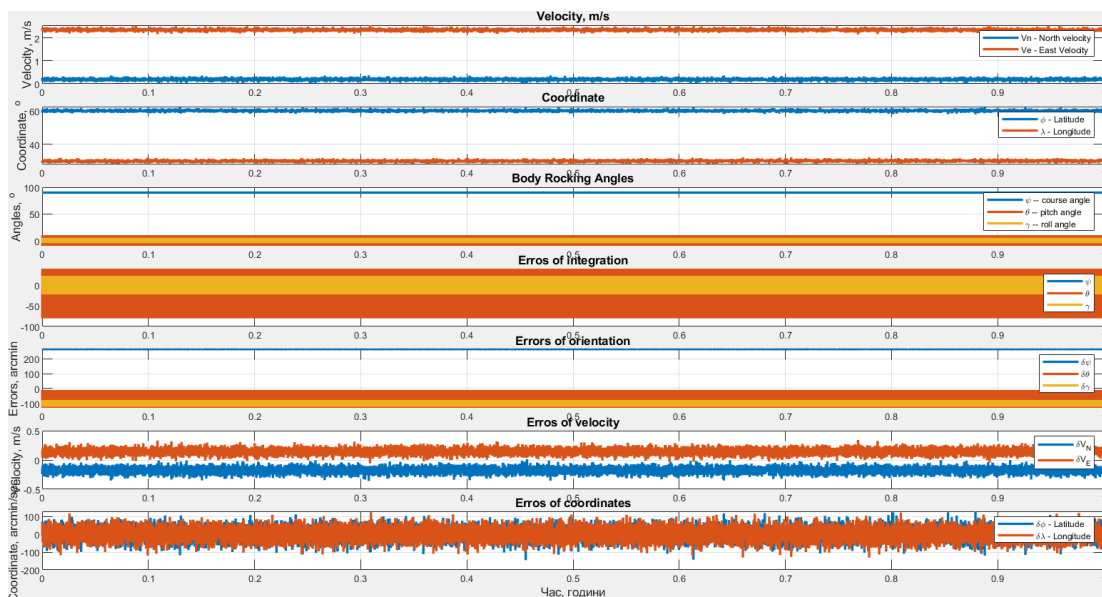


Рисунок Г.9 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 90° та із бічними коливаннями із амплітудою 10° за креном, амплітудою 5° за диферентом

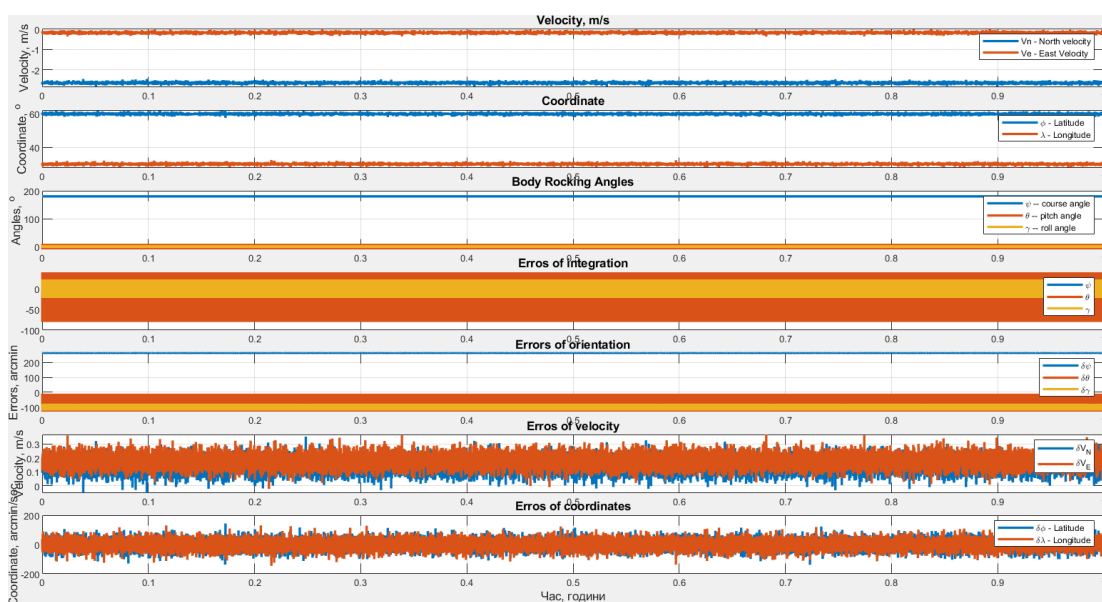


Рисунок Г.10 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 180° та із бічними коливаннями із амплітудою 10° за креном, амплітудою 5° за диферентом

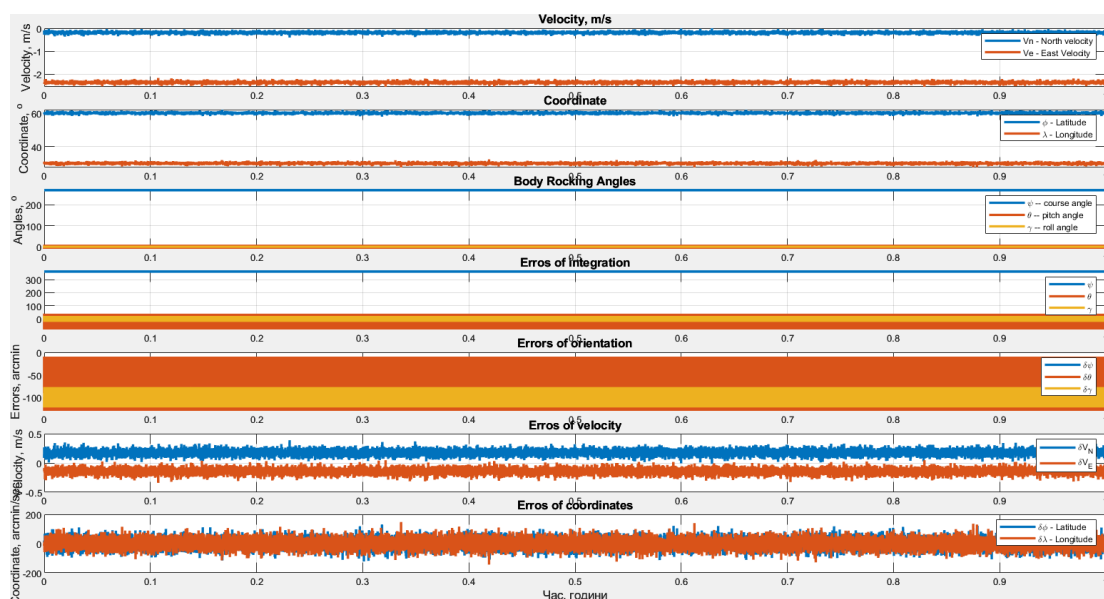


Рисунок Г.11 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 270° та із бічними коливаннями із амплітудою 10° за креном, амплітудою 5° за диферентом

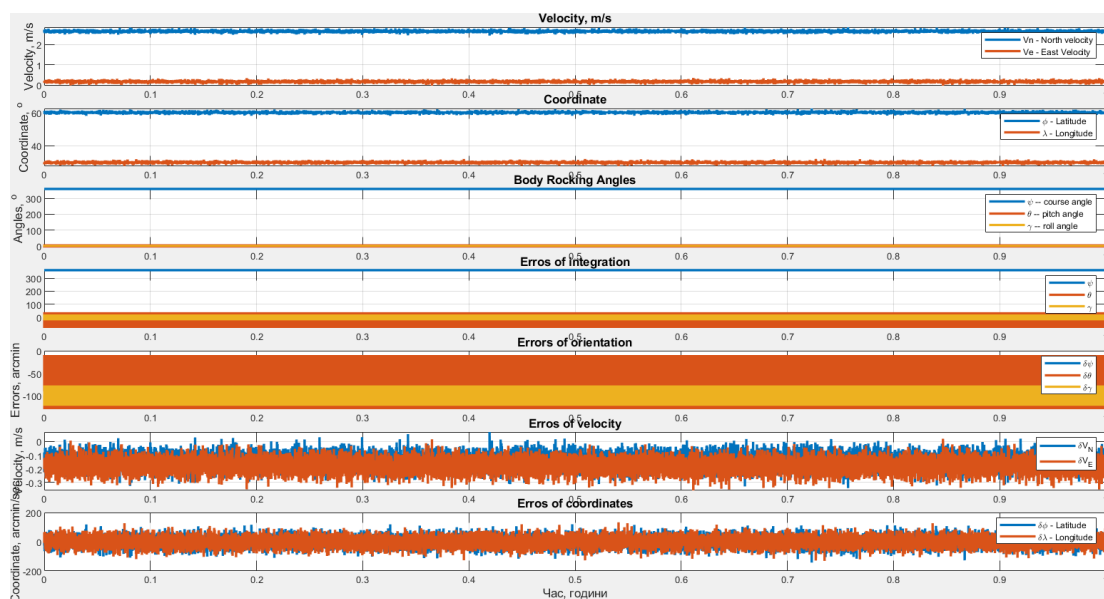


Рисунок Г.12 Часова реалізація вихідних сигналів БІНС при русі курсом 360° та із бічними коливаннями із амплітудою 10° за креном, амплітудою 5° за диферентом

ДОДАТОК Д

Значення сигналу керування за кутом курсу у залежності від значень коефіцієнтів ПІД регулятора

1. Значення коефіцієнтів:

- Коефіцієнт пропорційного сигналу $K_p = 1$;
- Коефіцієнт інтегрального сигналу $K_i = 1$;
- Коефіцієнт диференційного сигналу $K_d = 1$;

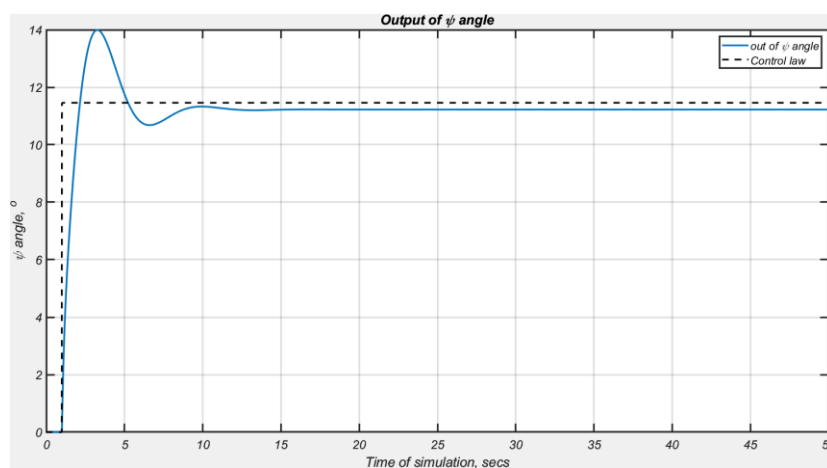


Рисунок Д.1 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при ступінчастому вхідному діянні за кутом курсу

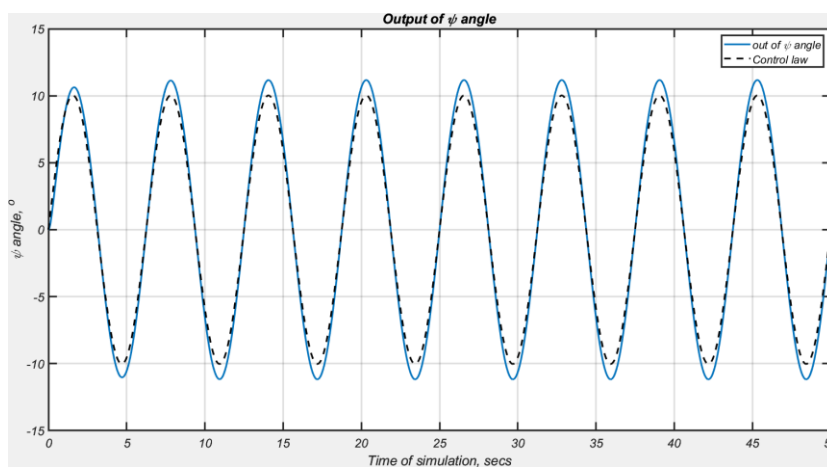


Рисунок Д.2 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при синусоїдальному вхідному діянні

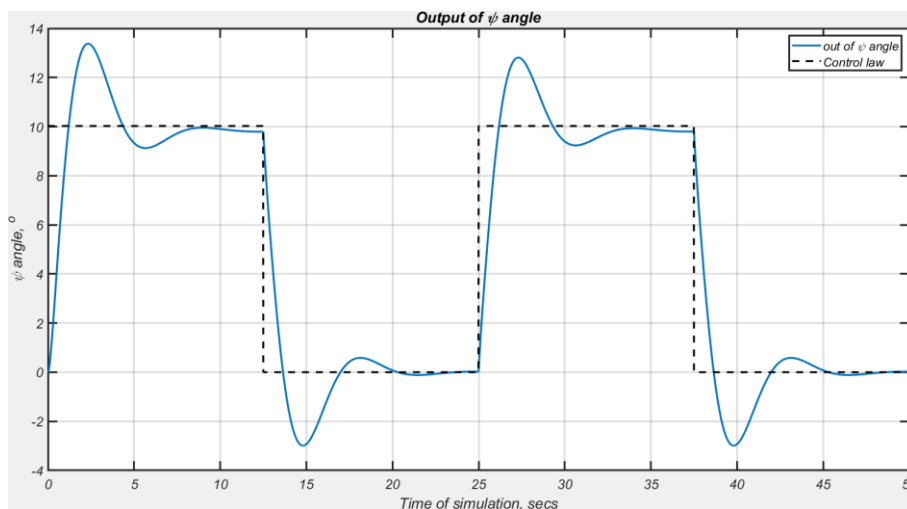


Рисунок Д.3 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при
вхідному діянні типу меандр за кутом курсу

2. Значення коефіцієнтів:

- Коефіцієнт пропорційного сигналу $K_p = 0,9$;
- Коефіцієнт інтегрального сигналу $K_i = 0,5$;
- Коефіцієнт диференційного сигналу $K_d = 0,75$;

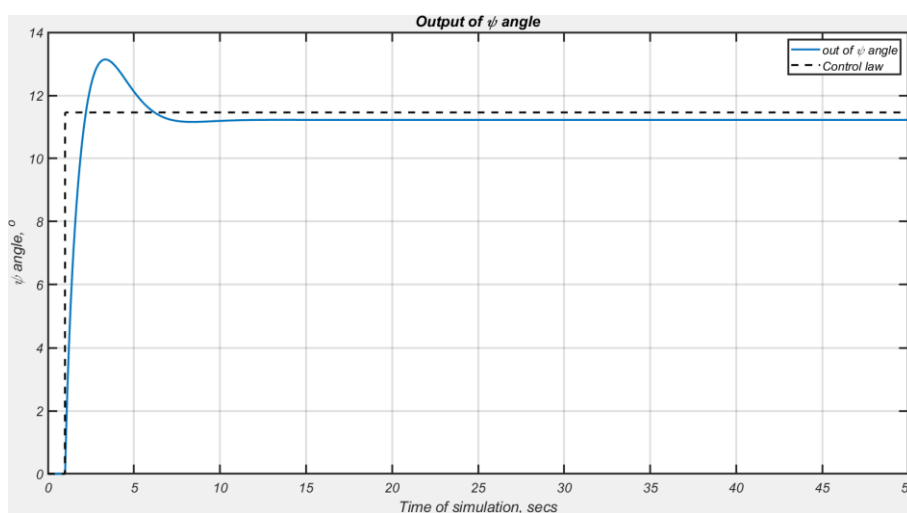


Рисунок Д.4 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при
ступінчатому вхідному діянні за кутом курсу

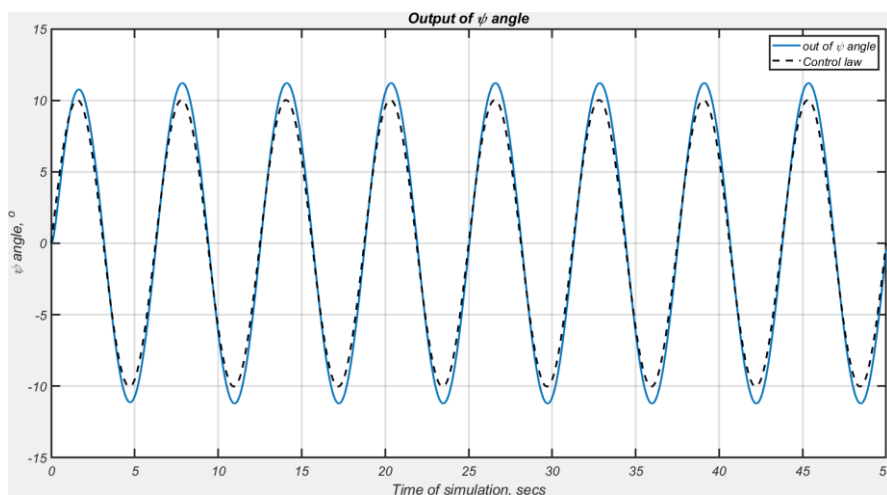


Рисунок Д.5 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при синусоїдальному вхідному діянні

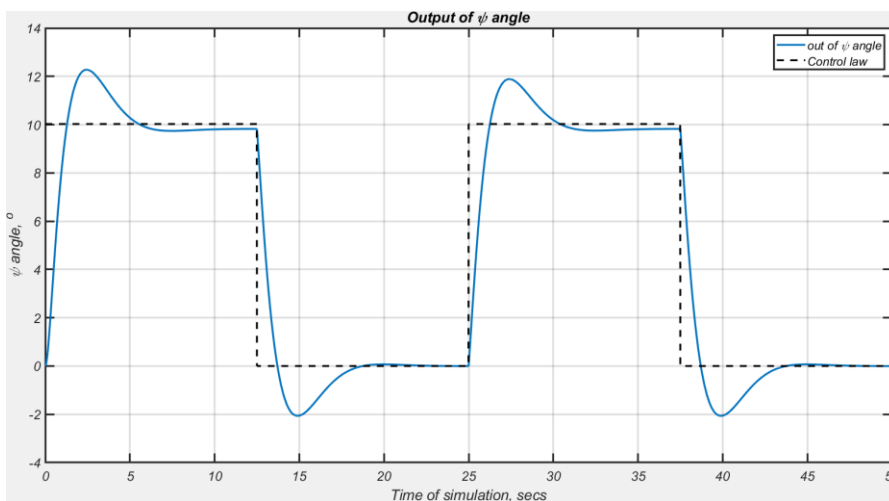


Рисунок Д.6 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при вхідному діянні типу меандр за кутом курсу

3. Значення коефіцієнтів:

- Коефіцієнт пропорційного сигналу $K_p = 0,85$;
- Коефіцієнт інтегрального сигналу $K_i = 0,05$;
- Коефіцієнт диференційного сигналу $K_d = 0,65$;

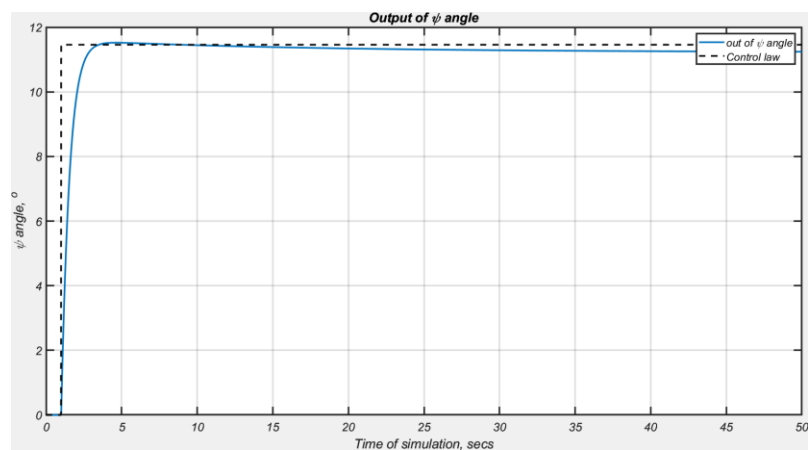


Рисунок Д.7 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при ступінчастому вхідному діянні за кутом курсу

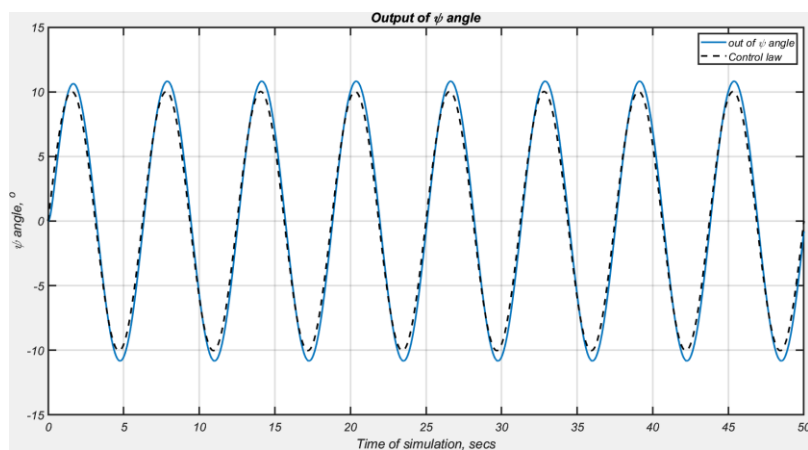


Рисунок Д.8 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при синусоїдальному вхідному діянні

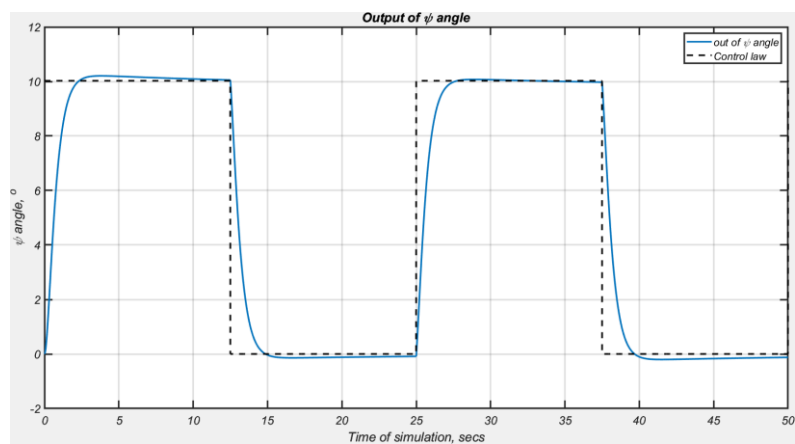


Рисунок Д.9 Графік вихідного сигналу керування курсового стерна при вхідному діянні типу меандр за кутом курсу