

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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗОЛОТАРЬОВ ЄВГЕНІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 629.127.4:629.05

ДИСЕРТАЦІЯ
СИСТЕМА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РУХУ АВТОНОМНОГО БЕЗПІЛОТНОГО
ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

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 і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Є.О Золотарьов

Науковий керівник Бурау Надія Іванівна, доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Золотарьов Є. О. Система візуалізації руху автономного безпілотної підводного апарату. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології галузь знань (15 – Автоматизація та приладобудування). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі наукового обґрунтування та розроблення методичного і програмно-алгоритмічного забезпечення системи візуалізації руху у складі інтегрованого навігаційного комплексу автономного безпілотної підводного апарату класу міні/мікро. Актуальність теми обумовлена зростанням практичного використання малорозмірних автономних підводних апаратів у задачах гідрографії, інспекції підводних об'єктів, екологічного моніторингу та наукових досліджень, а також необхідністю забезпечення достовірного й інформативного відображення їх навігаційного стану в умовах відсутності глобальних навігаційних супутникових систем. Неможливість використання в підводному середовищі супутникової навігації обумовлює застосування автономних навігаційних засобів, насамперед інерціальних навігаційних систем і гідроакустичних методів визначення місцеположення. Масо-габаритні та енергетичні обмеження автономних безпілотної підводних апаратів (АБПА) міні/мікро класу зумовлюють застосування інерціальних сенсорів із високим рівнем випадкових завад. А компактні гідроакустичні приймачі та передавачі для міні-АБПА функціонують на підвищених частотах, що супроводжується зростанням акустичного загасання, зменшенням дальності та обмеженням точності навігаційних вимірювань.

Зазначені умови функціонування автономних безпілотних підводних апаратів визначають підвищені вимоги до систем навігації та засобів представлення навігаційної інформації, що зумовлює необхідність комплексного підходу до побудови системи візуалізації руху як складової інтегрованого навігаційного комплексу.

У дисертаційній роботі запропоновано, обґрунтовано та розроблено систему візуалізації руху у складі інтегрованого навігаційного комплексу для автономної орієнтації та навігації апарату в різних режимах його руху, передачі-прийому та відображення даних про місцезнаходження і параметри руху автономного безпілотного апарату на пристроях базової станції.

Основна частина дисертаційної роботи складається з чотирьох розділів, які присвячені дослідженню методів та засобів визначення, передачі та відображення навігаційних параметрів руху автономного безпілотного підводного апарата в системі візуалізації у складі інтегрованого навігаційного комплексу.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку автономних безпілотних підводних апаратів і систем забезпечення їх руху. Розглянуто класифікацію безпілотних підводних апаратів, основні сфери їх застосування та особливості експлуатації в підводному середовищі. Проаналізовано сучасні інерціальні, гідроакустичні та інтегровані системи навігації, а також методи їх комплексування. Встановлено, що більшість існуючих систем візуалізації орієнтовані на габаритні автономні підводні апарати або дистанційно керовані підводні комплекси та не враховують специфіку міні- і мікро-апаратів. Встановлено, що для цього класу апаратів визначальними чинниками є обмежена точність інерційних вимірювальних модулів на основі мікроелектромеханічних систем, наявність значних часових затримок у гідроакустичному каналі зв'язку, а також відсутність комплексного підходу до поєднання навігаційних алгоритмів і системи візуалізації в межах єдиного навігаційного комплексу. Проведено аналіз попередніх робіт за темою дослідження та обґрунтовано мету і завдання даного дисертаційного дослідження.

У другому розділі виконано структурно-функціональний та алгоритмічно-програмний синтез системи візуалізації руху автономного безпілотного підводного

апарата як невід’ємної складової інтегрованого навігаційного комплексу. Запропоновано узагальнену функціональну схему комплексу, що відображає взаємодію навігаційної, керуючої, вимірювальних та інформаційних підсистем, а також системи візуалізації як окремого функціонального модуля. Визначено склад і призначення основних функціональних блоків, уточнено інформаційні потоки між бортовою та наземною частинами комплексу. Обґрунтовано вибір інерціальної навігаційної системи тактичного класу INS-B фірми Inertial Labs, як базового модуля визначення орієнтації, швидкості та координат місцеположення апарата. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення системи візуалізації з використанням середовища розробки Node-RED. Реалізовано механізми приймання, обробки та передачі навігаційно-телеметричних даних у реальному часі. Створено операторський інтерфейс, який забезпечує відображення траєкторії руху автономного безпілотного підводного апарата на мапі, числових значень координат, складових швидкості, висоти, та кутів орієнтації (курсу, крену і тангажу) з використанням анімованої векторної графіки. Показано, що система візуалізації є невід’ємним елементом інтегрованого навігаційного комплексу, який забезпечує узгоджене відображення навігаційної інформації з різних джерел і дозволяє оператору контролювати коректність навігаційного розв’язку та виконання місії автономного безпілотного підводного апарата.

У третьому розділі розроблено математичну модель руху автономного безпілотного підводного апарата за складною траєкторією, зокрема коловою, у горизонтальній площині, що використано для моделювання та аналізу точності визначення інерціальною навігаційною системою місцеположення та навігаційних параметрів апарата. Сформовано еталонні часові реалізації навігаційних параметрів (координат, швидкості, прискорень та орієнтації) для оцінювання точності навігаційних алгоритмів. На основі еталонних параметрів руху сформовано еталонні сигнали гіроскопів і акселерометрів інерційного вимірювального модуля. Виконано імітаційне моделювання автономної роботи інерціальної навігаційної системи з урахуванням випадкових завад, характерних для мікроелектромеханічних сенсорів, та проведено аналітичне оцінювання накопичуваних похибок визначення координат, швидкостей

і кутів орієнтації. Показано, що за відсутності зовнішньої корекції похибки інерціальної навігаційної системи мають тенденцію до зростання у часі та призводять до суттєвого спотворення навігаційної інформації й відображуваної траєкторії руху. Окрему увагу приділено аналізу похибок передачі та візуалізації параметрів руху, зумовлених часовими затримками у каналах зв'язку. Установлено, що вплив затримок зростає зі збільшенням швидкості руху апарата та тривалості автономної навігації, що обґрунтовує необхідність їх урахування в загальній структурі навігаційного алгоритму і системи візуалізації.

У четвертому розділі розроблено алгоритми зовнішньої корекції інерціальної навігаційної системи АБПА шляхом глибокого комплексування з акустичною навігаційною системою довгої базової лінії. Сформовано модель похибок інерціальної навігаційної системи та модель вимірювань дальностей до локальних донних маяків, що дозволяє формалізувати процес корекції навігаційних параметрів у складі інтегрованого навігаційного комплексу. Реалізовано непрямий дискретний фільтр Калмана з 15-компонентним вектором стану для оцінювання похибок навігації та дрейфів сенсорів без розриву контуру інтегрування первинних даних. Запропоновано структурно-функціональні схеми реалізації навігаційного алгоритму із замкненим контуром корекції. Ефективність алгоритмів перевірено імітаційним та фізичним (на базі модуля INS-B) моделюванням з мережею віртуальних маяків. Результати підтвердили стійкість навігаційного рішення, зменшення накопичення похибок та стабільність розв'язку при зміні умов роботи чи деградації геометрії системи довгої базової лінії. На основі результатів імітаційного та фізичного моделювання виконано аналіз спостережуваності параметрів вектора стану та досліджено вплив конфігурації мережі донних маяків на точність і стійкість навігаційного розв'язку. Показано, що використання вимірювань дальностей до донних маяків забезпечує ефективну корекцію похибок положення і складових швидкості, а також сприяє обмеженню дрейфу кутів орієнтації інерціальної навігаційної системи. Підтверджено коректність відображення траєкторії руху та навігаційних параметрів АБПА в розробленій системі візуалізації, що забезпечує можливість контролю навігаційного стану апарата та виконання поставленої місії.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод побудови системи візуалізації руху автономного безпілотного підводного апарата, який полягає в застосуванні технології Інтернету речей та комплексного підходу до вирішення завдань орієнтації, навігації, прийому-передачі та відображення даних, що забезпечує визначення, передачу та узгоджене відображення параметрів орієнтації, швидкості та координат місцеположення апарату на пристроях базової станції.

2. Вдосконалено метод визначення параметрів орієнтації, швидкості та координат місцеположення автономного безпілотного підводного апарата інерціальною навігаційною системою шляхом її комплексування з системою довгої базової лінії та використання фільтра Калмана, що забезпечило зменшення накопичення похибок визначення параметрів орієнтації, швидкості та координат місцеположення апарату при наявності інструментальних похибок та випадкових завад інерційних сенсорів.

3. Розроблено метод визначення похибок візуалізації навігаційних параметрів при коловому русі АБПА, що дозволило вперше обґрунтувати залежність точності відображення даних від швидкості руху та затримок у каналах передавання інформації.

4. Набув подальшого розвитку метод моделювання процесу визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів інтегрованим навігаційним комплексом шляхом використання фізичної моделі інерціальної навігаційної системи та формування «віртуальних» дальностей системи довгої базової лінії за координатами ГНСС і відомим місцеположенням маяків, які подавались у фільтр Калмана, в результаті застосування якого підтверджено зменшення накопичення похибок навігаційних параметрів та стабільність навігаційного розв'язку при зміні умов функціонування і деградації геометрії системи довгої базової лінії.

Отримані результати мають практичне значення, зокрема, алгоритми та програмне забезпечення для формування еталонних сигналів інерційних сенсорів, алгоритми інтеграції інерціальної навігаційної системи з системою довгої базової лінії, програмне забезпечення для програмної реалізації операторського інтерфейсу

системи візуалізації на базі технології Node-RED з модульним поділом функцій обміну, обробки та відображення навігаційної інформації.

Усі результати, що виносяться на захист, є новими. Вони неодноразово обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях. За матеріалами дисертації опубліковано 5 статей та 5 тез доповідей конференцій, які повною мірою відображають її зміст.

Ключові слова: автономний безпілотний підводний апарат, автоматичне керування, інтегрований навігаційний комплекс, автономна навігація, система візуалізації руху, Інтернет речей, інформаційна система, інерціальна навігаційна система, інерційний вимірювальний модуль, гіроскоп, акселерометр, гідроакустична станція, моделювання, місцеположення, похибки.

Список публікацій, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Похибки передачі та візуалізації параметрів руху автономного безпілотного підводного апарату» *Механіка гіроскопічних систем*, № 50, С. 23-33, 2025. DOI: 10.20535/0203-3771502025347444 (ISSN 0203-3771 (Print), ISSN 2519-2272 (Online), фахове видання).

Здобувачем проведено моделювання колового руху апарату та отримано залежності похибок передачі та візуалізації даних про кут курсу, горизонтальну швидкість та місце положення апарату на площині руху для різних швидкостей руху та значень часової затримки.

Науковим керівником Бурау Н.І. виконано постановку завдання дослідження, перевірку коректності та достовірності отриманих результатів.

2. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Імітаційне моделювання колового руху автономного безпілотного підводного апарату з урахуванням випадкових завад у сигналах сенсорів» *Електронне моделювання*, т. 47, № 6, С. 69–83, 2025.

DOI: 10.15407/emodel.47.06.069 (ISSN 0204-3572 (Print), ISSN 2616-9525 (Online), фахове видання).

Здобувачем виконано імітаційне моделювання руху АБПА за коловою траєкторією, математичне та комп'ютерне моделювання роботи ІНС з еталонними сигналами сенсорів та з урахуванням випадкових завад у сигналах сенсорів, проведено аналіз впливу шумів на похибки інерціальної навігаційної системи.

Науковим керівником Бурау Н.І. виконано постановку завдання дослідження, перевірку коректності та достовірності отриманих результатів.

3. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Моделювання колового руху автономного безпілотної підводного апарату та сигналів датчиків інерціальної навігаційної системи» *Електронне моделювання*, т. 47, № 1, С. 116–132, 2025.

DOI: 10.15407/emodel.47.01.116 (ISSN 0204-3572 (Print), ISSN 2616-9525 (Online), фахове видання).

Здобувачем розроблено математичну модель руху автономного безпілотної підводного апарату за коловою траєкторією, сформовано еталонні навігаційні параметри та сигнали датчиків інерціальної навігаційної системи, виконано комп'ютерне моделювання і аналіз результатів.

Науковим керівником Бурау Н.І. виконано постановку завдання дослідження, перевірку коректності та достовірності отриманих результатів.

4. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Застосування технологій Node-RED для візуалізації руху об'єктів» *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, № 1, С. 93–100, 2024. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-12 (ISSN 2219-9365, фахове видання).

Здобувачем розроблено архітектуру та програмну реалізацію веборієнтованої системи візуалізації руху на базі Node-RED із забезпеченням приймання, обробки та відображення навігаційних даних у реальному часі.

Науковим керівником Бурау Н.І. виконано постановку завдання дослідження, перевірку коректності та достовірності отриманих результатів.

5. Н. І. Бурау та Є. О. Золотарьов, «Системи візуалізації руху безпілотної підводних апаратів» *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 34 (73), № 3, С. 83–89, 2023. DOI:

10.32782/2663-5941/2023.3.1/14 (ISSN 2663-5941 (Print), ISSN 2663-595X (Online), фахове видання).

Здобувачем виконано аналіз існуючих підходів до візуалізації руху безпілотних підводних апаратів, сформульовано вимоги до системи візуалізації для АБПА та запропоновано узагальнені підходи до побудови системи візуалізації у складі інтегрованого навігаційного комплексу.

Науковим керівником Бурау Н.І. виконано постановку завдання дослідження, перевірку коректності та достовірності отриманих результатів.

Список публікацій, які засвідчують апробацію результатів

1. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Затримки передачі даних у гідроакустичних системах зв'язку автономних безпілотних підводних апаратах». *5th International Scientific and Practical Conference «Research in Science, Technology and Economics»*, Люксембург, 2025, С. 710-713.

2. Н. І. Бурау та Є. О. Золотарьов, «Інтегрований навігаційний комплекс автономного безпілотного підводного апарату». *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси*, Київ, 2025, С. 20-22

3. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Використання цифрових технологій при розробці систем відображення руху безпілотних об'єктів». *Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси»*, Київ, 2024, С. 33-35.

4. Є. О. Золотарьов, «Технології інтернету речей для візуалізації руху об'єктів». *XIX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»*, Київ, 2023, С. 27.

5. Є. О. Золотарьов, «Методи передачі та відображення інформації про рух безпілотного підводного апарату». *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»*, Київ, 2023, С. 12–14.

ABSTRACT

Zolotarov Ye. O. Visualization System for the Motion of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the field 151 – Automation and Computer-Integrated Technologies (Field of Study 15 – Automation and Instrumentation Engineering). National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and applied problem of substantiating and developing methodological as well as software and algorithmic support for a motion visualization system as part of an integrated navigation complex of a mini/micro-class autonomous unmanned underwater vehicle (AUV). The relevance of the research topic is determined by the increasing practical use of small-scale autonomous underwater vehicles in hydrographic surveying, underwater infrastructure inspection, environmental monitoring, and scientific research, as well as by the necessity to ensure reliable and informative visualization of their navigation state under conditions where global navigation satellite systems are unavailable. The impossibility of using satellite navigation in underwater environments necessitates the application of autonomous navigation means, primarily inertial navigation systems and hydroacoustic positioning methods. For mini/micro-class autonomous unmanned underwater vehicles, this problem is further complicated by strict mass, dimensional, and energy constraints of onboard equipment, which limit the sensor suite to inertial measurement modules characterized by increased levels of random disturbances. In addition, compact hydroacoustic receivers and transmitters for mini-AUVs operate at higher frequencies, resulting in increased acoustic attenuation, reduced operational range, and limited accuracy of navigation measurements.

The specified operating conditions of autonomous unmanned underwater vehicles impose increased requirements on navigation systems and on the means of presenting

navigation information, thereby necessitating a comprehensive approach to the development of a motion visualization system as a component of an integrated navigation complex.

The specified operating conditions of autonomous unmanned underwater vehicles impose increased requirements on navigation systems and on the means of presenting navigation information, thereby necessitating a comprehensive approach to the development of a motion visualization system as a component of an integrated navigation complex.

The main body of the dissertation consists of four chapters devoted to the study of methods and means for determining, transmitting, and visualizing the navigation parameters of motion of an autonomous unmanned underwater vehicle within the framework of a visualization system as part of an integrated navigation complex.

The first chapter presents an analysis of the current state and development trends of autonomous unmanned underwater vehicles and their motion support systems. The classification of underwater vehicles, their main fields of application, and the specific features of their operation in underwater environments are considered. Modern navigation methods and systems are analyzed, including inertial, hydroacoustic, and integrated navigation systems, as well as approaches to their integration. It is established that most existing visualization systems are primarily oriented toward large-scale autonomous underwater vehicles or remotely operated underwater complexes and do not take into account the specific characteristics of mini- and micro-class vehicles. For this class of vehicles, the determining factors are the limited accuracy of MEMS-based inertial measurement modules, significant time delays in hydroacoustic communication channels, and the absence of a comprehensive approach to combining navigation algorithms and visualization systems within a unified navigation complex. An analysis of previous research on the topic is conducted, and the aim and objectives of the present dissertation are substantiated.

The second chapter presents the structural-functional and software-algorithmic synthesis of the motion visualization system for an autonomous unmanned underwater vehicle as an integral component of the integrated navigation complex. A generalized

functional scheme of the complex is proposed, reflecting the interaction between the navigation, control, measurement, and information subsystems, as well as the visualization system as a separate functional module. The composition and purpose of the main functional blocks are defined, and the information flows between the onboard and ground-based parts of the complex are specified. The selection of the tactical-grade INS-B inertial navigation system manufactured by Inertial Labs is substantiated as the base module for determining the vehicle's orientation, velocity, and position coordinates. Software and algorithmic support for the visualization system is developed using the Node-RED visual data flow programming environment. Mechanisms for real-time reception, processing, and transmission of navigation and telemetry data are implemented. An interactive operator interface is created to provide visualization of the vehicle trajectory on a digital map, numerical values of position coordinates, velocity components and altitude, as well as orientation angles (heading, roll, and pitch) using animated vector graphics. It is demonstrated that the visualization system constitutes an integral element of the integrated navigation complex, ensuring consistent representation of navigation information from multiple sources and enabling the operator to monitor the correctness of the navigation solution and mission execution of the autonomous unmanned underwater vehicle.

The third chapter develops a mathematical model of the motion of an autonomous unmanned underwater vehicle along a complex trajectory, in particular a circular trajectory in the horizontal plane. The model is used for simulation and accuracy analysis of position and navigation parameter determination by the inertial navigation system. Analytical relationships are derived, and reference time histories of position coordinates, velocity projections, linear accelerations, and orientation parameters are generated. These reference values are used as baseline data for evaluating the accuracy of navigation algorithms. Based on the reference motion parameters, reference signals for the gyroscopes and accelerometers of the inertial measurement unit are formed. Simulation modeling of the autonomous operation of the inertial navigation system is performed, taking into account random disturbances characteristic of microelectromechanical sensors. An analytical assessment of the accumulated errors in position, velocity, and

orientation determination is carried out. It is shown that in the absence of external correction, inertial navigation errors tend to increase over time, leading to significant distortion of navigation information and the displayed trajectory. Particular attention is devoted to the analysis of errors in data transmission and visualization of motion parameters caused by time delays in communication channels. It is established that the impact of delays increases with higher vehicle speed and longer duration of autonomous navigation, which substantiates the necessity of accounting for such delays in the overall structure of the navigation algorithm and the visualization system.

The fourth chapter develops algorithms for external correction of the AUV inertial navigation system through deep integration with a long baseline (LBL) acoustic navigation system. An error model of the inertial navigation system and a measurement model of ranges to local bottom beacons are formulated, enabling formalization of the correction process for navigation parameters within the integrated navigation complex. An indirect discrete Kalman filter with a 15-component state vector is implemented to estimate errors in orientation, velocity, position, and sensor biases without direct intervention in the integration process of primary measurements. Structural-functional schemes for implementing the navigation algorithm with a closed-loop correction structure are proposed. To verify the performance and efficiency of the proposed algorithms, simulation modeling of the integrated navigation system is conducted using a virtual network of bottom beacons, as well as physical modeling based on a real INS-B inertial measurement module. The obtained results confirm the stability of the navigation algorithm, reduction of accumulated navigation errors, and robustness of the navigation solution under varying operating conditions and degradation of the long baseline system geometry. Based on the results of simulation and experimental modeling, the observability of the state vector parameters is analyzed, and the influence of the bottom beacon network configuration on the accuracy and stability of the navigation solution is investigated. It is demonstrated that range measurements to bottom beacons provide effective correction of position and velocity errors and contribute to limiting the drift of inertial navigation system orientation angles. The correctness of trajectory and navigation

parameter visualization of the AUV in the developed visualization system is confirmed, ensuring reliable monitoring of the vehicle's navigation state and mission execution.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. For the first time, a method for constructing a motion visualization system for an autonomous unmanned underwater vehicle (AUUV) has been proposed and substantiated. The method is based on the application of Internet of Things (IoT) technology and a comprehensive approach to solving orientation, navigation, data transmission, and display tasks, ensuring the determination, transmission, and synchronized display of the vehicle's motion parameters (orientation, velocity, and coordinates) on base station devices.

2. The method for determining the motion parameters of an AUUV using an inertial navigation system has been improved through its integration with a long baseline (LBL) system and the application of a Kalman filter. This resulted in a reduction in the accumulation of errors in determining orientation, velocity, and coordinates in the presence of instrumental biases and random noise of inertial sensors.

3. A method for determining visualization errors of navigation parameters during the circular motion of an AUUV has been developed, which allowed for the first time to substantiate the dependence of data display accuracy on speed of movement and delays in information transmission channels.

4. The method for modeling the process of determining the navigation parameters of moving objects by an integrated navigation system has been further developed. This was achieved by using a physical model of the inertial navigation system and generating "virtual" ranges of the long baseline system based on GNSS coordinates and known beacon locations processed by a Kalman filter. Its application confirmed the reduction of navigation parameter error accumulation and the stability of the navigation solution under changing operating conditions and degradation of the long baseline system geometry. All results submitted for defense are original. They have been repeatedly presented and discussed at national and international scientific and technical conferences. Based on the materials of the dissertation, five journal articles and five conference papers have been published, which fully reflect its content.

Keywords: autonomous unmanned underwater vehicle, automatic control, integrated navigation system, autonomous navigation, motion visualization system, Internet of Things, information system, inertial navigation system, inertial measurement unit, gyroscope, accelerometer, hydroacoustic station, modeling, positioning, errors..

List of Publications Presenting the Main Scientific Results

1. Zolotarov Ye. O., Bouraou N. I. Errors in Data Transmission and Visualization of Motion Parameters of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle. *Mechanics of Gyroscopic Systems*, No. 50, pp. 23–33, 2025. DOI: 10.20535/0203-3771502025347444 (ISSN 0203-3771 (Print), ISSN 2519-2272 (Online), peer-reviewed journal).

The applicant conducted an analytical study of the influence of inertial navigation system errors and data transmission time delays on visualization errors of AUV motion parameters and substantiated the necessity of accounting for visualization errors in the design of corresponding systems.

The scientific supervisor, N. I. Bouraou, formulated the research problem and verified the correctness and reliability of the obtained results.

2. Zolotarov Ye. O., Bouraou N. I. Simulation Modeling of Circular Motion of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Considering Random Disturbances in Sensor Signals. *Electronic Modeling*, Vol. 47, No. 6, pp. 69–83, 2025. DOI: 10.15407/emodel.47.06.069 (ISSN 0204-3572 (Print), ISSN 2616-9525 (Online), peer-reviewed journal).

The applicant performed simulation modeling of AUV motion considering random disturbances in sensor signals and analyzed the influence of sensor noise on inertial navigation system errors.

The scientific supervisor, N. I. Bouraou, formulated the research problem and verified the correctness and reliability of the obtained results.

3. Zolotarov Ye. O., Bouraou N. I. Modeling of Circular Motion of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle and Inertial Navigation Sensor Signals. *Electronic*

Modeling, Vol. 47, No. 1, pp. 116–132, 2025. DOI: 10.15407/emodel.47.01.116 (ISSN 0204-3572 (Print), ISSN 2616-9525 (Online), peer-reviewed journal).

The applicant developed a mathematical model of circular AUV motion, generated reference navigation parameters and inertial navigation sensor signals, and performed computer simulation and analysis of the results.

The scientific supervisor, N. I. Bouraou, formulated the research problem and verified the correctness and reliability of the obtained results.

4. Zolotarov Ye. O., Bouraou N. I. Application of Node-RED Technologies for Motion Visualization of Objects. Measuring and Computing Devices in Technological Processes, No. 1, pp. 93–100, 2024. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-12 (ISSN 2219-9365, peer-reviewed journal).

The applicant developed architectural and software solutions for implementing a web-based visualization interface using Node-RED, implemented real-time data reception, processing, and visualization, and analyzed the interface performance.

The scientific supervisor, N. I. Bouraou, formulated the research problem and verified the correctness and reliability of the obtained results.

5. Bouraou N. I., Zolotarov Ye. O. Visualization Systems for Motion of Unmanned Underwater Vehicles. Scientific Notes of Tavria National University named after V. I. Vernadsky. Series: Technical Sciences, Vol. 34 (73), No. 3, pp. 83–89, 2023. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.1/14 (ISSN 2663-5941 (Print), ISSN 2663-595X (Online), peer-reviewed journal).

The applicant analyzed existing approaches to motion visualization of unmanned underwater vehicles, formulated requirements for AUV visualization systems, and proposed generalized approaches to constructing a visualization system as part of an integrated navigation complex.

The scientific supervisor, N. I. Bouraou, formulated the research problem and verified the correctness and reliability of the obtained results.

List of Publications Confirming the Approbation of the Results

1. Zolotarov Ye. O., Bouraou N. I. *Data Transmission Delays in Hydroacoustic Communication Systems of Autonomous Unmanned Underwater Vehicles*. 5th International Scientific and Practical Conference “Research in Science, Technology and Economics,” Luxembourg, 2025, p. 710-13.
2. Bouraou N. I., Zolotarov Ye. O. *Integrated Navigation Complex of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle*. Integrated Intelligent Robotic Systems, Kyiv, 2025, p. 20–22.
3. Zolotarov Ye. O., Bouraou N. I. *Application of Digital Technologies in the Development of Motion Visualization Systems for Unmanned Objects*. Seventeenth International Scientific and Practical Conference “Integrated Intelligent Robotic Systems,” Kyiv, 2024, p. 33–35.
4. Zolotarov Ye. O. *Internet of Things Technologies for Motion Visualization of Objects*. XIX All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists “Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrument Engineering,” Kyiv, 2023, p. 27.
5. Zolotarov Ye. O. *Methods of Transmission and Visualization of Motion Information of an Unmanned Underwater Vehicle*. XVI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists “Looking into the Future of Instrument Engineering,” Kyiv, 2023, pp. 12–14.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ	18
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	22
ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ РІШЕНЬ	30
1.1. Загальна класифікація безпілотних підводних апаратів	30
1.1.1. Сфери застосування безпілотних підводних апаратів.....	31
1.1.2. Автономні безпілотні підводні апарати	32
1.2. Системи забезпечення руху.....	34
1.2.1. Системи навігації	34
1.2.2. Інерціальна навігаційна система	35
1.2.3. Комплексування навігаційного обладнання	37
1.2.4. Акустична навігація.....	38
1.2.5. Інші методи та засоби навігації	40
1.2.6. Системи керування автономними безпілотними підводними апаратами.....	43
1.3. Системи зв'язку та комунікації.....	46
1.4. Системи візуалізації руху безпілотних підводних апаратів.....	48
1.5. Ключові проблеми та виклики.....	53
1.6. Аналіз і критична оцінка опублікованих робіт	55
1.7. Мета і завдання наукового дослідження	58
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ СИСТЕМИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ЯК СКЛАДОВОЇ ІНТЕГРОВАНОГО НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ	60

2.1. Узагальнена функціональна схема інтегрованого навігаційного комплексу автономного безпілотного підводного апарату	60
2.1.1. Об'єкт керування	61
2.1.2. Модуль задання місії та режимів руху	63
2.1.3. Центральний бортовий комп'ютер	63
2.1.4. Модуль визначення орієнтації та параметрів руху.	64
2.1.5. Модуль передачі даних	65
2.1.6. Система візуалізації	65
2.1.7. Підсистема дистанційного керування	66
2.2. Інерціальна навігаційна система як основа модуля визначення орієнтації та параметрів руху	67
2.3. Побудова системи візуалізації	69
2.3.1. Архітектура системи системи візуалізації.....	71
2.3.2. Програмна реалізація в середовищі Node-RED	74
2.3.3. Проєктування графічного інтерфейсу та SVG-індикаторів.....	78
Висновки до Розділу 2	81
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ І ПЕРЕДАЧІ ПАРАМЕТРІВ РУХУ АВТОНОМНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ	83
3.1. Моделювання руху апарату	83
3.2. Формування еталонних значень параметрів руху АБПА.....	86
3.3. Моделювання еталонних сигналів інерційних сенсорів	88
3.3.1. Моделювання сигналів гіроскопів.....	88
3.3.2. Моделювання сигналів акселерометрів	91
3.4. Урахування впливу випадкових завад у сигналах інерційних сенсорів	92

3.4.1. Моделювання випадкових завад у сигналах інерційних сенсорів	93
3.4.2. Аналітичне оцінювання накопичуваних похибок автономної ІНС	95
3.5. Імітаційне моделювання роботи ІНС при коловому русі АБПА	97
3.5.1. Аналітичні рівняння та алгоритм інерціальної навігації	97
3.5.2. Аналіз результатів моделювання роботи ІНС	99
3.6. Аналіз похибок передачі та візуалізації параметрів руху АБПА	104
3.6.1. Модель часової затримки передавання даних	104
3.6.2. Аналітичні залежності похибок передачі та візуалізації	105
3.6.3. Аналітичні залежності похибок передачі та візуалізації	105
Висновки до Розділу 3	108
РОЗДІЛ 4 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ШЛЯХОМ ГЛИБОКОГО КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	111
4.1. Модель похибок інерціальної навігаційної системи	111
4.2. Модель вимірювань системи довгої базової лінії	114
4.3. Дискретний фільтр Калмана	116
4.4. Моделювання інерціальної навігаційної системи з інтеграцією системи дальньої базової лінії	123
4.5. Фізичне моделювання інерціальної навігаційної системи з інтеграцією системи дальньої базової лінії	131
Висновки до Розділу 4	139
ВИСНОВКИ	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	146
Додаток А Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	160
Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації	161

Додаток В Програмно-алгоритмічне забезпечення системи візуалізації у середовищі Node-RED.....	163
---	-----

Додаток Г Моделі простору станів та результати моделювання інтегрованої ІНС	180
---	-----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АБПА	—	автономний безпілотний підводний апарат;
БПА	—	безпілотний підводний апарат;
ГН	—	геофізична навігація;
ГНСС	—	глобальна навігаційна супутникова система;
ГСК	—	географічна системи координат;
ДБЛ	—	довга базова лінія;
ДКПА	—	дистанційно керовані підводні апарати;
ІВМ	—	інерціальний вимірювальний модуль;
ІНС	—	інерціальна навігаційна система;
КБЛ	—	коротка базова лінія;
МЕМС	—	мікроелектромеханічні систем;
ОЛК	—	одночасна локалізація та картографування;
ПЗ	—	програмного забезпечення;
СКВ	—	середньоквадратичне відхилення;
УКБЛ	—	ультракоротка базова лінія;
ФК	—	фільтр Калмана;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Розвиток автономних безпілотних підводних апаратів (АБПА) зумовлений зростаючими потребами у виконанні гідрографічних робіт, інспекції підводних інженерних споруд, екологічного моніторингу, наукових досліджень та пошуково-рятувальних операцій. Особливого поширення набули автономні підводні апарати класу міні/мікро, які характеризуються компактними розмірами, зниженою вартістю, маневреністю та можливістю застосування у складних і довготривалих місіях. Водночас ефективність виконання ними поставлених завдань значною мірою залежить від якості системи забезпечення руху (енергозабезпечення, стабілізації, навігації та керування), зокрема і точності визначення місцеположення та параметрів руху, а також від можливості оперативного моніторингу функціонального, у тому числі навігаційного, стану апарата. Останнє повинно забезпечуватись системою комунікації (збору, передачі в режимі реального часу, зберігання та відображення інформації про місцезнаходження та параметри руху) з судном-носієм чи базовою станцією.

Особливістю підводного середовища є неможливість використання глобальних навігаційних супутникових систем, що зумовлює застосування автономних навігаційних засобів, насамперед інерціальних навігаційних систем та гідроакустичних методів визначення місцеположення. Для автономних безпілотних підводних апаратів класу міні/мікро зазначена проблема ускладнюється обмеженими масо-габаритними та енергетичними характеристиками бортового обладнання, що призводить до використання інерційних вимірювальних модулів з підвищеним рівнем випадкових завад. Малі розміри гідроакустичного обладнання для міні-АБПА зумовлюють високі робочі частоти, що підвищує загасання та знижує дальність і точність вимірювань.

У таких умовах особливого значення набуває інтеграція інерційних і гідроакустичних навігаційних засобів, а також забезпечення достовірного, наочного та узгодженого відображення навігаційної інформації. Завданням інтегрованого навігаційного комплексу є не лише визначення поточних координат місцезнаходження

АБПА та навігаційних параметрів для забезпечення заданих режимів руху та місії в цілому, а й визначення та відображення на борту судна-носія інформації про поточне місцезнаходження АБПА для забезпечення можливості моніторингу функціонального стану апарату та його систем, а також, за необхідності, реалізації дистанційного керування апаратом. В інтегрованому комплексі система візуалізації руху АБПА перестає бути лише засобом інформування оператора, а й повинна виконувати контрольну функцію, забезпечуючи оцінювання коректності навігаційного розв'язку, аналіз динаміки руху та моніторинг функціонального технічного стану апарату. Такий підхід обумовлює необхідність розгляду системи візуалізації як невід'ємної складової інтегрованого навігаційного комплексу АБПА та потребує розроблення відповідного методичного і програмно-алгоритмічного забезпечення.

Тому обґрунтування та розробка методичного, алгоритмічного та програмного забезпечення для автономної орієнтації та навігації АБПА в різних режимах його руху, передачі-прийому та відображення даних про місцезнаходження і параметри руху АБПА на пристроях базової станції є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладені в дисертації, проводились на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 1056 від 28.12.2016 (зі змінами, в редакції постанови №220 від 01.03.2024 р.) «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня», ДР № 0122U200716 «Науково-практичні засади створення інтелектуальних рухомих об'єктів багатоцільового призначення», в якому автор був виконавцем.

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційного дослідження є підвищення точності визначення та забезпечення передачі і відображення в реальному часі параметрів руху (орієнтації, швидкості та координат) автономного безпілотного підводного апарату класу

міні/мікро інтегрованим навігаційним комплексом з розробленою системою візуалізації.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішуються такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку АБПА та систем забезпечення їх руху, обґрунтувати необхідність розробки системи візуалізації.
2. Обґрунтувати та розробити узагальнену функціональну схему інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, сформулювати вимоги до складу навігаційно-телеметричних даних і до архітектури системи візуалізації.
3. Розробити методичне та програмне забезпечення приймання-передачі даних між АБПА та базовою станцією в реальному часі, розробити програмно-алгоритмічні засоби візуалізації траєкторій та параметрів руху АБПА на операторському інтерфейсі.
4. Створити математичні моделі руху АБПА за складною траєкторією, виконати імітаційне моделювання сигналів сенсорів інерційно-вимірювального модуля та навігаційної системи для оцінювання точності визначення навігаційних параметрів та місцеположення апарату.
5. Виконати оцінку впливу затримок і втрат у гідроакустичному каналі на похибки візуалізації навігаційних параметрів АБПА.
6. Розробити алгоритми зовнішньої корекції інерціальної навігаційної системи шляхом комплексування з акустичною навігаційною системою довгої базової лінії, виконати імітаційне та фізичне моделювання інтегрованої навігаційної системи та оцінити працездатність системи візуалізації на реальних даних із формуванням контрольних («базових») вимірювань.
7. Сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження системи.

Об'єктом дослідження: процеси орієнтації, навігації та руху автономного безпілотного підводного апарата за складною траєкторією.

Предметом дослідження: методи та засоби визначення, передачі та відображення навігаційних параметрів руху автономного безпілотного підводного апарата в системі візуалізації у складі інтегрованого навігаційного комплексу.

Методи дослідження

Розроблення та дослідження системи візуалізації руху автономного безпілотного підводного апарата виконано з використанням методів теорії автоматичного керування, методів математичного моделювання процесів та систем, статистичних методів аналізу та теорії ймовірностей для опису шумів навігаційних датчиків, методів інерціальної навігації, методів фільтрації та оцінювання навігаційних параметрів, методів комплексування даних інерційних і гідроакустичних навігаційних засобів, методів імітаційного та фізичного моделювання. Комп'ютерне моделювання траєкторії руху, сигналів сенсорів та обробку результатів виконано в MATLAB. Реалізацію системи візуалізації виконано з використанням технології для візуального програмування потоків даних Node-RED. Для фізичного моделювання інтегрованої системи використано інерційний вимірювальний модуль фірми «Inertial Labs».

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод побудови системи візуалізації руху автономного безпілотного підводного апарата, який полягає в застосуванні технології Інтернету речей та комплексного підходу до вирішення завдань орієнтації, навігації, прийому-передачі та відображення даних, що забезпечує визначення, передачу та узгоджене відображення параметрів орієнтації, швидкості та координат місцеположення апарату на пристроях базової станції.

2. Вдосконалено метод визначення параметрів орієнтації, швидкості та координат місцеположення автономного безпілотного підводного апарата інерціальною навігаційною системою шляхом її комплексування з системою довгої базової лінії та використання фільтра Калмана, що забезпечило зменшення накопичення похибок визначення параметрів орієнтації, швидкості та координат місцеположення апарату при наявності інструментальних похибок та випадкових завад інерційних сенсорів.

3. Розроблено метод визначення похибок візуалізації навігаційних параметрів при коловому русі АБПА, що дозволило вперше обґрунтувати залежність точності

відображення даних від швидкості руху та затримок у каналах передавання інформації.

4. Набув подальшого розвитку метод моделювання процесу визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів інтегрованим навігаційним комплексом шляхом використання фізичної моделі інерціальної навігаційної системи та формування «віртуальних» дальностей системи довгої базової лінії за координатами ГНСС і відомим місцеположенням маяків, які подавались у фільтр Калмана, в результаті застосування якого підтверджено зменшення накопичення похибок навігаційних параметрів та стабільність навігаційного розв'язку при зміні умов функціонування і деградації геометрії системи довгої базової лінії.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленого методичного, алгоритмічного та програмного забезпечення системи візуалізації руху автономного безпілотного підводного апарата у складі берегових (операторських) станцій та випробувальних стендів АБПА. Практичне значення мають алгоритми та програмне забезпечення для формування еталонних сигналів інерційних сенсорів, алгоритми інтеграції інерціальної навігаційної системи з системою довгої базової лінії, програмне забезпечення для програмної реалізації операторського інтерфейсу системи візуалізації на базі технології Node-RED з модульним поділом функцій обміну, обробки та відображення навігаційної інформації. Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані при розробленні та модернізації інтегрованих навігаційних комплексів, при створенні інтелектуальних рухомих об'єктів у різних фізичних середовищах, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з автоматизації та робототехніки.

Результати дисертаційного дослідження використані у науково-дослідній та дослідно-конструкторській діяльності ТОВ «ІНЕРШІАЛ ЛЕБЗ ЮЕЙ», що підтверджується Актом впровадження (Додаток А).

Особистий внесок здобувача

Автором самостійно отримано основні положення, які винесені на захист, зокрема: обґрунтовано підхід до побудови системи візуалізації руху автономного безпілотного підводного апарата як складової інтегрованого навігаційного комплексу; розроблено математичну модель руху апарата за коловою траєкторією, проведено імітаційне моделювання роботи інерціальної навігаційної системи на основі еталонних сигналів сенсорів та з урахуванням випадкових завад, встановлено залежності похибок визначення місцеположення, кутів орієнтації та навігаційних параметрів руху; запропоновано, обґрунтовано та програмно реалізовано систему візуалізації у вигляді операторського інтерфейсу на базі технології Node-RED; досліджено вплив похибок навігації та затримок передавання інформації на точність відображення руху; запропоновано, обґрунтовано на основі математичного та імітаційного моделювання та підтверджено результатами фізичного моделювання зменшення накопичення похибок навігаційних параметрів та стабільність навігаційного розв'язку при глибокому комплексуванні інерціальної навігаційної системи та системи довгої базової лінії.

В опублікованих працях із співавтором (науковим керівником, якому належать постановка завдання дослідження, визначення напрямів роботи та перевірка коректності і достовірності отриманих результатів) особисто здобувачеві належать: в роботі [1] – моделювання колового руху апарату, отримання залежності похибок передачі та візуалізації даних про кут курсу, горизонтальну швидкість та місце положення апарату на площині руху для різних швидкостей руху та значень часової затримки; в роботі [2] – імітаційне моделювання руху АБПА за коловою траєкторією, математичне та комп'ютерне моделювання роботи ІНС з еталонними сигналами сенсорів та з урахуванням випадкових завад у сигналах сенсорів, аналіз впливу шумів на похибки інерціальної навігаційної системи; в роботі [3] – математична модель колового руху автономного безпілотного підводного апарата, формування еталонних навігаційних параметрів і сигналів інерціальних сенсорів та проведення комп'ютерного моделювання; в роботі [4] – розроблення архітектури та програмної реалізації веборієнтованої системи візуалізації руху на базі Node-RED

із прийманням, обробкою та відображенням навігаційних даних у реальному часі; в роботі [5] – аналіз сучасних підходів до візуалізації руху безпілотних підводних апаратів, формування вимог до системи візуалізації та узагальнення підходів до її побудови у складі інтегрованого навігаційного комплексу.

Апробація матеріалів дисертаційного дослідження.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на всеукраїнських і міжнародних науково-практичних конференціях, зокрема: на XVI Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» (Київ, 2023); XIX Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» (Київ, 2023); XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (Київ, 2024); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (Київ, 2025); 5th International Scientific and Practical Conference «Research in Science, Technology and Economics» (Luxembourg, 2025).

Публікації

За результатами дисертаційних досліджень автором опубліковано 5 наукових статей у фахових наукових виданнях категорії «Б», 5 тез та матеріалів доповідей у працях всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

Загальний обсяг дисертації становить 184 сторінок, у тому числі 120 сторінок основного тексту; робота містить 37 рисунків і 7 таблиць; список використаних джерел налічує 125 найменувань; додатки А, Б, В, Г. наведено на 160-184 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ РІШЕНЬ

1.1 Загальна класифікація безпілотних підводних апаратів

Активний розвиток безпілотних підводних апаратів, що становлять відносно новий клас систем морського застосування, розпочався у 1980-х роках та особливо прискорився протягом останніх десятиліть.

Безпілотний підводний апарат (БПА) — це роботизовані підводні апарати, що здатні рухатися в різних напрямках підводного середовища та виконувати різноманітні місії без участі людини всередині такого апарату. Загальна класифікація БПА виділяє основні класи [1]: дистанційно керовані підводні апарати (ДКПА) — це апарати, зв'язані з носієм за допомогою кабель-тросу; автономні безпілотні підводні апарати (АБПА) — це апарати, не зв'язані з носієм за допомогою кабель-тросу, при цьому обмін даними здійснюється через водне середовище.

За масо-габаритними характеристиками БПА розділяють на [1]: мікро (вагою до 5 кг); міні (діапазон ваги 5 – 100 кг); середні (діапазон ваги 100 – 500 кг); великі (вагою від 1000 кг).

За способом руху БПА розділяють на [2]:

- дрейфуючі, які переміщуються разом із течіями; використовуються для океанографічного моніторингу, картографії, довготривалих спостережень; мають мінімальні енергозатрати, але обмежене керування траєкторією;
- самохідні (гвинтово-рушійні, реактивно-струминні, біоміметичні);
- ґрунтові, що рухаються по дну (колісні/гусеничні візки) для інспекції трубопроводів і конструкцій; у практичних застосуваннях часто поєднуються з комп'ютерним зором/лазер-камерними рішеннями для контролю зварних швів та дефектів;
- буксирувальні, що зв'язані з судном-носієм та рухаються слідом за цим судном.

Для АБПА є окрема класифікація, пов'язана з їхньою формою корпусу, що надає їм специфічні функціональні та експлуатаційні характеристики [3]: біоміметичні; підводний глайдер; торпеда. Форма корпусу торпеда найпоширеніша серед АБПА, а варіація масо-габаритних параметрів дозволяє їх застосовувати з різноманітними типами сенсорів [3]. Основною перевагою біоміметичних апаратів є висока швидкість. Форми їх корпусу розроблені для зменшення опору та утримання курсу. Для досягнення високої маневреності в суворих умовах вони часто мають кілька незалежних керованих плавників. Використовуються для пошуку мін, проведення розвідки, огляду корпусів та інших складних застосувань. У підводних глайдерів пара підводних крил перетворюють вертикальний рух на горизонтальний, основною їх перевагою є тривала автономність. В оглядових статтях глайдери виділяють як апарат далекого радіуса дії для тривалих океанографічних місій та спостережень [4]. Крім того, рух на основі плавучості має ще одну перевагу, планери можуть рухатися непомітно з дуже низьким рівнем власного шуму.

Разом із розвитком класу АБПА важливо зазначити, що ДКПА, робота яких заснована на використанні кабель-тросу, й далі широко застосовуються. Саме конструктивні та функціональні відмінності між автономними АБПА та дротовими ДКПА визначають специфіку їхнього застосування. Наявність кабель-тросу в ДКПА надає оператору можливість у реальному часі спостерігати за поточним станом виконання запрограмованої місії або самостійно забезпечувати керування. Кабель-трос може забезпечувати живлення датчиків, та приводів. Проте, його наявність викликає також проблеми: гідродинамічний шум; залежність апарату від дрейфу судна; істотне обмеження маневреності, дальності та глибини роботи; небезпека обриву кабель-тросу. Це стало передумовою активного розвитку нового класу апаратів АБПА та їхнього застосування в різних сферах.

1.1.1 Сфери застосування безпілотних підводних апаратів

Розвиток БПА досяг такого рівня, що дозволяє їм успішно конкурувати з водолазами та пілотованими підводними апаратами. Завдяки підвищенню ефективності, зниженню вартості, тренду мініатюризації масо габаритних характеристик та мінімізації ризиків для людей, ці системи використовуються у багатьох сферах:

- Інспекція та моніторинг різних типів об'єктів [5, 6];
- Пошукові та рятувальні місії [7];
- Картографія [8, 9];
- Екологічний моніторинг [10, 11];
- Військове застосування (охорона портів і акваторій, протичовнова боротьба, захист критичної підводної інфраструктури) [12].

1.1.2 Автономні безпілотні підводні апарати

У більшості наведених сценаріїв провідну роль відіграють саме АБПА завдяки меншій залежності від судна-носія, вищій безпеці для операторів, більшому радіусу дії та гнучкості місій. Тому АБПА зараз застосовуються частіше і розглядаються як найбільш перспективний клас об'єктів підводної робототехніки. Розглянемо основні переваги АБПА:

- Автономність роботи [13]. АБПА не потребує фізичного з'єднання з поверхнею (троса чи кабелю), що дозволяє їм працювати на значно більшій відстані від базового судна, а також у середовищах, де використання кабелю неможливе або небезпечне, наприклад, під льодовими покривами чи у вузьких підводних каналах. Це зменшує вплив оператора на процес місії та підвищує рівень автоматизації місій.

- Енергетична ефективність [8]. Відсутність троса знижує гідродинамічний опір, що дозволяє зменшити споживання енергії під час руху. Завдяки цьому АБПА здатні виконувати довготривалі місії (до кількох діб або тижнів) із великою дальністю (десятки–сотні кілометрів) без участі оператора.

- Менші експлуатаційні витрати. Для керування ДКПА необхідно мати судно забезпечення з екіпажем, командним пунктом, кабельною системою, краном і спеціальним персоналом. АБПА, натомість, можуть запускатися з менших суден або навіть з берега, що значно знижує витрати на експлуатацію [14].

- Більш високий рівень безпеки. Відсутність кабелю зменшує ризики заплутування або розриву кабелю, що часто є проблемою при експлуатації ДКПА у районах із сильною течією чи ускладненим рельєфом дна [15].

– Можливість роботи в умовах обмеженого зв'язку. Оскільки АБПА не покладається на кабельний зв'язок, апарат може діяти в зонах, де неможливо забезпечити стабільний зв'язок, наприклад, під кригою [16], у глибоких ущелинах чи серед морських об'єктів. Комунікація здійснюється періодично через акустичний або супутниковий канал після спливу на поверхню.

– Можливість автономного прийняття рішень. Сучасні АБПА оснащуються системами штучного інтелекту для автономного планування траєкторій, уникнення перешкод і адаптації до умов середовища [14, 15]. Це відкриває можливість створення кооперативних груп АБПА для одночасного обстеження великих ділянок океану.

– Відсутність гідродинамічного опору тросу [17], відсутність впливу дрейфу судна на апарат, що забезпечує маневреність, особливо в обмежених просторах підводного середовища [18].

На сьогоднішній день розробки та вдосконалення багатоцільових АБПА в складних умовах підводного середовища відносяться до числа найбільш пріоритетних напрямків морської робототехніки. Тенденції розвитку АБПА охоплюють такі напрямки [19]:

– матеріали (нові матеріали на основі композитів, вуглецевого волокна повинні забезпечувати АБПА бути легкими, міцними, витримувати великі навантаження);

– нові двигуни для забезпечення маневреності та дальності плавання;

– енергоживлення (альтернативні джерела енергії, ефективні акумулятори з більшою потужністю та меншими розмірами);

– мініатюризація та здешевлення (дешеві, маленькі, мобільні та прості в експлуатації, група таких апаратів може замінити один великий, дорогий та складний в експлуатації апарат без втрати ефективності виконання місії);

– інтелектуалізація (адаптивні системи керування на основі штучного інтелекту та нейронних мереж, системи групового керування);

– розширення військової сфери використання апаратів (розвідка, виявлення/встановлення мін; виявлення/встановлення засобів зв'язку).

Тренд мініатюризації підвищує динамічні показники АБПА, що зумовлює появу нового класу – гідробатичних АБПА, особливістю яких є можливість виконувати складні маневри в обмеженому просторі [20]. Висока маневреність пояснюється розміщенням рушіїв на корпусі з керуванням вектору тяги. У [21] розглянуто високоманеврений малогабаритний гідробатичний апарат, у конструкції якого передбачено шість виконавчих механізмів. До них належать: система векторизації тяги для рульового керування, гребні гвинти, що забезпечують рух у протилежному напрямку, модуль керування плавучістю для регулювання глибини та механізм зміщення центру мас за двома осями — поздовжньою та поперечною.

Загалом можна виділити такі основні напрямки досліджень та розробок, що є актуальними на сьогоднішній день для АБПА: вдосконалення конструкції безпілотних підводних апаратів (зменшення габаритів і маси, застосування нових матеріалів) [22]; розроблення та вдосконалення систем забезпечення руху, включно з високоточною навігацією [23] та адаптивним керуванням [24]; створення комплексних систем збору, передавання й візуалізації інформації [25] в режимі реального часу для подальшого аналізу та організації дистанційного керування.

1.2 Системи забезпечення руху

1.2.1 Системи навігації

В системах забезпечення руху АБПА важливе місце займають системи навігації, які є апаратно-програмними комплексами, призначеними для визначення місцеположення об'єкта та його параметрів руху (швидкості, напрямку, тощо). Методи навігації і локалізації детально класифіковані в публікації [23]. Загалом можна виділити три основні категорії методів:

– Інерційні методи. Інерційна навігація використовує акселерометри та гіроскопи для підвищення точності відтворення поточного стану, проте всі методи цієї категорії мають неконтрольоване зростання похибки визначення позиції;

– Акустична навігація. Методи цієї категорії базуються на вимірюванні часу проходження сигналів від акустичних маяків або модемів для виконання завдань навігації;

– Геофізичні методи. Ці методи використовують зовнішню інформацію про навколишнє середовище та оточення, як орієнтир для навігації, що повинно виконуватись за допомогою сенсорів та обробки даних, здатних виявляти, ідентифікувати та класифікувати певні особливості навколишнього середовища.

Не зважаючи на значні досягнення у розвитку конструкції та систем керування АБПА, саме навігація залишається одним із ключових викликів, особливо для малогабаритних і високоманеврених апаратів. Через тенденцію до мініатюризації зменшуються і розміри сенсорів, зокрема, інерційних, що призводить до зниження їх точності [26]. Це робить інерційні вимірювальні модулі (ІВМ) центральним елементом забезпечення стабільної орієнтації та керування АБПА. Тому розглянемо детальніше принципи роботи та характерні особливості таких сенсорів, а також загальну характеристику інерціальної навігаційної системи, складовими якої є ІВМ.

1.2.2 Інерціальна навігаційна система

Інерційний сенсор – це пристрій, що дозволяє визначити зміну положення тіла у просторі шляхом вимірювання змін його прискорення або кутової швидкості. До інерційних сенсорів відносять акселерометри та гіроскопи. Акселерометри вимірюють прискорення, а гіроскопи кутову швидкість. Більшість типів акселерометрів вимірюють прискорення вздовж однієї осі чутливості, так само і більшість типів гіроскопів вимірюють кутову швидкість навколо однієї осі. Інерційний вимірювальний модуль поєднує в собі декілька акселерометрів і гіроскопів, зазвичай по три кожного типу, для отримання тривимірних вимірювань прискорень та кутової швидкості [27].

Інерційні сенсори мають похибки, які поділяються на систематичні та випадкові. Систематичні похибки можна математично змодельовати й зменшити шляхом калібрування, до них належать такі, як: зсув нуля, масштабний коефіцієнт, його не-

лінійність та взаємний вплив чутливих осей. Зсув нуля в інерційному сенсорі вважається як постійне відхилення вимірюваного значення від реального вхідного сигналу. Коефіцієнт масштабу описує невідповідність між вхідною величиною та вихідним сигналом сенсора. У нормі очікується, що сенсор видає вихід, пропорційний вхідному значенню (співвідношення «вхід–вихід» дорівнює 1), однак наявність похибки коефіцієнта масштабу призводить до відхилення цього співвідношення від одиниці. Ще однією формою систематичної похибки є нелінійність коефіцієнта масштабу. Зазвичай передбачається, що зв'язок між вхідним і вихідним сигналами сенсора лінійний. Проте через вплив зовнішніх факторів або особливості конструкції деяких сенсорів цей зв'язок може стати нелінійним, що також належить до систематичних похибок і має бути враховано. Через некоректне встановлення сенсорів в ІВМ може виникати перехресний вплив осей, внаслідок чого акселерометри або гіроскопи частково сприймають сигнали, що належать до іншої осі, яка мала би бути ортогональною до основної чутливої осі [28].

Інерційні датчики мають випадкові похибки, які проявляються у вигляді шуму в інерційних вимірювальних сигналах, отриманих від інерційних датчиків. Випадкові похибки можуть бути пов'язані з електричними або механічними джерелами, в залежності від конструкції та виготовлення інерційних датчиків. Порядок величини та вплив таких випадкових похибок на інерційне навігаційне рішення залежать від технології, конструкції та методів виготовлення інерційних датчиків. Отже, ефективність будь-якого ІВМ з точки зору забезпечення точного навігаційного рішення визначається порядком величини систематичних та випадкових похибок, що містяться в його вимірюваннях. Тому ІВМ класифікуються за класами відповідно до їхньої точності описаних вище параметрів [29].

Інерціальна навігаційна система (ІНС) є автономною системою, яка надає інформацію про положення, швидкість і орієнтацію рухомого об'єкта на основі вимірювань ІВМ та застосування методу числення шляху. Метод числення шляху полягає у визначенні поточного положення об'єкта на основі інформації про його попереднє положення та поточних вимірювань, виконаних датчиками прискорень і ку-

тової швидкості. За наявності заданих початкових умов використовується інтегрування прискорення для визначення швидкості, подвійне інтегрування – для визначення положення, а інтегрування кутової швидкості – для визначення кутів орієнтації (тангажу, крену та курсу) [29].

Сигнали гіроскопів і акселерометрів фільтруються в модулі цифрової обробки сигналів і надходять в модуль обчислення параметрів руху, в результаті обчислення отримують інформацію про місцеположення, швидкість та орієнтацію рухомого об'єкта.

1.2.3 Комплексування навігаційного обладнання

Як показують дослідження і досвід експлуатації [30], основним недоліком ІНС є те, що похибки параметрів руху накопичуються. Зменшення похибок ІВМ за рахунок покращення характеристик чутливих елементів пов'язано з великими витратами та збільшенням масо-габаритних характеристик. Це, в свою чергу, унеможлиблює їх розміщення на АБПА класу міні або мікро. Значний ефект підвищення точності досягається при корекції ІНС від інших навігаційних систем, що мають достатні характеристики точності. Це можуть бути доплерівські вимірювачі швидкості або лаги, супутникові навігаційні системи, астронавігаційні системи та різні оглядово-порівняльні системи. Комплексування робиться через різні модифікації фільтра Калмана [31].

Найбільш поширеною є схема комплексування ІНС з доплерівським лагом та датчиком тиску. З доплерівського лагу отримують дані швидкості відносно дна, а з датчику тиску – дані про глибину. Приклад такого комплексування показано в роботі [32], де розглянуто роботу ІНС при короткотривалій відсутності даних від доплерівського лагу, а також наведено аналіз схем глибокої і слабкої інтеграції. При можливості підняття АБПА на поверхню додатково для комплексування ІНС використовують дані глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС), що надає інформацію про швидкість та позицію. Експериментальні дослідження в роботі [33] показують, що така схема суттєво зменшує накопичену помилку траєкторії. Схеми комплексування з використанням доплерівського лагу значно зменшують накопи-

чення похибок позиції в ІНС, але повністю її не усувають. Для усунення таких похибок можуть застосовуватись гідроакустичні системи для визначення позиції. В роботі [34] показано реалізацію комплексування ІНС з акустичними маяками, що дозволяють розрахувати позицію АБПА, а в роботі [35] для комплексування ІНС додатково використовується магнітометри для корекції курсу ІНС.

1.2.4 Акустична навігація

Для акустичної навігації застосовуються чотири різні методи [27]:

- довга базова лінія (ДБЛ);
- коротка базова лінія (КБЛ);
- ультракоротка базова лінія (УКБЛ);
- самонаведення.

При позиціонуванні методом ДБЛ три або більше транспондерів (приймально-передавальних пристроїв) розміщуються у відомих місцях на дні під водою [36]. Відстань між транспондерами може бути від кількох сотень метрів до кількох кілометрів. Для визначення тривимірного положення АБПА необхідно використовувати двостороннє визначення дальності [27], яке ініціюється користувацьким обладнанням. Транспондер, розташований на борту носія (підводного апарату або судна), випромінює серію цифрових модульованих звукових імпульсів, відомих як пінг. Системи ДБЛ необхідно відкалібрувати, щоб визначити точні координати транспондерів. Вимірювання відстаней між самими транспондерами дає їх відносні положення, але для визначення абсолютних координат потрібні також вимірювання відстаней до судна, яке знаходиться в кількох відомих позиціях. У зворотному випадку система ДБЛ може використовуватися не лише для позиціонування підводних апаратів, а й для визначення положення суден на поверхні [27].

Позиціонування за методом КБЛ подібне до методу ДБЛ, за винятком того, що транспондери розташовані на нижній частині корпусу судна. Така архітектура підходить для визначення положення підводних апаратів або водолазів, які перебувають порівняно близько до судна, оскільки точність позиціонування погіршується через несприятливу геометрію сигналів, якщо відстань від ру-

хомого об'єкта до судна значно перевищує відстань між транспондерами, встановленими на судні. В такому випадку положення АБПА можна відслідковувати тільки на судні, причому при значних відхилення АБПА від заданої траєкторії необхідно корегувати його положення з борту судна [27].

Позиціонування за допомогою УКБЛ використовує єдиний спрямований транспондер, розташований на нижній частині корпусу судна. Він складається з кількох п'єзоперетворювачів із надкороткою відстанню між ними (приблизно 0,1 м). Вимірювання кутів прибуття сигналу виконуються на судні шляхом порівняння фаз акустичних сигналів, що надходять на кожен елемент антени, подібно до того, як це робиться у ГНСС-системах для визначення орієнтації. Двостороннє вимірювання відстані ініціюється судовим транспондером, а рухомий об'єкт (АБПА) відповідає на запит. Положення підводного апарата обчислюється на борту судна, що є прикладом дистанційного позиціонування. Слід зазначити, що точне визначення координат за вимірюваннями кутів прибуття потребує високої точності визначення орієнтації самого судна [27], тому багато УКБЛ комплексуються з ІНС на борту судна.

Останній метод – це самонаведення, за допомогою якого рухомий транспортний засіб оснащується спрямованим акустичним транспондером, а двосторонні вимірювання дальності та вимірювання кутів прибуття сигналу виконуються за допомогою послідовності окремих транспондерів у відомих місцях [27].

Водночас акустичні комунікації мають низку суттєвих недоліків [23]:

- мала смуга пропускання, що змушує вузли зв'язку використовувати методи часових поділів каналів для обміну даними;
- низька швидкість передачі даних, що обмежує обсяг інформації, яку можна передати;
- велика затримка сигналу, оскільки швидкість звуку у воді становить лише близько 1500 м/с (що набагато менше за швидкість світла);
- змінна швидкість звуку внаслідок коливань температури та солоності води;
- багатопроменевість сигналу, спричинена відбиттям від верхньої межі (поверхні води) та нижньої (морського дна), у поєднанні з просторовими змінами швидкості звуку;

– ненадійність зв'язку, що потребує створення системи зв'язку, здатної працювати з частими втратами даних під час передачі.

Навігаційні системи УКБЛ/КБЛ через високу затримку надають оновлення положення з інтервалом в секунди, що впливає на алгоритми навігації в ІНС.

1.2.5 Інші методи та засоби навігації

Щоб уникнути проблеми дрейфу ІНС та вартості інфраструктури для підводних акустичних систем, використовується методи та підходи геофізичної навігації (ГН). Ці підходи узгоджують вимірювання датчиків з геофізичними параметрами, супутникові знімки, батиметрію, магнітне поле та гравітаційні аномалії, що містяться на карті. Основними обмеженнями ГН є необхідність наявності карти до місії апарату та обчислювальна складність пошуку кореляції в межах карти та оцінок датчиків. З іншого боку, ключовою перевагою ГН над іншими технологіями є великий робочий діапазон під час використання. За наявності карти ГН забезпечує помилку локалізації з точністю, що залежить від роздільної здатності карти та чутливості геофізичного параметра до зміни стану АБПА [37].

Гравітаційна навігація.

Датчик тяжіння (гравіметр або градіометр) вимірює силу тяжіння та градієнт сили тяжіння в місці розташування АБПА. Гравіметр вимірює аномалію сили тяжіння, або відхилення величини вектора сили тяжіння відносно номінальної моделі Землі. Градіометр – це пара акселерометрів з паралельними входними осями на фіксованій базовій лінії, яка вимірює градієнти сили тяжіння, або швидкість зміни сили тяжіння відносно лінійного зміщення. На основі положення та вимірювань датчика база даних шукає найкраще поєднання сили тяжіння та градієнта сили тяжіння, а потім оптимальне положення узгодження буде використано для корекції положення ІНС. Як показують тести на основі моделювання, похибки позиціонування за широтою та довготою можуть бути зменшені до 56% та до 65% порівняно з автономним застосуванням ІНС [38].

Геомагнітна навігація

Геомагнітна навігація ґрунтується на використанні магнітних сенсорів і передбачає процедуру вирівнювання двох множин точок, у якій здійснюється зіставлення вимірних магнітних характеристик із морською геомагнітною картою. Геомагнітне поле має низку параметрів, що можуть бути використані для порівняння та локалізації, зокрема: інтенсивність повного поля, горизонтальна компонента, північна компонента, східна компонента, вертикальна компонента, магнітне відхилення, магнітний нахил, а також градієнти геомагнітного поля. Результати імітаційного моделювання [39] показують, що досягнення точності визначення координат на рівні десятків метрів (53–56 м) можливе за умови використання магнітометра з чутливістю 0,1 нТ. При зниженні чутливості до 0,5 нТ абсолютна похибка зростає до сотень метрів (526–534 м) у межах області площею 900 км².

Батиметрична навігація

Одним із найпростіших способів використання батиметричних карт для навігації АБПА є застосування ізобат (уявних кривих, що з'єднують всі точки однакової глибини відносно поверхні). Сучасні дослідження АБПА показують, що рух уздовж ізобат можна реалізувати, спираючись лише на прості бортові датчики, використовуючи однопроменеві ехолоти, що вимірюють відстань до дна і датчик тиску для контролю глибини. Таким чином можна гарантувати, що апарат не покине визначену область [40]. Точність навігації за батиметричною картою забезпечує 5–10 м [41]. В умовах складного середовища, зокрема в Арктиці, при роздільній здатності карти 500 м, похибка залишається обмеженою приблизно 1 км на 50 км ходу [42].

Методи одночасної локалізації та картографування

Методи одночасної локалізації та картографування (ОЛК), розроблені для наземної робототехніки, активно адаптуються для підводних апаратів. Підводний ОЛК реалізується на основі бортових сенсорів і зазвичай поділяється за типом вимірювальної апаратури на візуальні (камери) та акустичні (фронтальні й бокові гідролокатори, багатопроменеві ехолоти, батиметричні системи), а також їхні гібридні комбінації [33, 43–45]. Такий підхід дозволяє одночасно оцінювати траєкторію

АБПА та формувати карту навколишнього середовища в умовах складного підводного середовища.

Візуальні ОЛК-системи забезпечують високу просторову роздільну здатність та порівняно невисоку вартість датчиків, що робить їх використання прийнятним для малих та середніх АБПА. Основною проблемою є чутливість оптичного каналу до освітленості та каламутності води. В роботах [43, 44] пропонують інтеграцію алгоритмів підводного покращення зображень та глибоких нейромереж, що дозволяє істотно зменшити похибку локалізації в умовах слабого освітлення й мутної води.

Акустичні методи ОЛК ґрунтуються на даних фронтальних, бокових або багатопроменевих гідролокаторів і зберігають працездатність за умов сильно обмеженої видимості, де оптичні системи фактично непридатні. Для таких систем характерне використання ймовірнісних карт оточення, фільтра Калмана чи його розширених варіацій, а також алгоритмів суміщення сонарних зображень з картою, що дозволяє АБПА будувати карту перешкод і планувати траєкторію руху без зіткнень у невідомому середовищі. Експериментальні випробування в реальних морських умовах показують, що такі алгоритми забезпечують достатню точність навігації для прикладних інженерних задач океанотехніки [33].

Таким чином, сучасні підходи до підводного ОЛК охоплюють спектр візуальних і акустичних рішень. Акустичні системи забезпечують надійну роботу за умов низької видимості та великої глибини, тоді як візуальні методи дають високо деталізовані карти за нижчої вартості й високої частоти вимірювань.

Узагальнюючи викладене, можна відзначити, що ІНС, яка працює автономно, не забезпечує прийнятної довготривалої точності через накопичення похибок. Підвищення класу ІВМ дає обмежений ефект і супроводжується зростанням вартості та масо-габаритних характеристик, що є неприйнятним для міні- та мікро-АБПА. Тому основним напрямом розвитку є комплексування ІНС з доплерівськими лагами, датчиками тиску, ГНСС, гідроакустичними системами позиціонування типу ДБЛ/КБЛ/УКБЛ, а також з геофізичними методами навігації. Геофізична (гравіта-

ційна, геомагнітна, батиметрична) навігація та методи ОЛК використовують попередньо відомі карти поля або рельєфу і дають змогу обмежувати накопичення помилок ІНС без розгортання складної акустичної інфраструктури. Кожен з розглянутих підходів має специфічні обмеження щодо умов застосування, точності та обчислювальних витрат, проте їх раціональне поєднання в межах єдиної ІНС дає можливість суттєво підвищити точність та надійність навігації АБПА в широкому діапазоні сценаріїв.

Окремо слід відзначити, що ІНС виступає не лише навігаційним, а й базовим інформаційним модулем для системи керування АБПА. Саме дані про орієнтацію, кутові швидкості та лінійні прискорення формують зворотний зв'язок у контурах стабілізації та керування рухом, визначають якість відпрацювання траєкторій, робастність систем керування і здатність апарата виконувати місію в умовах дії збурень. Тому підвищення точності та завадостійкості ІНС безпосередньо впливає на ефективність функціонування систем керування.

1.2.6 Системи керування автономними безпілотними підводними апаратами

Системи керування АБПА формуються комплексом алгоритмів, програмних та апаратних рішень, що забезпечують можливість автономного виконання місій у тривимірному та динамічному підводному середовищі. Архітектура таких систем зазвичай включає рівень стабілізації, рівень керування рухом та рівень планування місій [46, 47]. У літературі, присвяченій підводним апаратам [48], наголошується, що ефективність місії визначається не лише маневровими характеристиками апарата, а й здатністю системи керування адаптуватися до невизначеностей зовнішнього середовища, обмежень сенсорів та змін гідродинаміки.

На рівні стабілізації застосовуються алгоритми демпфування коливань, утримання глибини, курсу та стабілізації платформи. Ранні системи здебільшого використовували пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, що став базовим стандартом у керуванні ДКПА та ранніми АБПА завдяки простоті та швидкодії [49].

Для апаратів із підвищеною маневреністю, зокрема, гідробатичних АБПА, дедалі частіше застосовують нелінійні регулятори, здатні компенсувати зміну гідродинамічних сил у складних режимах руху [20]. Сучасні підходи керування включають [20]: робастне керування; адаптивні алгоритми; інтелектуальні методи, де нелінійність моделі компенсується машинним навчанням або спрощеними нейромережами.

Забезпечення руху об'єкта за заданою траєкторією в системах АБПА охоплює низку типових режимів [50]:

- стабілізацію стану (утримання глибини, курсу та швидкості);
- слідування маршруту, заданого опорними точками;
- відстеження часово-параметризованої траєкторії, коли положення та орієнтація апарата задаються як функції часу;
- супроводження або перехоплення рухомих об'єктів.

У цих режимах траєкторне керування забезпечує рух АБПА вздовж заданого шляху або траєкторії з урахуванням даних від ІНС, доплерівського лагу, УКБЛ, а також оцінок течій і перешкод. Для батиметричних, оглядових та багатоцільових місій такі режими висувають підвищені вимоги до точності навігаційних оцінок, стійкості до зовнішніх збурень та енергетичної ефективності системи керування. Узагальнені огляди демонструють широкий спектр підходів до планування руху та відстеження траєкторій АБПА [7-9, 23].

Основні методи, що застосовуються в задачах забезпечення руху об'єкта за заданою траєкторією керування, можна згрупувати так:

- наведення за опорними точками, яке широко використовується для реалізації маршрутних режимів руху АБПА [7, 8];
- лінія прямої видимості та кутове наведення, призначені для забезпечення стійкого руху уздовж заданої траєкторії в умовах течій та інших збурень [28];
- оптимізаційні методи (лінійне та нелінійне програмування), що застосовуються при плануванні батиметричних місій та трасуванні рельєфу [9];

– методи на базі ОЛК (візуальні, акустичні), які поєднують уточнення траєкторії з картуванням навколишнього простору і особливо ефективні для руху в невідомому середовищі [43, 44].

На найвищому рівні реалізуються алгоритми планування місії, перемикання поведінкових модулів та вибору стратегії у відповідь на зміни середовища. Провідні огляди відзначають перехід від жорстко структурованих сценаріїв до поведінкових архітектур, у яких система керування місією формує автономні реакції АБПА на непередбачені події [16, 51]. Сучасні програмно-апаратні комплекси [25] демонструють концепцію інтелектуального керування місією, що включає багаторівневе прийняття рішень, прогнозування власної траєкторії, адаптивне планування та кооперацію між кількома апаратами. У військових та спеціальних застосуваннях дедалі активніше впроваджуються багатоцільові методи планування групових місій для сукупності АБПА, де поєднуються оптимізаційні підходи та апарат теорії множинної взаємодії [7].

Сучасні системи керування тісно інтегруються з навігаційними модулями. В огляді [23] підкреслюється, що інтеграція керування й навігації у єдиний модуль на сьогоднішній день є провідним трендом у морській робототехніці. Літературний аналіз показує, що розвиток систем керування АБПА рухається від класичних ПД-регуляторів до нелінійно-робастних, оптимізаційних та інтелектуальних методів.

В результаті, сучасні апарати з точними системами керування забезпечують:

- підвищену автономність;
- стійкість до невизначеностей зовнішнього середовища;
- можливість виконання складних траєкторних маневрів та відстеження заданих траєкторій;
- здатність до кооперативної роботи у групах.

Загалом, системи керування АБПА продовжують еволюціонувати в напрямі підвищеної автономності, адаптивності та енергетичної ефективності, що безпосередньо пов'язано з ускладненням задач траєкторного керування та вимог до якості навігаційного забезпечення.

1.3 Системи зв'язку та комунікації

Для зв'язку та комунікації АБПА із зовнішнім світом (судном-носієм, базовою береговою станцією, іншим підводним апаратом) використовуються гідроакустичні системи.

Гідроакустичні модеми – це пристрої для бездротової передачі цифрових даних під водою за допомогою звуку. Вони встановлюються на АБПА, буйки або судна і дозволяють обмінюватися телеметрією, командами та іншою інформацією. Прикладами таких модемів є WHOI Micro-Modem [52] від Woods Hole Oceanographic Institution, серія S2C модемів EvoLogics [53], а також лінійка модемів Teledyne Benthos [54]. Характерною особливістю гідроакустичних модемів є низька швидкість передачі даних порівняно з радіозв'язком, наприклад, WHOI Micro-Modem залежно від режиму модуляції забезпечує швидкості від лише 80 біт/с до 5000 біт/с [52]. Навіть сучасні швидкісні модеми EvoLogics, що використовують вузькосмугові та широкосмугові сигнали (технологія Sweep Spread Carrier) досягають до 13,9 кбіт/с на відстанях 3–3,5 км [55].

На відміну від радіохвиль у повітрі, звук у воді поширюється значно повільніше, близько 1500 м/с, що відповідає затримці приблизно 0,67 с на кожний кілометр шляху сигналу [56]. Це означає, що передача акустичного сигналу до об'єкта на відстані 5 км потребує приблизно 3,3 с тільки в один бік, а для передачі сигналу та отримання відповіді наближено потрібно 6–7 с. Тому передача короткого повідомлення (наприклад, команди в кілька байтів) на відстань 1–2 км займає не менше секунди тільки через низьку швидкість звуку в підводному середовищі. Крім того, сам процес модуляції/демодуляції та протоколи зв'язку додають затримки: модеми працюють у напівдуплексному режимі (тільки прийом або передача в один момент часу), часто з запитом-підтвердженням. Наприклад, у низькошвидкісному режимі акустичного зв'язку з корисною швидкістю близько 80 біт/с передавання повідомлення обсягом 32 байти [57] триває приблизно 3,2 с. Додатково враховується затримка поширення акустичних хвиль у воді, що становить близько 0,57 с на 1 км дис-

танції. Таким чином, сумарна одностороння затримка передавання становить близько 4 с, а обмін із підтвердженням отримання – близько 8 с [58]. При вищих швидкостях (кілька кбіт/с) час передачі самого пакета скорочується до часток секунди, але затримка розповсюдження акустичних хвиль у воді залишається.

Таким чином, типові затримки при зв'язку через гідроакустичні модеми вимірюються секундами. Це ставить жорсткі обмеження на обсяг та частоту переданої інформації: практично, каналом модема передаються короткі командні повідомлення, телеметрія (стан систем, координати) або невеликі файли.

Для обох класів систем підводної навігації УКБЛ і ДБЛ фізична затримка обмежується швидкістю поширення звуку у воді. Принципова різниця з'являється на рівні організації вимірювань, тобто в системній затримці. Системна затримка ДБЛ зазвичай більша, ніж в УКБЛ, хоча фізична затримка поширення звуку при фіксованій відстані є однаковою для обох систем, а відмінність зумовлена конфігурацією вимірювань [59, 60]. Для УКБЛ достатньо одного циклу «запит–відповідь» між судною антенною решіткою та транспондером на АБПА, тоді як у ДБЛ для тривимірного визначення координат потрібні 3–4 незалежні вимірювання дальності до просторово рознесених донних маяків, а це кілька послідовних циклів «запит–відповідь» із інтервалами й часом обробки, що в кілька разів збільшує період оновлення навігаційного рішення [58]. Розгортання УКБЛ швидше, потенційно має вищу частоту оновлення на тих самих дистанціях та є зручним для супроводу кількох апаратів одним судном, однак позиція зазвичай обчислюється на борту судна, корекція ІНС на АБПА потребує додаткового каналу зв'язку «судно–апарат» [27]. Точність позиціонування АБПА з використанням ДБЛ вища, положення обчислюється на самому АБПА та використовується для корекції ІНС, що є менш чутливим до маневрів надводного носія, але характеризується більшими системними затримками, високою вартістю й складністю розгортання донної мережі та меншою гнучкістю для короткочасних або разових місій [61].

1.4 Системи візуалізації руху безпілотних підводних апаратів

Система візуалізації руху безпілотного підводного апарата – це програмно-апаратний комплекс, призначений для відображення навігаційної, телеметричної та діагностичної інформації, що формується бортовими системами БПА і засобами зв'язку, в графічній та символічній формі, що забезпечують оператора актуальними даними про параметри руху та технічний стан апарата [62].

У класі безпілотних літальних апаратів візуалізація є добре розвинутою. Для АБПА системи візуалізації руху мають специфічні вимоги, зумовлені використанням гідроакустичних каналів зв'язку з обмеженою пропускнуою здатністю та значною затримкою: вони повинні працювати з неповною та асинхронною інформацією, показувати результати роботи ІНС, корекцій від датчиків, забезпечуючи при цьому для оператора цілісне й узгоджене у часі уявлення про рух апарата і хід місії. Тренд мініатюризації АБПА обумовлює низку проблем, пов'язаних з їх функціональними елементами та характеристиками, зокрема, значно обмежує використання деяких датчиків, важливих для ефективної роботи під час виконання місій.

Для візуалізації руху АБПА достатньо відобразити наступні параметри руху: орієнтацію, швидкість, положення в просторі та відеозображення. Ці параметри можуть бути показані в реальному часі на екрані планшета або монітора з морською картою, що дозволить операторам відслідковувати їх рух і контролювати їх поведінку в підводному середовищі.

Розглянемо доступні на сьогодні рішення для систем візуалізації даних. В роботі [63] представлено архітектуру ДКПА на базі відкритого програмного забезпечення «ArduPilot». Наземна чи поверхнева станція керування використовує програмне забезпечення «QGroundControl», система візуалізації даних зазвичай знаходиться у складі поверхневої станції. По протоколу «MAVLink» ДКПА передає дані на поверхневу станцію, а саме дані про напругу живлення, орієнтацію апарату (кути курсу, крену, тангажу), сигнали гіроскопів, та дані про глибину занурення. Для передачі даних в підводному середовищі використовують систему кабель-трос. В ро-

боті [64] для візуалізації руху мікро АБПА «LoCo» використовується система візуалізації, реалізована на базі ROS-інструментарію RViz, окремої спеціалізованої наземної станції типу QGroundControl для цього АБПА не використовують. Розроблений АБПА «LoCo» для океанічних досліджень, кооперується з драйвером, а керування відбувається мовою жестів.

В роботі [65] показано модульну розробку програмного забезпечення (ПЗ) для ДКПА «PIONERO500». Розроблено апаратне та програмне забезпечення для роботи апарату з дистанційним керуванням, яке використовує підхід системної інженерії. В роботі представлено графічний інтерфейс поверхневої станції керування розроблений в ПЗ LabView. Дані згруповані за функціональними підсистемами та сенсорними блоками, де відображаються дані ІВМ, магнітометра, кути орієнтації з курсовертикалі, мітки часу, тиск, температура, швидкість звуку, глибина, солоність.

Програмне забезпечення, що використовується для геодезичних рішень при проведенні ефективних і безпечних дистанційних операцій із застосуванням безпілотних апаратів, наведено в [66-68]. На сьогоднішній день це програмне забезпечення «NaviSuite Mobula» використовується в ДКПА «VideoRay Defender» та «BlueROV2». Акцент зроблений на об'єднання даних з найсучасніших сенсорів та на функціях ефективності, що дозволяють швидко інспектувати дуже великі об'єкти при моніторингових місіях ДКПА, наприклад, трубопроводів. Забезпечуються такі можливості візуалізації ПЗ «NaviSuite Mobula» для поверхневої станції керування [66]: об'єднання тривимірних даних; комбінування кількох видів з картами/зображеннями, зондуванням, лазером, камерою; можливості використання пристроїв переднього огляду, багатопроменевого зондування; позиціонування за допомогою різних типів сенсорів для забезпечення руху до заданої точки та режиму відслідковування маршруту; використання технологій та алгоритмів комп'ютерного зору для створення в реальному часі хмар точок навіть за допомогою одного камерного відеопотоку. Для ДКПА «BlueROV» в [67] обговорюється розробка графічного інтерфейсу з використанням Microsoft Visual Studio як платформи розробки інтерфейсу. Дані про орієнтацію, глибину, відеопотік, швидкості двигунів з датчиків, встановлених на борту ДКПА, обробляються мікроконтролерами Arduino та Raspberry Pi,

після чого відображаються на інтерфейсі для користувача. А в [68] представлений концепт системи візуалізації даних для апарату «BlueRov2», розробка ПЗ графічного інтерфейсу і керування ДКПА реалізована в інструментарії для візуального програмування потоком даних «Node-Red» з поєднанням різноманітних пристроїв та онлайн-сервісів, як складових частин Інтернету речей.

Програмне забезпечення для ДКПА «SRV-8» [69] забезпечує точне утримання позиції та функцію фіксації ДКПА на певному напрямку, глибині або куті нахилу. Передбачено запис усіх доступних даних, можливість відтворення місій ДКПА для детального перегляду відео після місії за допомогою функції перемотування з виділенням та детальним аналізом фрагментів. Можливість відображення повної орієнтації, кута повороту камери, введення джерела тяги та інтенсивності освітлення дозволяє оператору контролювати продуктивність та вносити корективи в команди керування. За наявності додаткових систем позиціонування ПЗ надає підтримку місії, відображаючи в реальному часі інформацію про положення ДКПА відносно місця розташування оператора.

У комплексі керування [70] ДКПА «Teledyne SeaBotix vLBV» використовується програмний пакет SmartFlight 2.0 [71], який включає інтегровану інерціальну навігаційну систему з обмеженою автономною роботою, що забезпечує стабільність і маневреність апарату. Всі дані ДКПА повністю інтегруються, мають відмітки часу і географічну прив'язку, збір даних є систематичним, об'єднаний інтерфейс користувача відображає всю інформацію про ДКПА на екрані комп'ютера, включаючи навігацію, планування місій, гідролокатор та відео.

В роботі [72] розглядається проект із програмним забезпеченням OpenROV у системі керування ДКПА «Trident». Програмне забезпечення ДКПА «Trident» ґрунтується на веб-технологіях і використовує зв'язок через дротовий кабель-тетер із передачею даних на поверхневий Wi-Fi, з якого оператор підключається смартфоном, планшетом або ноутбуком. Інтерфейс, створений на основі HTML5, WebRTC та WebGL, забезпечує перегляд відеопотоку та основної телеметрії (глибина, кут-

вий стан, стан батареї), а також управління апаратом. Крім ручного керування, реалізовані базові режими стабілізації, такі як утримання глибини чи напрямку, проте повноцінні функції автопілота не підтримуються.

Описані вище технічні та програми засоби передачі, візуалізації, відтворення та аналізу даних розроблені для ДКПА, інформація на наземні чи поверхневі (надводні) станції керування подається через кабель-трос, яким ДКПА з'єднаний з судном-носієм.

До розвинутих відкритих рішень для АБПА належить програмне забезпечення MOOS-IvP (Mission Oriented Operating Suite with Interval Programming). В роботі [73] розроблено повноцінну тренажерну систему для АБПА, де MOOS використовується як стандартне середовище автономії, а графічний інтерфейс включає 3D-візуалізацію, берегову станцію та засоби редагування сценаріїв місій, що підтверджує застосування MOOS-IvP, як відкритий стандарт для інтеграції алгоритмів навігації, керування та візуалізації як у симуляції, так і на реальних АБПА.

Інструментарій LSTS toolchain [74] застосовується для мережеских груп надводних і підводних роботів та включає в себе ПЗ DUNE, IMC та Neptus. Програмне забезпечення DUNE виконує функції взаємодії з датчиками та забезпечення керування. Обмін повідомленнями побудований на використанні уніфікованого протоколу IMC (Inter-Module Communication). Neptus є операторською системою командування і керування, яка підтримує планування місій, моніторинг виконання, відображення параметрів руху, огляд попередньо записаних даних. У роботі [75] показано, що використання LSTS toolchain забезпечує стабільну роботу комплексу в умовах довготривалих місій АБПА. Інструментарій поєднує засоби навігації та керування з розвинутими функціями візуалізації вимірювань, що дозволяє здійснювати моніторинг у реальному часі та виконувати оперативне перепланування місії через операторський інтерфейс

Архітектура COLA2 (Component Oriented Layer-based Architecture for Autonomy), застосована на АБПА типу «Girona 500», залишається актуальною й у сучасних роботах [76]. Вона реалізує багатошарову структуру (рівень керування ру-

хом, навігації, обробки сенсорів, планування та виконання місії) з чітким розділенням між бортовим ядром навігації та зовнішніми інтерфейсами візуалізації. У роботі [77] для Girona 500 описано архітектуру, де COLA2 інтегровано в ROS (Robotic Operation Systems) середовище, а оператор працює з високорівневими представленнями траєкторій та стану апарата, без прямої взаємодії з низькорівневими сигналами.

Серед промислових рішень показовим є HUGIN Operator Station (HOS) [78], що використовується для АБПА родини HUGIN від Kongsberg [79]. Графічний інтерфейс HOS забезпечує планування місії, конфігурацію корисного навантаження, моніторинг виконання місії та контроль якості даних у реальному часі. Приклад реалізації такого інтерфейсу наведено у роботі [80], де на одному екрані відображається запланований маршрут, положення судна-носія, поточна траєкторія АБПА та діаграми стану систем.

Системи командно-керуючого рівня SeeTrack (у поєднанні з модулем автономії Neptune) компанії SeeByte фактично стали промисловим стандартом для флотів АБПА та ДКПА у ВМС різних країн. Офіційні повідомлення за 2020–2022 рр. вказують, що SeeTrack Military та Multi-Domain використовуються більш ніж у п'ятнадцяти військово-морських силах світу, а інтеграція SeeTrack v4 із глибоководним HUGIN Superior забезпечує оператору цілісну ситуаційну обстановку з картами, смугами огляду, виявленими цілями та автоматизованим плануванням місії [81].

Таким чином, як відкриті (MOOS-IvP, LSTS, COLA2), так і комерційні (HUGIN Operator Station, SeeTrack) підтверджують загальну тенденцію: сучасні системи навігації й керування АБПА реалізуються як інтегровані платформи, де модулі автономії, мережевої взаємодії та візуалізації працюють у тісному зв'язку. Водночас, відкрите ПЗ зазвичай потребує суттєвої адаптації під конкретні датчики й апарати, а комерційні рішення залишаються закритими та прив'язаними до обладнання виробника, що обґрунтовує доцільність розробки спеціалізованих систем візуалізації руху АБПА, орієнтованих на інтеграцію з різними ІНС та гідроакустичними навігаційними підсистемами.

1.5 Ключові проблеми та виклики

Сучасні АБПА працюють у складному підводному середовищі, яке характеризується значною невизначеністю, мінливістю параметрів та обмеженнями сенсорного сприйняття. Аналіз опублікованих досліджень [1, 16, 22, 23, 51] дозволяє виокремити низку проблем, які визначають актуальні тенденції розвитку систем навігації, керування та взаємодії АБПА.

Підводне середовище відзначається різкими змінами параметрів: швидкостей та напрямків течій; стратифікації води; температурних градієнтів; рівня природних та антропогенних акустичних шумів; оптичних характеристик (мутність, освітленість, зважені частинки). А для місій у льодових районах, або на великих глибинах додатковим фактором є складна взаємодія з поверхнею льоду, рельєфом дна й непередбачуваність зовнішніх збурень, що ускладнює стабілізацію руху [9, 51].

Характерною особливістю АБПА є тенденція до мініатюризації, яка вже добре простежується з кінця 1990-х років. У класичних роботах [82, 83] підкреслюється, що перші АБПА створювалися як відносно великі, дорогі платформи, які запускалися з науково-дослідних суден і вимагали складної інфраструктури. Перехід від великих та дорогих океанографічних платформ до «малих» і «мікро» АБПА став можливим завдяки зменшенню габаритів обчислювальної техніки, появі малогабаритних IBM із застосуванням чутливих елементів, розроблених за допомогою технології мікроелектромеханічних систем (МЕМС), компактних датчиків тиску, доплерівських лагів, сонарів тощо. Окремі розробки портативних АБПА масою близько 50–60 кг, придатних для спуску з малих човнів двома операторами, демонструють запит на портативні засоби для огляду, інспекції та локальних місій [84]. Додатково, розвиток компактних та енергоефективних акустичних модемів (типу WHOI Micromodem/Micromodem-2), спочатку спеціально орієнтованих на малі носії, також підштовхнув появу невеликих, автономних систем зв'язку й навігації для таких апаратів [52].

Водночас мініатюризація створює для розробників проблеми, які потребують вирішення.

Енергоспоживання.

Зменшення габаритів корпусу напряму обмежує доступний енергетичний ресурс, що зумовлює жорсткий компроміс між тривалістю місії, тягою, швидкістю та кількістю бортових сенсорів. У роботі [84] показано приклад такого компромісу: за умови ємності акумулятора близько 800 Вт/год максимальну швидкість руху обмежено до 1 м/с, що дозволяє забезпечити час виконання місії до 15 годин. Обчислювальний модуль обирають з можливістю динамічного зниження споживаної потужності. Окрему роль відіграє забезпечення нейтральної плавучості, необхідної для режимів зависання та точного вертикального маневрування. Надмірна позитивна плавучість призводить до потреби постійного створення тяги вниз, що збільшує витрати енергії, тоді як значна негативна плавучість зумовлює інтенсивне занурення апарата і ускладнює стабілізацію його руху.

ІНС на дешевих датчиках.

Масове застосування ІВМ з МЕМС-датчиками дало змогу фізично зменшити ІВМ та знизити їхню вартість, але за рахунок збільшення систематичних та випадкових похибок [27]. Тому ІНС потребують постійної корекції від інших сенсорів, щоб стримувати накопичення похибок. Для малих АБПА з обмеженим місцем під доплерівський лаг чи високочастотний сонар потрібно використовувати інші засоби корекції, що підвищує вимоги до алгоритмів і процесорів [23].

Зв'язок і навігація за допомогою акустики.

Для невеликих апаратів важко розмістити повноцінні акустичні антени з прийнятним співвідношенням «дальність/смуга пропускання». Навіть для більших систем акустичні канали залишаються вузькосмуговими, з низькими швидкостями передачі, великою затримкою, мультишляхом і значною вірогідністю втрати пакетів [23]. Тому проєктувальникам міні/мікро АБПА доводиться або миритися з дуже скромними телеметричними швидкостями, або інтегрувати компактні модеми, подібні до Micromodem-2, спеціально оптимізовані під низьке енергоспоживання та малі платформи, але це знову забирає частину обмеженого об'єму і енергії [52].

Обмежений корисний об'єм і складність компонування.

В малих корпусах важко розвести один від одного джерела шуму (двигуни, перетворювачі живлення) та чутливі сенсори (ІВМ, магнітометри, гідрофони). Це посилює проблеми електромагнітних та акустичних завад, ускладнює терморежим та сервісне обслуговування. Додатково, збільшення кількості датчиків (ІВМ, доплерівський лаг, передній оглядовий сонар, камери, модем, іноді маніпулятор) потребує більш жорстких компромісів у виборі сенсорів і зони застосування такого апарата. На практиці це часто обмежує глибину, тривалість місії або якість отримуваних даних [84].

Крім того, малі АБПА ще гостріше відчувають вплив гідродинаміки та складність керування. Для компактних корпусів з малою масою навіть порівняно невеликі сили, турбулентність або хвильові збурення здатні помітно впливати на рух апарата, ускладнюючи утримання стійкості та точного курсу. Це зумовлює потребу в моделюванні, ідентифікації гідродинамічних параметрів та використанні більш складних, робастних і нелінійних законів керування, що здатні працювати в умовах невизначеностей моделі апарату та зовнішніх збурень [85].

Таким чином, мініатюризація АБПА відкриває шлях до дешевших, масових та портативних рішень, здатних працювати там, де великі апарати просто не помістяться або економічно невиправдані. Але одночасно вона концентрує на розробниках весь спектр складних задач — від енергетики та навігації на дешевих сенсорах до створення надкомпактних комплексів зв'язку і керування, здатних забезпечити прийнятну надійність і точність у реальних морських умовах.

1.6 Аналіз і критична оцінка опублікованих робіт

Проведений огляд стану наукових досліджень та практичних розробок дає змогу сформулювати цілісне уявлення про сучасний стан досліджень у галузі безпілотних підводних апаратів, зокрема АБПА, та систем забезпечення їх руху. У працях вітчизняних і зарубіжних авторів розглянуто класифікаційні ознаки та тенденції розвитку АБПА, архітектури навігаційних і керуючих систем, специфіку підводних

каналів зв'язку та обмеження сенсорного забезпечення, що особливо критично проявляються для мікро- та міні-АБПА.

Аналіз робіт, присвячених навігації та керуванню, свідчить про суттєвий прогрес для платформ середнього й великого класів, однак адаптація рішень до жорстких обмежень мікро- та міні-АБПА (об'єм, енергоспоживання, спрощена компоновка датчиків) розглядається переважно фрагментарно. У сучасних АБПА поширені комбіновані схеми, що поєднують ІНС із ГНСС, доплерівським лагом, акустичними системами позиціонування та геофізичними методами навігації, ключову роль відіграють методи багатосенсорного комплексування на основі фільтра Калмана та його модифікацій [23, 26, 34, 59, 86]. Значна частина підходів орієнтована на наявність регулярної корекції за зовнішніми орієнтирами (акустичними або геофізичними), але для тривалих автономних місій маневрених мікро- та міні-АБПА з обмеженою кількістю датчиків питання довгострокової точності оцінювання орієнтації й координат залишається недостатньо дослідженим та висвітленим.

У цьому ж напрямку помітна увага приділяється розвитку інерційних сенсорів в ІВМ та застосуванню технології МЕМС. Але зниження вартості і масо-габаритних характеристик МЕМС-ІВМ супроводжується підвищенням рівня шумів і дрейфів, що обумовлює швидке накопичення похибки автономної ІНС і зумовлює необхідність комплексування з зовнішніми вимірюваннями та адаптивними процедурами оцінювання й калібрування.

Окремий напрям становлять дослідження підводних каналів зв'язку та мереж. У роботах за цим напрямком систематизовано вплив малої смуги пропускання, великої затримки, багатопроменевості й нестабільності параметрів середовища на якість передавання даних гідроакустичними модемами [2, 55, 56]. Запропоновано протоколи доступу, методи кодування та адаптації каналів зв'язку, орієнтовані на завадостійкість і енергоефективність. Проте інтеграція характеристик каналу (затримка, втрата пакетів, обмеження швидкості, підтвердження) у структуру навігаційних алгоритмів, алгоритмів керування та відображення інформації АБПА, як правило, лишається локальними рішеннями й не доводиться до цілісних системних

підходів, особливо для малорозмірних платформ із низьким енергоспоживанням [52].

Не зважаючи на значний науковий та практичний інтерес до проблеми розвитку БПА та їх систем, має місце обмеженість досліджень для створення систем візуалізації руху саме в класі АБПА, особливо в умовах мініатюризації апаратів. В класі ДКПА переважають комерційні комплекси з розвиненими графічними інтерфейсами, що відображають відеопотік, телеметрію, навігаційну інформацію та дані гідролокаторів, лазерних вимірювачів і допоміжних сенсорів; передавання даних у таких системах зазвичай здійснюється широкосмуговими кабель-тросовими лініями зв'язку без жорстких обмежень на частоту оновлення [66]. Для великих АБПА та флотів широко застосовуються фреймворки автономії та інтерфейси командно-керуючого рівня (MOOS-IvP, Neptus/DUNE/IMC, COLA2), які забезпечують планування та моніторинг місій, тривимірну візуалізацію сцен, відображення траєкторій і стану взаємодії між агентами. Водночас, у переважній більшості розглянутих рішень функції візуалізації проєктуються як надбудова над навігаційною підсистемою і лише обмежено враховують специфіку гідроакустичного каналу зв'язку, що безпосередньо впливає на частоту оновлення траєкторій і склад телеметричних даних для оператора.

З узагальнення результатів аналізу опублікованих робіт випливає, що [87]:

- більшість систем візуалізації руху орієнтована або на ДКПА з широкосмуговим кабель-тросовим каналом, або на порівняно потужні АБПА з розвиненою сенсорною та інформаційною інфраструктурою;
- рідко одночасно враховуються три ключові чинники, характерні для мікро- та міні-АБПА: обмежена точність МЕМС-ІВМ; обмеження підводного каналу зв'язку; жорсткі обмеження на обчислювальні ресурси;
- візуалізація здебільшого трактується як окрема надбудова над навігаційною системою, а не як компонент інтегрованого пілотажно-навігаційного комплексу, що визначає структуру алгоритмів оцінювання стану, відбору й кодування даних;

– питання оптимізації складу, структури та формату навігаційної інформації, що передається з АБПА для візуалізації, практично не пов’язуються з моделями затримок і втрат у гідроакустичному каналі.

У цьому контексті можна виокремити такі невирішені науково-технічні задачі:

– забезпечення прийнятної точності орієнтації й навігації мікро- та міні-АБПА на основі MEMS-IBM в умовах обмеженої доступності зовнішніх орієнтирів і тривалої автономної роботи;

– інтеграція моделей затримок та обмежень гідроакустичного каналу зв’язку в структуру навігаційних і керуючих алгоритмів;

– розроблення систем візуалізації руху АБПА як складової інтегрованих навігаційних комплексів, які поєднують функції орієнтації, навігації, контролю стану та відображення інформації з урахуванням обмежених ресурсів бортового комп’ютера й характеристик підводного каналу;

– оптимізація складу та формату навігаційних даних, що передаються для візуалізації (вибір мінімального, але достатнього набору параметрів, стиснення й адаптація до змінної якості каналу).

Такі науково-технічні завдання є актуальними та потребують комплексного вирішення питань орієнтації, навігації, приймання-передачі та візуалізації інформації для АБПА класу міні або мікро.

1.7 Мета і завдання наукового дослідження

Метою дисертаційного дослідження є підвищення точності визначення та забезпечення передачі і відображення в реальному часі параметрів руху (орієнтації, швидкості та координат) автономного безпілотного підводного апарата класу міні/мікро інтегрованим навігаційним комплексом з розробленою системою візуалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі основні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку АБПА та систем забезпечення їх руху, обґрунтувати необхідність розробки системи візуалізації;
2. Обґрунтувати та розробити узагальнену функціональну схему інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, сформулювати вимоги до складу навігаційно-телеметричних даних і до архітектури системи візуалізації;
3. Розробити методичне та програмне забезпечення приймання-передачі даних між АБПА та базовою станцією в реальному часі, розробити програмно-алгоритмічні засоби візуалізації траєкторій та параметрів руху АБПА на операторському інтерфейсі;
4. Створити математичні моделі руху АБПА за складною траєкторією, виконати імітаційне моделювання сигналів сенсорів ІВМ та навігаційної системи для оцінювання точності визначення навігаційних параметрів та місцеположення апарату;
5. Виконати оцінку впливу затримок і втрат у гідроакустичному каналі на похибки візуалізації навігаційних параметрів АБПА;
6. Розробити алгоритми зовнішньої корекції ІНС шляхом комплексування з акустичною навігаційною системою довгої базової лінії, виконати імітаційне та фізичне моделювання інтегрованої навігаційної системи та оцінити працездатність системи візуалізації на реальних даних із формуванням контрольних («базових») вимірювань;
7. Сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження системи.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ СИСТЕМИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ЯК СКЛАДОВОЇ ІНТЕГРОВАНОГО НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

Проведений у Розділі 1 огляд стану проблеми показав необхідність розроблення систем візуалізації руху АБПА у складі інтегрованого навігаційного комплексу, завданням якого є не тільки визначення поточних координат місцезнаходження АБПА та навігаційних параметрів для забезпечення заданих режимів руху та місії в цілому, а й визначення та відображення на борту судна-носія інформації про поточне місцезнаходження АБПА та параметри його руху для забезпечення можливості моніторингу функціонального технічного стану АБПА та його систем, а також, за необхідності, реалізації дистанційного керування апаратом [87, 88].

У цьому розділі проведено структурно-функціональний та алгоритмічно-програмний синтез системи візуалізації руху АБПА, як невід’ємної складової інтегрованого навігаційного комплексу, який реалізується на основі комплексного підходу до вирішення завдань орієнтації, навігації, керування, прийому-передачі та відображення інформації на пристроях базової станції.

2.1 Узагальнена функціональна схема інтегрованого навігаційного комплексу автономного безпілотного підводного апарату

Для забезпечення типових завдань керування, орієнтації, навігації, комунікації пропонується інтеграція в єдиному комплексі технічних та програмних засобів для формування та реалізації керуючих впливів на рушії АБПА з метою забезпечення точного і автономного руху апарата під водою відповідно до заданого режиму руху, а також засобів приймання-передачі даних та операторської візуалізації

отриманої інформації. Реалізацію такого комплексного підходу розглянемо на прикладі розробленої узагальненої функціональної схеми інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, наведеної на рис. 2.1 [88, 89]:

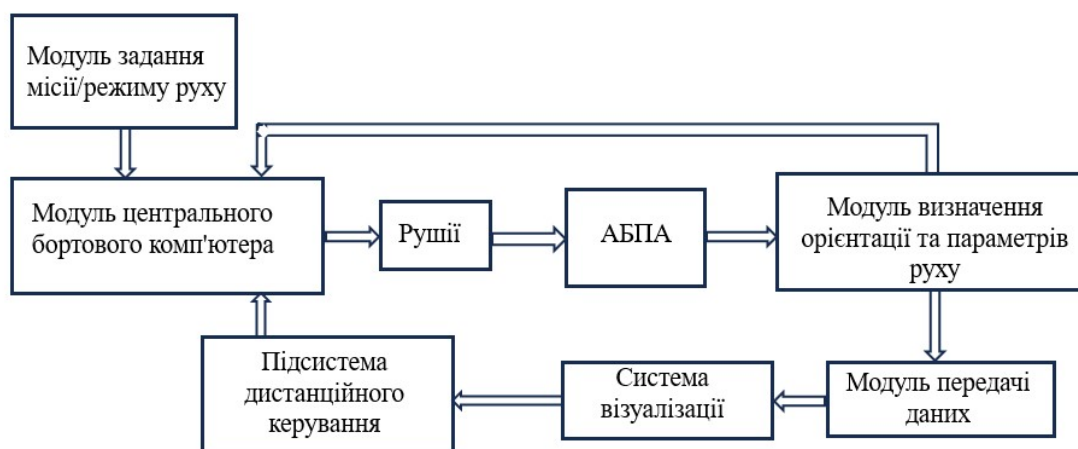


Рис. 2.1. Узагальнена функціональна схема інтегрованого навігаційного комплексу АБПА

Узагальнена схема відображає взаємодію навігаційної, керуючої та вимірювальних підсистем у складі єдиного комплексу, який забезпечує автономне виконання місій АБПА. Верхній рівень представлений підсистемою дистанційного керування та візуалізації, яка знаходиться на судні-носії чи базовій станції і забезпечує наглядний контроль. Нижній рівень – це бортовий комплекс АБПА, ядром якого є модуль центрального комп'ютера. Він замикає контур керування, отримуючи дані від модуля навігації (визначення орієнтації та параметрів руху апарату) і видаючи керуючі впливи на рушії. Розглянемо призначення та характерні особливості складових узагальненої функціональної схеми інтегрованого навігаційного комплексу АБПА.

2.1.1 Об'єкт керування

Об'єктом керування є АБПА класу мікро як нелінійна багатовимірна динамічна система з шістьма ступенями вільності, стан якої визначається положенням, швидкістю та орієнтацією, а динаміка – інерційними та гідродинамічними характеристиками апарату, а також дією зовнішніх збурень підводного середовища (течій, турбулентності, змін щільності або в'язкості, хвильових збурень). Специфікою

мікро-АБПА є малі масо-інерційних параметри та потенційно динамічні характеристики. Одночасно зі зменшенням габаритів зростає відносний вплив в'язкісного опору та демпфування, а гідродинамічні сили і моменти стають істотно залежними від значень швидкості, кутів атаки/ковзання та характеру обтікання. Це підтверджено в роботі [90], де до повної нелінійної моделі апарата застосовано та перевірено експериментально під час виконання серії гідробатичних маневрів оптимальні робастні алгоритми керування.

З практичного боку, використання математичних моделей на основі рівнянь руху підводних апаратів є поширеним підходом для дослідження та верифікації алгоритмів керування. У роботі [91] представлено відкритий симулятор ДКПА «BlueROV2», у якому математична модель включає кінематику руху, гідродинамічну взаємодію апарата з середовищем, динаміку рушіїв, а також дію сил ваги та плавучості. Така структура моделі підкреслює необхідність одночасного врахування динаміки корпусу і виконавчих органів під час оцінювання працездатності алгоритмів керування в імітаційних експериментах.

Ключовим аспектом адекватності моделі є параметризація гідродинамічних коефіцієнтів, оскільки вони безпосередньо визначають маневреність і стійкість руху та впливають на коректність синтезу законів керування. Причому, гідродинамічні коефіцієнти прямо розглядаються як основа для оцінювання маневреності та проектування керування, а також пропонуються підходи їх ідентифікації на основі поєднання обмежених рухів та методів машинного навчання [92]. В задачах підводної робототехніки також актуальні методи ідентифікації інерційних параметрів та характеристик опору апаратів на основі чисельних експериментів та оптимізації [93].

Таким чином, об'єкт керування в роботі доцільно розглядати як систему з 6-ма ступенями вільності з суттєвою нелінійністю та невизначеністю параметрів, для якої модель повинна відтворювати не лише кінематику, а й гідродинаміку та динаміку рушійно-рульового комплексу, що є необхідним для подальшого коректного моделювання руху і кількісного обґрунтування ефективності запропонованого комплексу.

2.1.2 Модуль задання місії та режимів руху

Модуль задання місії забезпечує формування цілей руху АБПА у вигляді набору режимів та сценаріїв місії: маршрут (послідовність точок або сегментів), обмеження за глибиною/швидкістю, умови переходів між етапами та критерії завершення. З модулю задання місії завантажуються поставлені завдання в центральний бортовий комп'ютер.

Необхідність виділення рівня планування місії та його узгодження з навігаційними і керуючими підсистемами відображає сучасні тенденції розвитку систем забезпечення руху, розглянуті в огляді стану проблеми на прикладах сучасних відкритих і промислових програмно-апаратних комплексів.

2.1.3 Центральний бортовий комп'ютер

Центральний бортовий комп'ютер є обчислювальним ядром інтегрованого комплексу, яке забезпечує виконання місії та узгоджену роботу підсистем навігації, керування, обміну даними і діагностики. Його призначення полягає в реалізації повного циклу вимірювання, оцінювання стану АБПА, формування керування та контроль виконання, а також у формуванні та обробці телеметрії для системи візуалізації й підсистеми дистанційного втручання оператора.

З огляду на складність сучасних автономних підводних систем, у літературі широко застосовується підхід модульної програмної архітектури з виділенням сервісів навігації, керування, планування, комунікації та інтерфейсів сенсорів/виконавчих органів. Прикладом такого підходу є MOOS-IvP, де центральну роль відіграє MOOSDB як комунікаційне ядро, а функціональні модулі реалізуються як набір застосунків із визначеними інформаційними зв'язками [94]. Водночас MOOS-IvP [95] підтримується як відкрита реалізація набору модулів автономії для робототехнічних платформ (зокрема морських), що підтверджує практичну придатність такої організації програмного комплексу для задач АБПА.

Іншим поширеним підходом є використання спеціалізованих бортових середовищ виконання для безпілотних систем. Наприклад, DUNE (LSTS toolchain) позиціонується як середовище для бортового ПЗ (включаючи задачі керування, навігації, комунікації та доступу до сенсорів), написаний на мові програмування C++ і

орієнтований на можливість легкого перенесення між різними архітектурами процесорів та операційними системами [96]. Практична експлуатація таких інструментів демонструє, що у складних експедиційних умовах таке середовище може працювати на борту різних платформ і забезпечувати автономне виконання завдань при мінімальному навантаженні на операторів [97].

З позиції вимог до центрального бортового комп'ютера для мікро-АБПА (зокрема при виконанні гідробатичних маневрів), доцільно виділити такі ключові функції:

- інтеграція сенсорних даних (ІНС, датчики глибини, доплерівський лаг, компас) та формування часово узгодженого потоку вимірювань;
- формування інформації для контурів керування;
- розподіл керування по рушіях/приводах, обмеження, безпечні режими;
- виконання місії та супровід (перемикання режимів, контроль досягнення обмежень, реакції на відмови);
- логування та телеметрія з підтримкою пріоритетів і деградації (мінімальний набір даних при погіршенні зв'язку).

Таким чином, центральний бортовий комп'ютер забезпечує виконання місії та інтеграцію навігаційних і керувальних підсистем, при цьому передбачена модульність програмного забезпечення дає змогу розробникам адаптувати та доповнювати функціонал без зміни загальної архітектури комплексу.

2.1.4 Модуль визначення орієнтації та параметрів руху.

Модуль визначення орієнтації та параметрів руху забезпечує отримання даних про орієнтацію, швидкість та навігацію апарата від сенсорів, наприклад, гіроскопів та акселерометрів, для розрахунку координат місцеположення та параметрів руху АБПА в реальному часі. У якості модуля використаємо ІНС, загальну характеристику якої та інерційних сенсорів наведено в п. 1.2.2, а більш детально функціональну схему ІНС розглянемо в п. 2.2.

2.1.5 Модуль передачі даних

Модуль передачі даних забезпечує інформаційний зв'язок між АБПА та поверхневою (надводною) станцією стеження/керування. Для підводного середовища типовими є гідроакустичні канали, які обмежують пропускну здатність, мають значні затримки та можуть супроводжуватися втратами пакетів повідомлень [98, 99].

Для застосування на АБПА розглядаються модеми WHOI Micro-Modem [52] від Woods Hole Oceanographic Institution, серія S2C модемів EvoLogics [53], а також лінійка модемів Teledyne Benthos [54], характеристики яких наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики гідроакустичних модемів

Назва модему:	Швидкість передачі даних	відстань
WHOI Micro-Modem	80 – 5000 біт/с	
EvoLogics	до 13900 біт/с	3 – 3,5 км
Teledyne Benthos	2560 – 15360 біт/с	4 км

За наведеною в табл. 2.1 інформацією перевагу надаємо акустичному модему Teledyne Benthos зі змінною швидкістю передачі даних від 2,5 кбіт/с до 15 кбіт/с. Тоді, наприклад, передача пакету даних “OPVT2HR” фірми Inertial Labs [100] розміром 137 байтів (1096 біт) при швидкості 1000 біт/с буде тривати 1,1 секунд, а при розміщенні ІНС на відстані 500 м додатково буде затримка приблизно 0,33 секунд.

2.1.6 Система візуалізації

Система візуалізації призначена для забезпечення відображення на базовій станції чи судні-носії інформації про орієнтацію, швидкість, навігаційні параметри АБПА, а також відеозображення в режимі реального часу. Реалізується як програмний чи програмно-апаратний комплекс, призначений для відображення даних, що формуються модулем визначення орієнтації та параметрів руху АБПА і засобами зв'язку, в графічній та символічній формі для забезпечення оператора актуальними даними про параметри руху та технічний стан апарата.

Відповідно до [87] система візуалізації АБПА повинна відповідати таким функціональним вимогам:

- відображення даних у реальному часі в інтерфейсі користувача, який налаштовується таким чином, щоб оператори могли швидко реагувати на будь-які сигнали від АБПА;
- програмне забезпечення повинно підтримувати різні типи сенсорів для збору даних (інерційні сенсори, багатохвильовий ехолот, лідар, підводні лазери, камери, гідролокатори бічного/секторного огляду, акустичні профілометри та інші);
- забезпечення стиснення даних для систем з низькою пропускнуою здатністю і стабільності з'єднання;
- забезпечення точності відображення позиції АБПА та зменшення впливу часового запізнення у процесі передачі та відображення даних.

Обґрунтування та розроблення методичного і програмно-алгоритмічного забезпечення системи візуалізації руху у складі інтегрованого навігаційного комплексу АБПА класу міні/мікро з урахуванням наведених функціональних вимог є метою даного дисертаційного дослідження.

2.1.7 Підсистема дистанційного керування

Підсистема дистанційного керування та втручання оператора призначена для коригування місії і параметрів руху, а також для контрольованого втручання у разі відхилень від запланованого сценарію, відмов окремих підсистем або зміни умов підводного середовища. З огляду на специфіку підводного середовища (наприклад, швидке згасання радіочастотних сигналів у воді) дистанційне керування доцільно реалізовувати у форматі «керування під наглядом», коли оператор переважно спостерігає та задає корекційні команди виконання місії, а низькорівневі контури стабілізації та керування рухом вносять зміни в стан АБПА [101, 102].

Функціонально підсистема дистанційного керування має забезпечувати: приймання телеметрії та повідомлень про стан із кодуванням пріоритетів; внесення корекцій у місію (оновлення ділянок траєкторії, зміна цільових глибин, швидкості, часових обмежень); передавання команд безпеки (пауза/очікування, повернення,

аварійне завершення місії); двобічне підтвердження приймання команд і протоколювання подій для подальшого аналізу [103].

Практична реалізація таких функцій зазвичай реалізується в системі візуалізації руху, яка відображає карту, план місії та її поточний стан, а також надає засоби контрольованого переривання виконання. У роботі [103] з Mission Management Tool описано підтримку моніторингу, наглядного керування, приймання повідомлень про помилки та сценарії припинення поточної дії з очікуванням подальших команд або повне переривання з аварійним спливанням. Також передбачається використання поверхневого апарата як ретранслятора між підводними апаратами та пунктом керування, при цьому обмін із АБПА виконується через гідроакустичні модеми. Під час підготовки місій операторські інструменти інтегруються з планувальниками та спеціалізованим ПЗ. У роботі [104] наведено етапи планування та рекомендації для операторів, орієнтовані на безпеку й ефективність виконання підводних місій.

2.2 Інерціальна навігаційна система як основа модуля визначення орієнтації та параметрів руху

Як було зазначено в п. 2.1.4, модуль визначення орієнтації та параметрів руху призначений для оцінювання вектора стану АБПА (положення, швидкості, кутів орієнтації та похідних навігаційних параметрів), який будується на основі ІНС у комплексі з іншими системами. Інерціальна навігаційна система є автономною системою, яка надає інформацію про положення, швидкість і орієнтацію рухомого об'єкта на основі вимірювань інерційними датчиками та застосування методу числення шляху. Метод числення шляху, як зазначалось в п. 1.2.2, полягає у визначенні поточного положення об'єкта на основі інформації про його попереднє положення та поточних вимірювань, виконаних датчиками прискорень і кутової швидкості (за наявності заданих початкових умов використовується інтегрування прискорення для визначення швидкості, подвійне інтегрування – для визначення положення, а інтегрування кутової швидкості – для визначення кутів тангажу, крену та курсу)

[29, 105]. В якості датчиків для вимірювань прискорень та кутової швидкості використовуються акселерометри та гіроскопи. Спрощену структурно-функціональну схему ІНС наведено на рис. 2.2, за якою ІНС можна представити у вигляді трьох модулів.

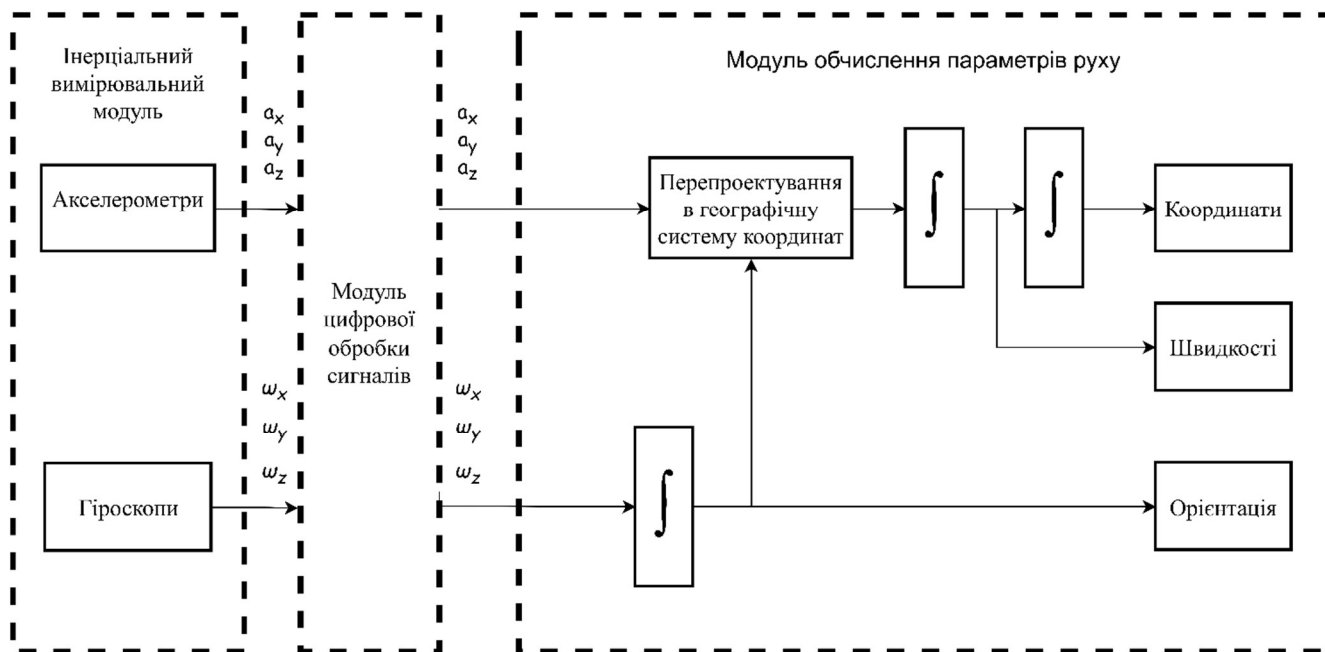


Рис. 2.2. Структурно-функціональна схема ІНС

Відповідно до рис. 2.2, первинні вимірювання формують інерціальний вимірювальний модуль. До складу ІВМ входять три взаємно ортогональні акселерометри, вихідними сигналами яких є прискорення a_x, a_y, a_z відносно осей XYZ пов'язаної з АБПА системи координат, та три взаємно ортогональні гіроскопи, вихідними сигналами яких є кутові швидкості $\omega_x, \omega_y, \omega_z$. Сигнали гіроскопів і акселерометрів проходять попередню цифрову фільтрацію та компенсацію похибок в модулі цифрової обробки сигналів, після чого надходять в модуль обчислення параметрів руху. Далі у модулі виконується інтегрування сигналів ІВМ з визначенням орієнтації, швидкостей і координат. В результаті обчислення отримуємо інформацію про положення, швидкість та орієнтацію рухомого об'єкта. Така схема відображає принципову послідовність: вимірювання $\rightarrow$ оброблення $\rightarrow$ обчислення навігаційного розв'язку $\rightarrow$ видача даних.

Для застосування на АБПА обираємо ІНС тактичного класу – INS-B фірми «Inertial Labs», що забезпечує визначення місцеположення, швидкості та кутів орієнтації рухомих об'єктів з типовими характеристиками для цього класу ІНС [106]. Вибір обумовлений такими факторами. По-перше, для АБПА (особливо мікро-класу) визначальними є масо-габаритні та енергетичні обмеження, тому перевага надається компактному модулю з низьким енергоспоживанням, який може бути інтегрований у бортову архітектуру без збільшення габаритів відсіків і теплового навантаження. По-друге, застосування МЕМС-технологій у навігаційних модулях забезпечує прийнятний компроміс “точність–маса–енергоспоживання–вартість”. По-третє, INS-B орієнтована на інтеграцію: поєднує ІВМ з ГНСС-приймачем (для на-дводного режиму), барометричним каналом, магнітометрами, доплерівським лагом, та можливістю корекції від базових станцій (підводних або наземних).

2.3 Побудова системи візуалізації

Для побудови системи візуалізації було проведено аналіз сучасних підходів до створення систем візуалізації для підводної робототехніки. Традиційні методи на базі мов C++ (з використанням бібліотек Qt) або Python (PyQt/Tkinter) забезпечують високу швидкість роботи, проте мають високий поріг входження та складність при необхідності віддаленого доступу до даних.

Як альтернатива пропонується використовувати технології Інтернету речей, зокрема середовище Node-RED для розробки системи візуалізації, що базується на подійно-орієнтованій архітектурі Node.js. Середовище Node-RED – це веб-орієнтована платформа потокового програмування, яка дає змогу швидко будувати ланцюги збору, перетворення та відображення телеметрії на основі типових вузлів інтеграції (протоколи, сервіси, бази даних) і власних функціональних блоків. Доцільність такого підходу підтверджується тим, що Node-RED розглядається як відкриті рішення з широкою протокольною підтримкою для обміну даними та комунікації з пристроями [107-110].

Перевагами застосування Node-RED в задачах візуалізації є [108]:

– швидка реалізація, візуальне програмування з можливістю ускладнювати логіку блоків та гнучка модифікація інформаційних потоків (особливо при зміні датчиків, телеметрії та сценаріїв місії), що узгоджується із загальними перевагами підходу щодо прискорення розробки та залучення фахівців предметної області [111].

– інтеграція різних програмних протоколів (типово: MQTT/HTTP/WebSocket та ін.), що дозволяє будувати єдиний «вхід» для телеметрії та формувати операторські панелі; у промислових роботах Node-RED прямо позиціонують як інструмент інтеграції, який дозволяє використовувати обладнання з ПЗ від різних компаній [107].

– підтримка віддаленого доступу та панелей моніторингу, що відповідає підходам, де Node-RED використовується для побудови панелей і забезпечення дистанційної доступності [112].

– динамічне веб-відображення. На відміну від статичних десктопних додатків, веб-інтерфейс Node-RED автоматично адаптується під різні пристрої (ПК оператора, планшет, мобільний термінал).

Застосування Node-RED має такі обмеження:

– централізований характер виконання потоків у базовому сценарії: для мобільних/транзитних середовищ і розподіленого виконання потрібні додаткові механізми (у [113] показано, що типовий Node-RED «координує робочий процес централізовано» і це обмежує застосування в середовищах із мобільними вузлами).

– проблеми підтримки при зростанні складності: без дисциплінованих правил проектування потоки можуть перетворюватися на важкі для розуміння та тестування блоки; запропоновані й експериментально перевірені правила написання коду показують, що стандартизація стилю потоків знижує кількість помилок і час розуміння [114].

– кібербезпека екосистеми вузлів: використання сторонніх вузлів створює ризики через «неперевірені» внески та відсутність достатніх перевірок безпеки, а також потребують окремих заходів контролю/політик виконання [115].

При розростанні проєкту і збільшенні критичності часу виконання окремих вузлів можлива міграція в комерційні середовища розробки, або використання C/C++ мови програмування. Практично це виконується як поетапний перехід з переносом критичних за часом виконання частин в окремі сервіси або модулі (C/C++), які викликаються з Node-RED.

2.3.1 Архітектура системи системи візуалізації

Узагальнену функціональну схему системи візуалізації даних INS-B, що розробляється, наведено на рис. 2.3 [108, 109].



Рис. 2.3. Узагальнена функціональна схема системи візуалізації даних INS-B

На схемі показано, що INS-B підключена до персонального комп'ютера (ПК) через послідовний порт і може обмінюватися з ним даними в обох напрямках. На ПК запущено HTTP сервер (HTTP – це протокол передавання даних у веб-середовищі), а доступ до Node-RED здійснюється через браузер. За адресою <http://127.0.0.1:1880> відкривається середовище розробки Node-RED, де налаштовуються потоки обробки даних. За адресою <http://127.0.0.1:1880/ui> відкривається інтерфейс системи візуалізації, у якому відображаються результати обробки та телеметрія. Таким чином ПК виступає проміжною ланкою між ІНС і веб-інтерфейсом, забезпечуючи приймання, обробку та відображення телеметрії.

Правила обміну телеметрії з INS-B називають протоколом, що описаний в табл. 2.2. В протоколі обміну даних INS-B використовуються такі визначення: номер визначає тип повідомлення, що приймається з INS-B; довжина – це кількість байт в повідомленні; корисна інформація – це байти, де буде міститись корисна інформація з INS-B; контрольна сума визначається як 2 байти, в яких міститься сума всього повідомлення для контролю правильності прийому.

Таблиця 2.2 – Протокол обміну даних «INS-B»

Номер байту	0	1	2	3	4, 5	6 .. (n+5)	n+6, n+7
Назва				Но- мер	Дов- жина	Корисна інформа- ція	Контрольна сума
Тип даних	uint8	uint8	uint8	uint8	uint16	n uint8 (зміню- ється)	uint16
Нотатки	0xAA	0x55	0x00				

Для запуску INS-B необхідно подати відповідні повідомлення (команди) з ПК через послідовний порт по протоколу, описаному в табл. 2.2. Для цього використовується два конфігураційні повідомлення (команди), що описані в табл. 2.3 [108].

Таблиця 2.3 – Конфігураційні повідомлення INS-B

Номер байту	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Назва			Тип	Номер	Довжина		Корисна інфор- мація	Контрольна сума	
Тип даних	uint8	uint8	uint8	uint8	uint8	uint8	n uint8	uint16	
Команда Стоп	0xAA	0x55	0x00	0x00	0x07	0x00	0xFE	0x05	0x01
Команда OPVT2AHR	0xAA	0x55	0x00	0x00	0x07	0x00	0x58	0x5F	0x00

При відправці повідомлення від ПК до INS-B поля «Тип» і «Номер» повідомлення заповнюються нулями. Номер команди передається в полі «Корисна інформація», де номер «0xFE» відповідає команді «Стоп», а номер «0x58» відповідає команді «OPVT2AHR». Після відправки з ПК команди «Стоп» INS-B перестає працювати. Відправка з ПК команди «OPVT2AHR» (0x58) переводить INS-B в режим початкової виставки [31] для визначення початкових умов інтегрування сигналів ІВМ. При завершенні початкової виставки передається телеметрія від ІНС до ПК по протоколу, описаному в табл. 2.1. Структуру формату даних для команди «OPVT2AHR» наведено в табл. 2.3 [100,108].

Таблиця 2.4 – Структура повідомлення OPVT2AHR

Опис	Тип даних	Нотатки
Кути орієнтації	uint16	Курс, град·10 ²
	int16	Тангаж, град·10 ²

	int16	Крен, град $\cdot 10^2$
Гіроскопи	3×int32	Кутова швидкість, град/сек $\cdot 10^5$
Акселерометри	3×int32	Прискорення, g $\cdot 10^6$
Магнітометри	3×int16	Магнітне поле, нТл/10
Статус	uint16	Статус ІНС
Напруга	uint16	V $\cdot 10^2$
Температура	int16	°C $\cdot 10$
Позиція	int64	Широта, град $\cdot 10^9$
	int64	Довгота, град $\cdot 10^9$
	int32	Висота, м $\cdot 10^3$
Швидкості	3×int32	Східна, північна, вертикальна швидкість, м/с $\cdot 10^2$
Позиція приймача	int64	Широта ГНСС, град $\cdot 10^9$
	int64	Довгота ГНСС, град $\cdot 10^9$
	int32	Висота ГНСС, м $\cdot 10^3$
Швидкості приймача	int32	ГНСС горизонтальна швидкість, м/с $\cdot 10^2$
	uint16	ГНСС шляховий курс, град $\cdot 10^2$
	int32	ГНСС вертикальна швидкість, м/с $\cdot 10^2$
Мітка часу	uint32	В мс від початку контрольного тижня ГНСС
Статус часу	uint8	вказує на якість опорного часу ГНСС
Інформація приймача	uint8	Сервісна інформація
Кількість супутників	uint8	
Затримка часу	uint16	затримка логу швидкості в мс
Статус двох антенного курсу	uint8	Характеризує якість рішення для двох антенного курсу

Курс з двох антенного приймача	uint16	Курс ГНСС, град $\cdot 10^2$
Часова затримка логів	3×int16	Часова затримка логів приймача для двох антенного курсу, позиції та швидкості відносно ГНСС часу.
Барометр	uint16	Тиск, Па/2
	int32	Барометрична висота, м $\cdot 10^3$
Нові дані приймача	uint8	

Наведена в табл. 2.4 інформація має достатньо даних, щоб використати її в системі візуалізації.

2.3.2 Програмна реалізація в середовищі Node-RED

Для системи візуалізації в середовищі Node-RED створимо програму, яка складається з потоків (Flow). Потоки – це вузли (Nodes), пов’язані між собою інформаційними дротами (Wires), що виконуються як умовно незалежні програми при виникненні певних подій. Середовище розробки відкривається в браузері за посиланням <http://127.0.0.1:1880> на ПК [108].

Загальний вигляд програми, розробленої в середовищі Node-RED для системи візуалізації, наведено на рис. 2.4. Програмна реалізація в Node-RED, що представлена на рис. 2.4, структурно розділена на три логічні гілки, що працюють асинхронно:

1. Контур керування (рис. 2.4,а): реалізує надсилання повідомлень до ІНС. При натисканні графічних кнопок «Старт»/ «Стоп» (вузли типу `ui_button`) генерується подія, яка ініціює виконання JavaScript-коду у функціональних вузлах («OPVT2AHR_fun», «STOP_fun»). Ці вузли формують бінарні пакети відповідно до протоколу (табл. 2.3) та передають їх у вузол послідовного порту для фізичної відправки на пристрій. Написаний код на мові програмування Java script, що виконується у вузлах-функціях «OPVTHR_fun» та «STOP_fun», наведено відповідно в додатках В.1.1 та В.1.2.

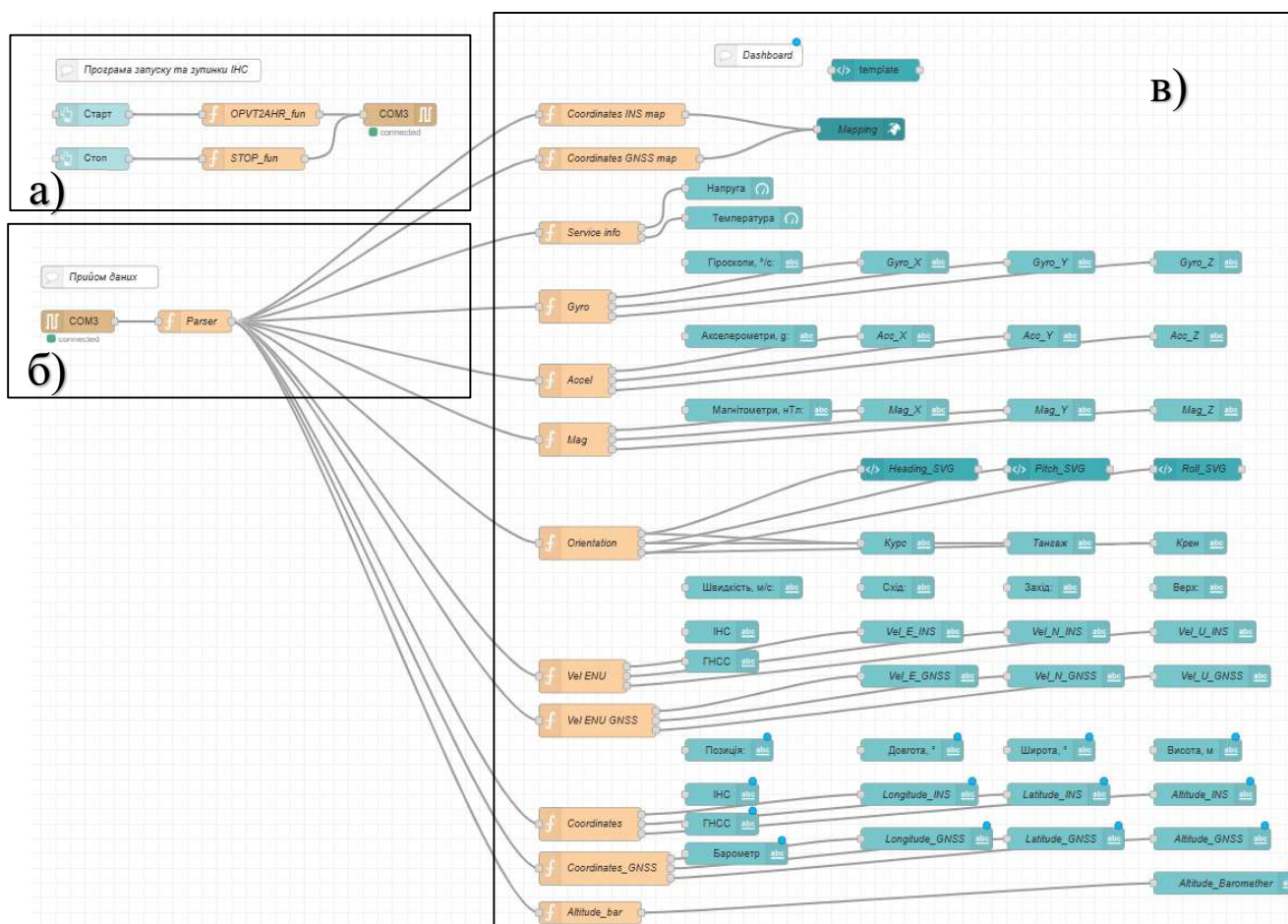


Рис. 2.4. Вигляд програми для системи візуалізації в середовищі розробки Node-RED: а) програма запуску та зупинки роботи ІНС-В; б) програма прийому повідомлень ІНС-В; в) програма візуалізації параметрів руху.

2. Контур обробки (рис. 2.4,б): відповідає за прийом вхідного потоку байтів. Ключовим елементом є вузол «Parser», який виконує роль кінцевого автомата: він шукає преамбулу кадру (0xAA 0x55), перевіряє контрольну суму та декодує бінарні дані у змінні (курс, крен, тангаж, координати тощо). Написаний код на мові програмування JavaScript, що виконується у вузлах-функціях «Parser», показано в додатку В.1.3. Після розбору дані маршрутизуються в окремі функціональні вузли, які готують декодовану інформацію з функціонального вузла «Parser» у відповідний формат, що придатний для конкретних віджетів візуалізації.

3. Контур візуалізації (рис. 2.4, в). Отримані декодовані дані додатково обробляються у функціональних вузлах Node-RED для перетворення у придатний формат, що використовують віджети графічного інтерфейсу. Зокрема, перетворення параметрів орієнтації здійснюється у функціональному вузлі Orientation (B.1.4), обробка вимірювань гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів – у вузлах Gyro (B.1.5), Accel (B.1.6) та Mag (B.1.7) відповідно. Перетворення навігаційних параметрів швидкості та координат у ГСК виконується у вузлах Vel ENU (B.1.12), Coordinates (B.1.13) та Coordinates_GNSS (B.1.14), а формування даних для картографічного відображення – у вузлах Coordinates INS map (B.1.9) та Coordinates GNSS map (B.1.10). Перетворені дані маршрутизуються до відповідних віджетів інтерфейсу (графіки, текстові поля, мапа) для відображення в реальному часі. Після відповідного форматування дані маршрутизуються до віджетів інтерфейсу користувача та відображаються оператору в режимі реального часу. Дані з приладу INS-B відображаються на веб-сторінці графічного інтерфейсу системи візуалізації за адресою <http://127.0.0.1:1880/ui>, приклад якої наведено на рис. 2.5. Доступ до графічного інтерфейсу можливий також з інших пристроїв (мобільного телефону або планшета) за умови їх підключення до локальної мережі. В такому випадку для доступу до середовища розробки або візуалізації даних у веб-сторінці необхідно вказувати локальний IP адрес, замість IP - 127.0.0.1.

На рис. 2.5 зображено графічний інтерфейс (головна панель), який забезпечує візуальне представлення інформації для візуалізації параметрів руху, сервісну інформацію, елементи керування роботою INS-B та положення на карті, що виконується графічно відображеною програмою на рис. 2.4,в.

За допомогою стандартних засобів Node-RED зроблена переважна більшість візуалізації, що зображена на головній панелі рис. 2.5. У правій частині під написом “Сенсори”, показано кути орієнтації (курс, крен, тангаж) в двох формах: скалярна векторна графіка (SVG) та знизу числові значення в текстовому вигляді. Під кутами орієнтації розміщено дані вимірювання ІВМ (гіроскопи, акселерометри) та магнітометрів у вигляді проекцій на осі об’єкту XYZ. Такий формат дозволяє швидко виявляти аномалії (насичення, викиди, зсуви нуля) та зіставляти їх із поведінкою

оцінених кутів. Присутнє відображення швидкостей і координат у географічній системі координат в числовому текстовому вигляді з ІНС та ГНСС, а також висоти за барометром. Таке подання інформації дозволяє проводити порівняння рішення ІНС з ГНСС та барометричною висотою для верифікації коректності роботи INS-B.

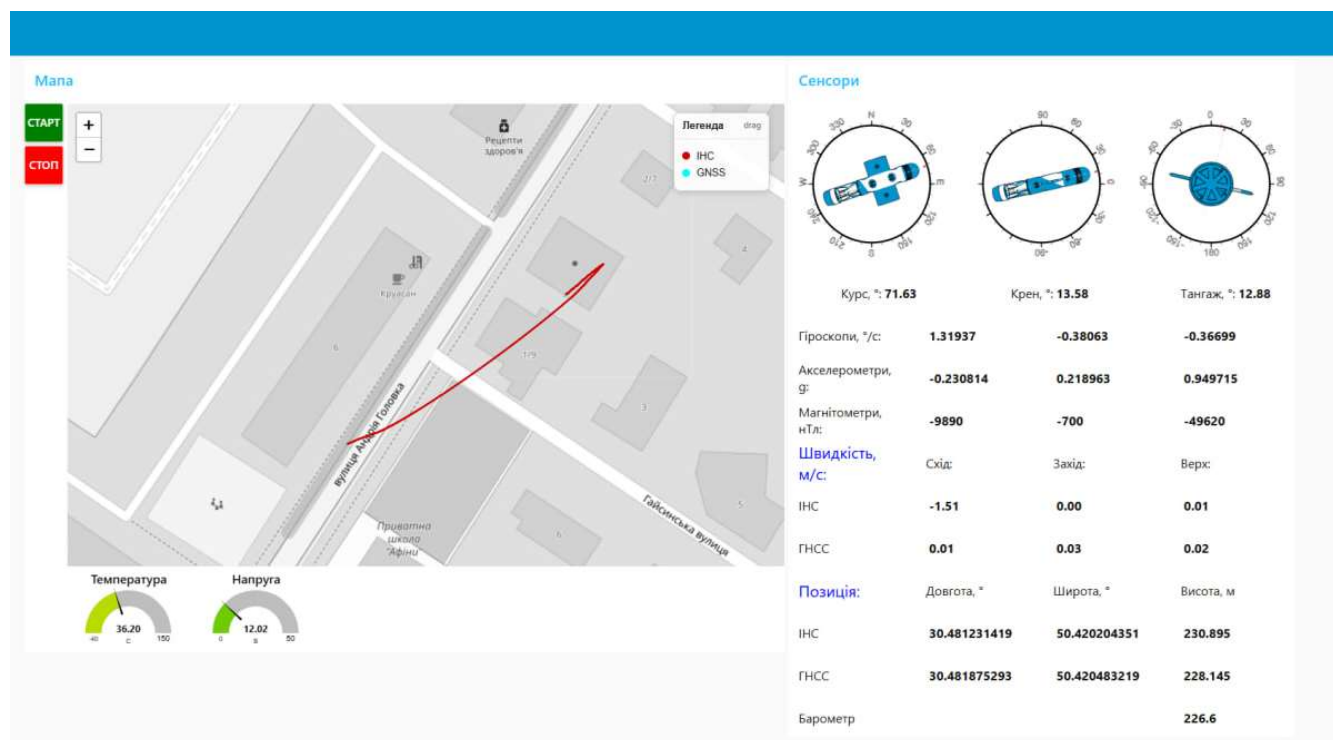


Рис. 2.5. Головна панель системи візуалізації: карта з траєкторією (ІНС – червоний, ГНСС – ціановий) та даними сенсорів і представленням анімованої орієнтації.

У нижній частині панелі (рис. 2.5) розміщено індикатори температури та напруги, які зображені в якості двох графічних модулів, значення на них показуються у вигляді тексту та півколового індикатора зі стрілкою. Ці дані використовуються для оперативного контролю стану апаратури під час експериментів. Наявність цих параметрів є важливою, оскільки температурні зміни та неконтрольовані зміни характеристик живлення можуть спричиняти систематичні похибки вимірювань IBM [108].

Елементом просторової візуалізації є мапа, на якій відображається положення об'єкта в реальному часі і в попередні моменти часу. Реалізовано показ двох джерел навігаційної інформації: ІНС та ГНСС. На панелі присутня легенда з позначеннями

шарів, що відображає червоним кольором траєкторію за ІНС (а за ГНСС – ціан) та можливістю її перетягування, що підвищує зручність роботи оператора і запобігає перекриттю важливих ділянок карти. На рис. 2.5 мапа зображує приклад роботи ІНС без зовнішньої корекції, при стабільній роботі ГНСС.

У лівому верхньому куті знаходяться кнопки «Старт» і «Стоп», при натисканні яких виконуються операції відповідно запуску та зупинки ІНС.

2.3.3 Проектування графічного інтерфейсу та SVG-індикаторів.

Особливу увагу в програмній реалізації системи візуалізації приділено розробці індикаторів орієнтації (рис. 2.6 та рис. 2.7). Традиційні цифрові індикатори вимагають від оператора високої концентрації для побудови уявної моделі положення апарата. Використання динамічних моделей на основі скалярної векторної графіки, або SVG-моделей, вирішує цю проблему. Це дозволяє оператору миттєво оцінити кути тангажу та крену, що є критично важливим при виконанні гідробатичних маневрів у вузьких місцях або при стабілізації апарата на течії.

Скалярна векторна графіка для відображення кутів орієнтації зроблена на основі відкритого проєкту БПА розробленого в SolidWorks [116], а побудова кругових шкал та поєднання елементів векторної (скалярної) графіки здійснено з використанням відкритого програмного забезпечення Воху SVG [117].

Кожен SVG-елемент має ідентифікатор (ID), за яким програмне середовище Node-RED звертається через CSS функції для трансформації елементів графіки. Основна функція `transform: rotate(N deg)`, де N — значення кута в градусах для курсу, крену або тангажу у відповідній SVG графіці.

На рис. 2.6,а наведено скалярну векторну графіку АБПА, вид зверху, для відображення повороту АБПА по курсу у вигляді компасу. По колу розміщено шкалу азимутів у градусах ($0 \dots 360^\circ$) з позначеннями сторін світу N–E–S–W, що задає орієнтацію відносно напрямку на північ. У центрі зображено умовну проєкцію АБПА з стрілкою що має на кінці червоний маркер. Така форма подання забезпечує наочний контроль зміни курсу в реальному часі та використовується як елемент операторського інтерфейсу під час моніторингу орієнтації АБПА.

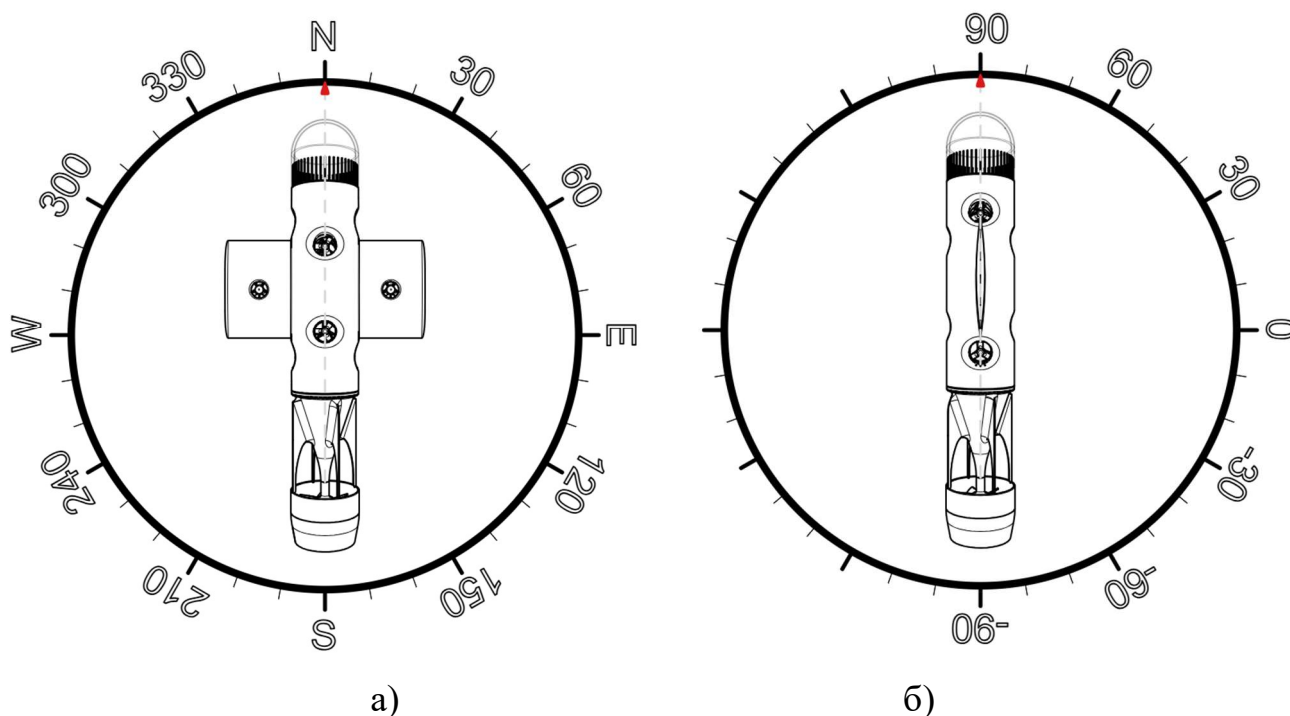


Рис. 2.6. Скалярна векторна графіка АБПА: а) вид зверху для відображення повороту по курсу; б) вид зліва для відображення кута тангажу

Для відображення повороту апарата по тангажу (рис. 2.6,б) у вертикальній площині по колу розміщено кутову шкалу у градусах у діапазоні $\pm 90^\circ$ з основними поділками через 30° , що забезпечує візуальний відлік кута тангажу відносно нульового положення. У центрі зображено умовну бокову проекцію АБПА, положення якої змінюється відповідно до поточного значення кута тангажу. Стрілка-індикатор із червоним маркером на кінці показує напрямок носу АБПА та слугує для наочного контролю знаку і величини кута тангажу в реальному часі.

На рис. 2.7 наведено скалярну векторну графіку для відображення повороту апарата по крену (вид ззаду). По колу розміщено фіксовану кутову шкалу у градусах у діапазоні $\pm 180^\circ$ з основними поділками через 30° , яка задає опорну систему відліку. У центрі показано умовну задню проекцію АБПА, що обертається відповідно до поточного значення крену. Червоний маркер у верхній частині є частиною рухомого зображення апарата та обертається разом з АБПА, візуально відображаючи

його поточну орієнтацію відносно нерухомої шкали. Така побудова дозволяє оператору швидко оцінювати знак і величину кута крену за взаємним положенням маркера та поділок шкали в режимі реального часу.

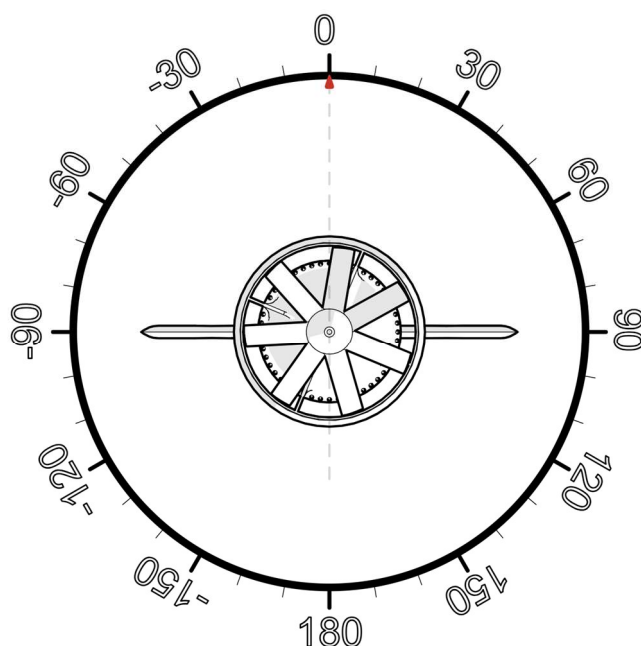


Рис. 2.7. Скалярна векторна графіка, вид ззаду для відображення повороту по крену

Виконання програмних фрагментів (JavaScript/HTML/CSS), що містяться у вузлах потоку Heading_SVG (B.1.16), Pitch_SVG (B.1.17), Roll_SVG (B.1.17) забезпечує відображення анімованої графіки рис. 2.6-2.7.

Створене в середовищі Node-RED програмне забезпечення дає можливість прийняти від інерціальної навігаційної системи та відобразити на розробленому графічному інтерфейсі множину даних інформації про місцезнаходження, просторове положення та швидкість об'єкту, на якому буде встановлено таку навігаційну систему. Побудована таким чином система візуалізації є невід'ємною частиною інтегрованого навігаційного комплексу АБПА та забезпечить прийом і відображення навігаційних параметрів АБПА на пристроях базової станції чи судна-носія.

Висновки до Розділу 2

1. Запропоновано та обґрунтовано інтеграцію в єдиному комплексі технічних та програмних засобів орієнтації, навігації, задання та виконання режимів руху і місії в цілому, визначення, передачі та відображення на борту судна-носія інформації про поточне місцезнаходження АБПА та параметри його руху, реалізації дистанційного керування апаратом (за необхідності).

2. Запропоновано та обґрунтовано узагальнену функціональну схему інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, яка відображає взаємодію навігаційної, керуючої та вимірювальних підсистем для забезпечення автономного виконання місії АБПА. Визначено склад основних функціональних модулів інтегрованого комплексу, їх призначення та взаємозв'язки між ними, а також уточнено принципи організації інформаційних потоків і взаємодії бортових та наземних компонентів.

3. Як основу модуля визначення орієнтації та параметрів руху АБПА обрано ІНС тактичного класу INS-B фірми «Inertial Labs», як таку, що забезпечує визначення місцеположення, швидкості та кутів орієнтації рухомих об'єктів з типовими характеристиками для цього класу систем, є компактним модулем з низьким енергоспоживанням, поєднує ІВМ з ГНСС-приймачем (для надводного режиму), барометричним каналом, магнітометрами, доплерівським лагом, має можливість корекції від базових станцій та може інтегруватись у бортову архітектуру без збільшення габаритів відсіків і теплового навантаження.

4. Обґрунтовано використання інструментарію для візуального програмування потоків даних Node-RED для побудови системи візуалізації руху АБПА, на основі чого розроблено програмне забезпечення для системи візуалізації даних INS-B фірми «Inertial Labs». Результат розробки системи представлено графічним інтерфейсом, в якому реалізовано:

- запуск та зупинку ІНС;
- візуальне представлення даних сенсорів (гіроскопів, акселерометрів, магнітометрів);

- індикатори кутів орієнтації АБПА (кутів курсу, тангажу та крену), розроблені з використанням динамічних моделей на основі скалярної векторної графіки;
- відображення даних про швидкості і координати АБПА у географічній системі координат в числовому текстовому вигляді з ІНС та ГНСС, а також висоти за барометром;
- індикація температури та напруги двома графічними модулями у вигляді тексту та півколових індикаторів зі стрілками;
- візуалізація місцеположення об'єкта на мапі в реальному часі і в попередні моменти часу на основі навігаційної інформації від ІНС та ГНСС.

5. Виконаний синтез системи візуалізації, як складової інтегрованого навігаційного комплексу, є основою для подальших досліджень взаємодії модулів комплексу та забезпечення вимог до навігаційних параметрів, що підлягають оцінюванню і відображенню, а також розроблення заходів для забезпечення прийнятної точності візуалізації місцеположення та параметрів руху АБПА.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ І ПЕРЕДАЧІ ПАРАМЕТРІВ РУХУ АВТОНОМНОГО БЕЗПЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

Як було показано у Розділі 2, для виконання АБПА багатоцільових завдань необхідно забезпечити інтеграцію навігаційного комплексу апарату та системи комунікації з судном-носієм (системи збору, передачі, зберігання, візуалізації інформації про місцезнаходження та параметри руху). Реалізація такого підходу вимагає обґрунтування та розробки методичного, алгоритмічного та програмного забезпечення для автономної орієнтації та навігації АБПА, для збору та попередньої обробки даних множини сенсорів АБПА в різних режимах його руху (зокрема, при виконанні гідробатичних маневрів) та визначення навігаційних параметрів і місцеположення апарату. Ці дані необхідні для подальшої передачі з АБПА та прийому базовою станцією, а також для відображення їх на пристроях базової станції [88].

У цьому розділі виконується моделювання руху АБПА за складною (коловою) траєкторією, моделювання сигналів сенсорів ІВМ та отримання даних про положення, швидкість та орієнтацію АБПА з ІНС для оцінювання точності визначення навігаційних параметрів, передачі та відображення в системі візуалізації.

3.1 Моделювання руху апарату

Для моделювання руху АБПА за складною траєкторією та моделювання роботи встановленої на об'єкті ІНС обираємо режим руху за коловою траєкторією (рис. 3.1), радіус r якої дорівнює 40 м, а значення координат центру (λ_0 та φ_0) для прикладу були прийняті такими: $\lambda_0=30^0$; $\varphi_0=50^0$ [88].

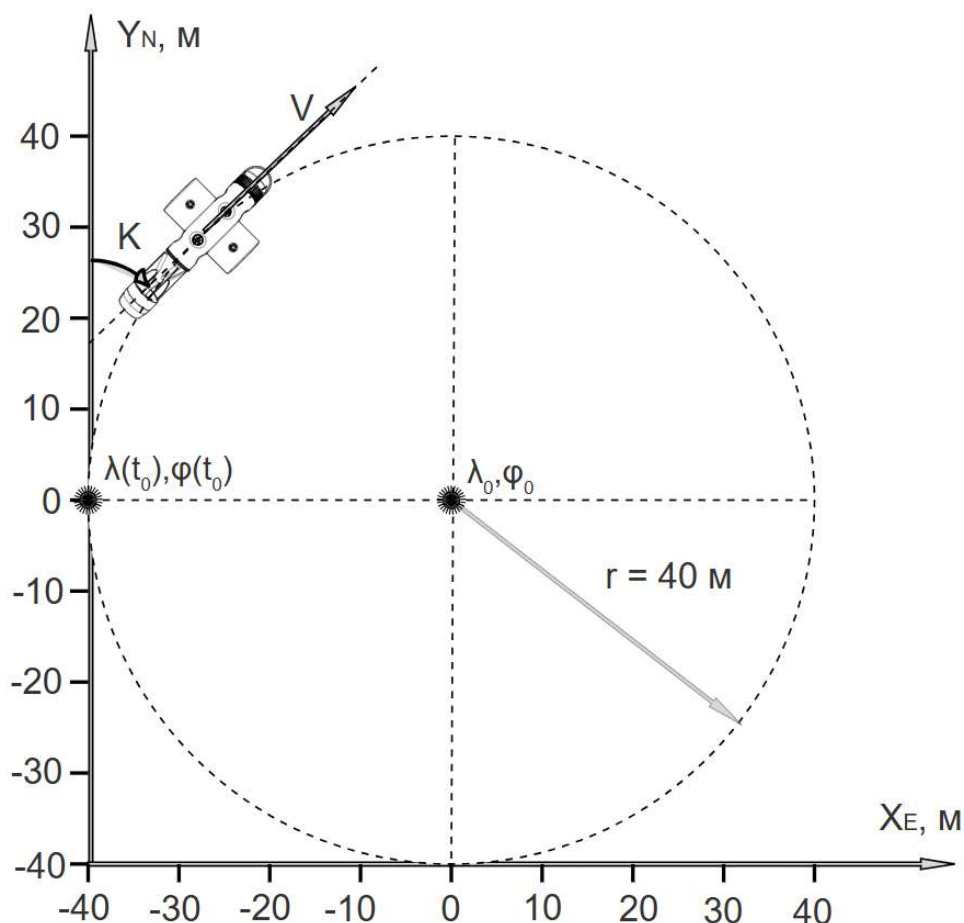


Рис. 3.1. Траєкторія колового руху АБПА

Рух АБПА розглядаємо лише в площині горизонту географічної системи координат (ГСК), осі якої X_E і Y_N направлені відповідно на схід і північ, вертикальна складова Z_U не розглядається, а проекції параметрів руху на вертикальну вісь припускаємо нульовими. Рух відбувається зі сталою швидкістю $V = 2,57$ м/с та нульовим кутами крену і тангажу, апарат виконує 5 повних обертів протягом 500 секунд. Нехай в початковий момент часу t_0 АБПА знаходиться в точці з координатами $\lambda(t_0)$ і $\varphi(t_0)$ та орієнтацією повздовжньої осі в північному напрямі, а наведене на рис. 3.1 положення апарату демонструє напрямок його руху по коловій траєкторії та зв'язок між напрямком вектору швидкості $\vec{V}$ і значенням кута курсу K .

При русі АБПА по колу за умови сталого модуля швидкості і радіуса кола, кут курсу K та швидкість зміни кута курсу $\dot{K}$ визначаються залежностями [88]:

$$\dot{K}(t) = \vec{V} / r, \quad K(t) = \dot{K} \cdot t, \quad (3.1)$$

де t – поточний час руху, с.

Використовуючи значення курсу $K(t)$ запишемо проекції вектора швидкості на осі ГСК:

$$V_E(t) = V \cdot \cos(K(t)), \quad V_N(t) = V \cdot \sin(K(t)), \quad V_U(t) = 0. \quad (3.2)$$

Проекції лінійного прискорення отримуємо шляхом диференціювання рівняння (3.2):

$$a_E(t) = \dot{V}_E(t) = -V \cdot \dot{K}(t) \cdot \sin(K(t)), \quad a_N(t) = \dot{V}_N(t) = V \cdot \dot{K}(t) \cdot \cos(K(t)), \quad a_U(t) = 0. \quad (3.3)$$

Інтегруючи рівняння (3.2), визначаємо географічні координати АБПА [88]:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi_0 + \int_{t_0}^{t_k} \frac{V_N(t)}{R_M(\varphi)} dt = \varphi_0 + \frac{V \sin(K)}{\dot{K} \cdot R_M(\varphi)} = \varphi_0 + \frac{V \sin(\dot{K} \cdot t)}{\dot{K} \cdot R_M(\varphi)} \\ \lambda(t) &= \lambda_0 + \int_{t_0}^{t_k} \frac{V_E(t)}{R_N(\varphi) \cos \varphi} dt = \lambda_0 - \frac{V \cos(K)}{\dot{K} \cdot R_N(\varphi)} = \lambda_0 - \frac{V \cos(\dot{K} \cdot t)}{\dot{K} \cdot R_N(\varphi)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

де: t_0, t_k – початковий і кінцевий моменти часу моделювання руху; $\varphi(t), \lambda(t)$ – відповідно широта та довгота місцеположення апарату; φ_0, λ_0 – початкові умови для визначення координат (збігаються з центром кола); $R_N(\varphi)$ – нормальний радіус для напрямку схід–захід; $R_M(\varphi)$ – радіус кривизни меридіана, що визначається для напрямку північ–південь.

Два радіуси кривизни (нормальний радіус і радіус меридіана) мають особливе значення, вони визначають швидкість змінювання широти та довготи, коли ГСК рухається по поверхні Землі або поблизу неї [29]. Нормальний радіус $R_N(\varphi)$ визначається для напрямку схід–захід і відомий, як великий нормальний радіус, а радіус кривизни меридіана $R_M(\varphi)$ визначається для напрямку північ–південь і є радіусом еліпса:

$$R_N(\varphi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}, \quad R_M(\varphi) = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}, \quad (3.5)$$

де: a – ексцентриситет; e – велика піввісь (екваторіальний радіус).

Оновлення географічного положення визначаємо за швидкостями змінювання широти, довготи та, для узагальнення, висоти h :

$$\dot{\varphi} = \frac{V_N}{R_N + h}, \quad \dot{\lambda} = \frac{V_E}{(R_E + h) \cos \varphi}, \quad \dot{h} = V_U. \quad (3.6)$$

Отримані аналітичні залежності (3.1) – (3.6) дозволяють розрахувати еталонні значення параметрів руху АБПА за коловою траєкторією.

3.2 Формування еталонних значень параметрів руху АБПА

На етапі моделювання руху необхідно сформувати еталонні (розрахункові) часові реалізації параметрів руху, які використовуються як базові значення для подальшої перевірки працездатності алгоритмів навігації та оцінювання похибок. До таких параметрів належать координати місцеположення, проекції швидкості та лінійного прискорення у ГСК, а також кут курсу і кутова швидкість його зміни. Кути крену і тангажу, а також висота, які для моделювання прийняті нульовими, не змінюються.

Розрахунок еталонних значень виконується за наведеними вище аналітичними залежностями (3.1) – (3.6) для колового руху АБПА із заданими вище параметрами траєкторії та руху впродовж часу 500 с. Результати розрахунку еталонних значень координат АБПА за виразом (3.4) наведено на рис. 3.2 [88]:

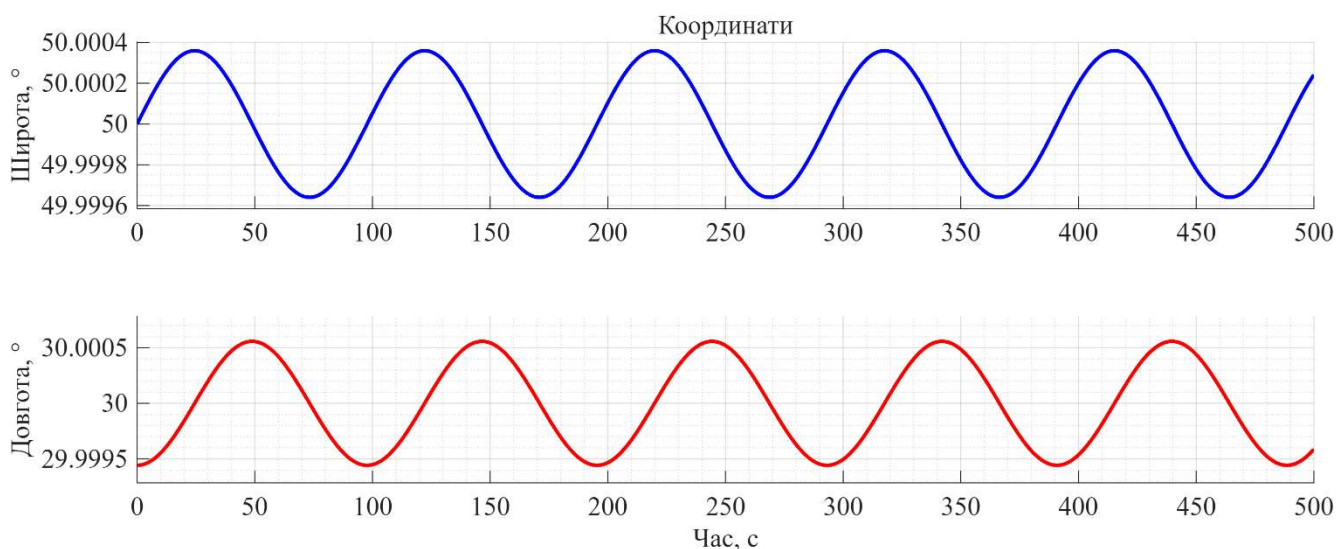


Рис. 3.2. Графіки змінювання еталонних координат АБПА

Замість абсолютних значень географічних координат, отриманих в розрахунках, зручніше використовувати зміщення АБПА в східному і північному напрямку в метрах відносно центру кола [118]:

$$\begin{aligned} X_E(t) &= [\lambda(t) - \lambda_0] R \cos(\varphi(t)) \\ Y_N(t) &= [\varphi(t) - \varphi_0] R \end{aligned}, \quad (3.7)$$

де: $R = 6371000$ м; $X_E(t)$ та $Y_N(t)$ – зміщення АБПА відносно центру кола, м.

Графіки змінювання зміщення АБПА від центру кола у північному та східному напрямках при проходженні коловою траєкторією наведено на рис. 3.3 [88].

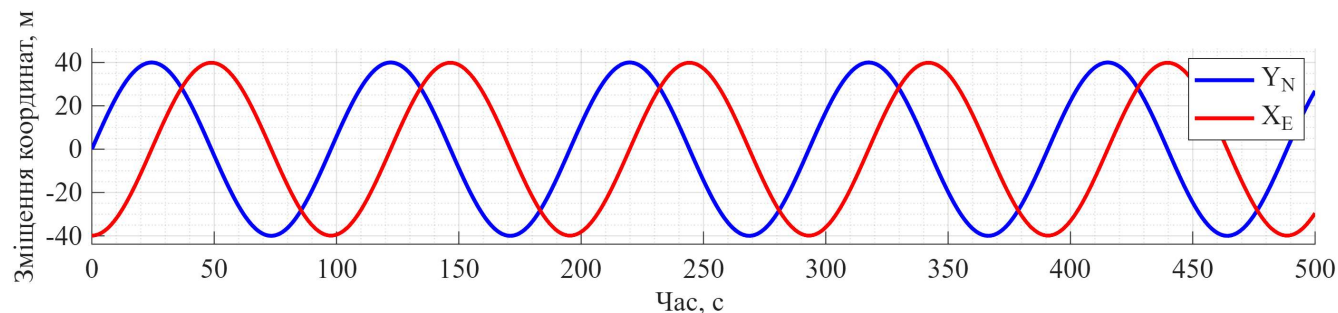


Рис. 3.3. Графіки змінювання еталонних зміщень АБПА у північному та східному напрямках

Еталонні проекції вектора швидкості у географічній системі координат визначаються за співвідношеннями (3.2), графіки змінювання проекцій V_E та V_N наведено на рис. 3.4 [88].

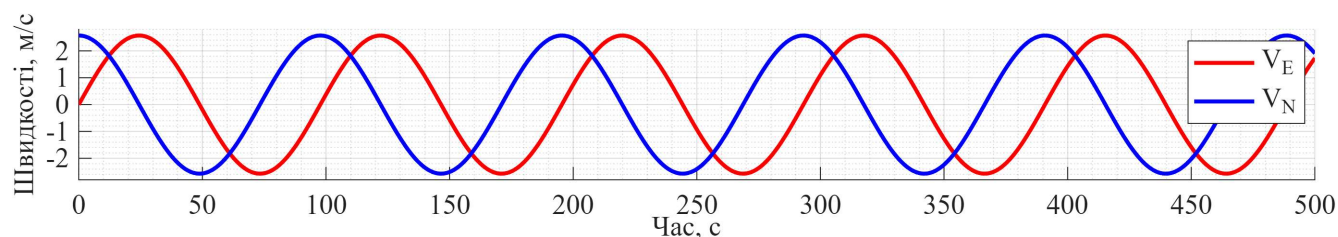


Рис. 3.4. Графіки змінювання еталонних проекцій швидкості АБПА у географічній системі координат

Еталонні значення кута курсу та швидкості його змінювання визначаються за виразами (3.1). Ці величини характеризують орієнтацію вектора швидкості в горизонтальній площині і застосовуються для узгодження кінематичної моделі руху з моделями інерціальних вимірювань. Графіки змінювання кута курсу АБПА при його русі за коловою траєкторією зі сталою швидкістю наведено на рис. 3.5 [88].

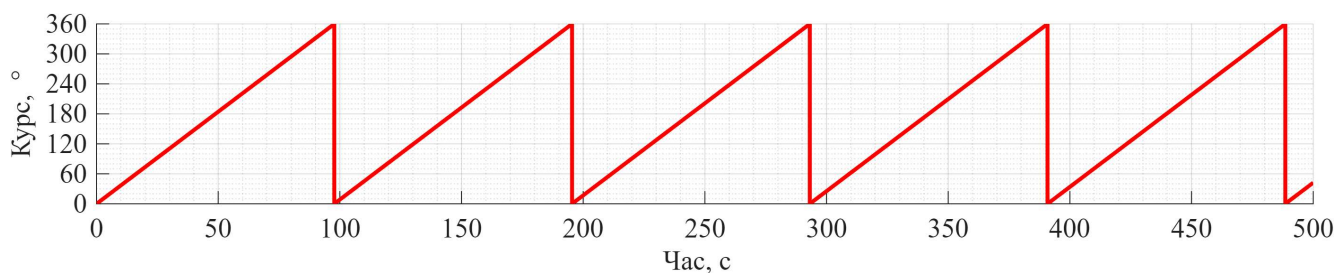


Рис. 3.5. Графіки змінювання еталонного значення кута курсу $K(t)$

Отримані результати моделювання колового руху АБПА відповідають заданим параметрам руху та параметрам траєкторії [88].

3.3 Моделювання еталонних сигналів інерційних сенсорів

Для подальшого дослідження алгоритмів ІНС необхідно сформувати еталонні сигнали гіроскопів та акселерометрів, що відповідають заданому руху АБПА. Формування таких сигналів виконується на основі розрахованих еталонних параметрів руху та перетворень між географічною і пов'язаною з апаратом системами координат [88]. Сформовані таким чином дані акселерометрів (a_x, a_y, a_z) і гіроскопів ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) будуть використані для моделювання роботи ІНС та оцінювання впливу різних похибок в сигналах ІВМ на результати визначення вихідних параметрів ІНС про навігаційні параметри та місцеположення АБПА при його коловому русі.

3.3.1 Моделювання сигналів гіроскопів

Еталонні сигнали гіроскопів відповідають проекціям кутової швидкості на осі системи координат, пов'язаної з об'єктом (АБПА). У загальному випадку вони враховують власну кутову швидкість маневру, переносну кутову швидкість та обертання Землі. Еталонні сигнали гіроскопів отримаємо з узагальненого рівняння Пуассона [31, 88]:

$$[\omega \times] = C^T \dot{C} + C^T [U g \times] C, \quad (3.8)$$

де $C, \dot{C}$ – відповідно матриця та похідна матриці перепроєктування з системи координат, пов'язаної з об'єктом, в географічну систему координат; $[\omega \times]$ – кососиметрична матриця сигналів гіроскопів (проекцій абсолютної кутової швидкості на осі

системи координат, пов'язаної з об'єктом; $[Ugx]$ – кососиметрична матриця переносних кутових швидкостей в географічній системі координат.

Опишемо кожен складову рівняння (3.8).

Кососиметрична матриця еталонних сигналів гіроскопів:

$$[\omega \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_y & \omega_z \\ \omega_y & 0 & -\omega_x \\ -\omega_z & \omega_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

де $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції кутової швидкості на осі пов'язаної з апаратом системи координат XYZ.

Кососиметрична матриця переносної кутової швидкості та обертання Землі:

$$[Ugx] = \begin{bmatrix} 0 & -(\dot{\lambda} + U)\cos(\phi) & (\dot{\lambda} + U)\sin(\phi) \\ (\dot{\lambda} + U)\cos(\phi) & 0 & \dot{\phi} \\ -(\dot{\lambda} + U)\sin(\phi) & -\dot{\phi} & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

де U – кутова швидкість обертання Землі.

Орієнтація об'єкту відносно ГСК задається трьома кутами: курсу K , тангажу θ та крену γ , як показано на рис. 3.6.

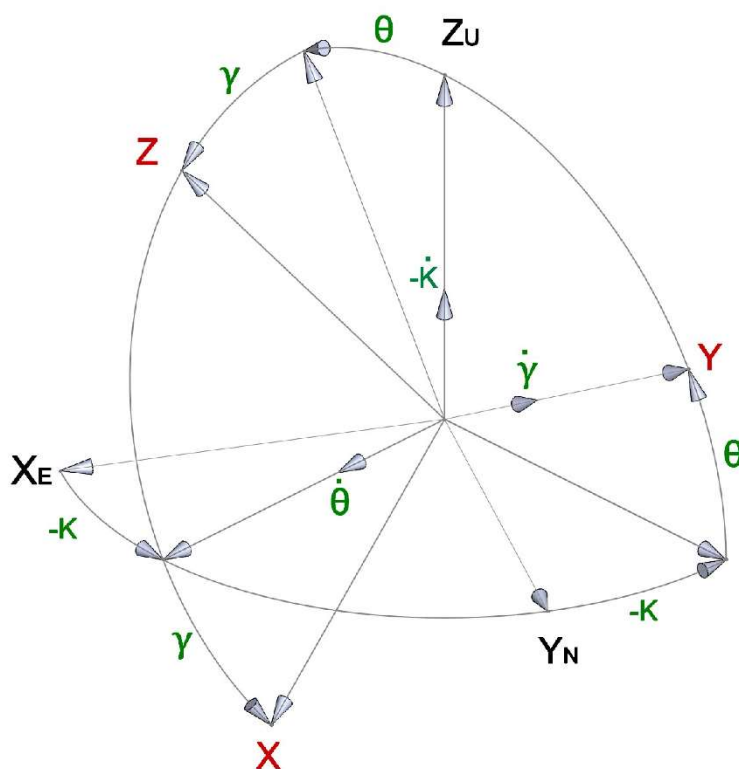


Рис. 3.6. Положення осей об'єкта (XYZ) відносно ГСК ($X_E Y_N Z_U$)

Формування матриці направляючих косинусів C , яка описує перехід від пов'язаної з об'єктом системи координат XYZ в географічну систему координат $X_E Y_N Z_U$:

$$C = \left(\underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & -\sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \cos(K) & -\sin(K) & 0 \\ \sin(K) & \cos(K) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^T, \quad (3.11)$$

де A – матриця переходу від системи $X_E Y_N Z_U$ в систему XYZ .

Перемноживши матриці, що входять до (3.11), та виконавши транспонування, одержимо вираз для матриці напрямних косинусів C , яка визначається кутами орієнтації [31].

$$C = \begin{bmatrix} \cos K \cos \gamma + \sin K \sin \gamma \sin \theta & \sin K \cos \theta & \cos K \sin \gamma - \sin K \cos \gamma \sin \theta \\ -\sin K \cos \gamma + \cos K \sin \gamma \sin \theta & \cos K \cos \theta & -\sin K \sin \gamma - \cos K \cos \gamma \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \gamma & \sin \theta & \cos \theta \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Для раніше прийнятих нульових значень кутів крену і тангажу вираз (3.12) буде мати вигляд [88]:

$$C = \begin{bmatrix} \cos(Kt) & \sin(Kt) & 0 \\ -\sin(Kt) & \cos(Kt) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Швидкість зміни матриці орієнтації C визначається диференціюванням за часом виразу (3.13):

$$\dot{C} = \begin{bmatrix} -\dot{K} \sin(Kt) & \dot{K} \cos(Kt) & 0 \\ -\dot{K} \cos(Kt) & -\dot{K} \sin(Kt) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Інформативна надлишковість кососиметричної матриці сигналів гіроскопів (3.9) дозволяє отримати точніші оцінки складових, усереднюючи відповідні симетричні елементи:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega \times_{2,3} + \omega \times_{3,2} \\ -\omega \times_{1,2} - \omega \times_{2,1} \\ -\omega \times_{3,1} + \omega \times_{1,3} \end{bmatrix} / 2, \quad (3.15)$$

де $\omega \times_{i,j}$ – елементи кососиметричної матриці, сформованої з сигналів гіроскопів.

Підставивши матрицю орієнтації (3.13) та вирази для кутових швидкостей (3.10) і (3.14), отримаємо еталонні сигнали гіроскопів для заданих параметрів траєкторії та швидкості руху. Результати моделювання наведено на рис. 3.7.

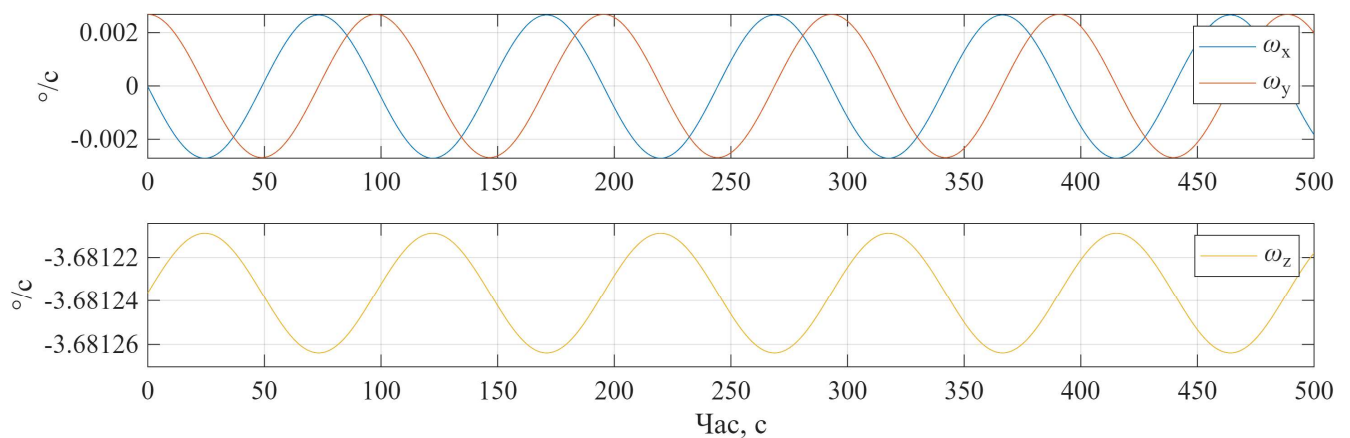


Рис. 3.7. Графіки змінювання еталонних сигналів гіроскопів у пов'язаній з АБПА системі координат

Отримані значення сигналів гіроскопів (сигнали кутової швидкості відносно осей пов'язаної з АБПА системи координат) відображають постійну складову $\dot{K}$ в сигналі гіроскопа ω_z (відносно вертикальної осі), сигнали усіх гіроскопів є гармонічними з періодом колового руху АБПА [88].

3.3.2 Моделювання сигналів акселерометрів

Еталонні сигнали акселерометрів визначаються як проекції прискорень та гравітації на осі АБПА. Розрахунок в ГСК виконується за виразом [31, 88]:

$$\begin{bmatrix} a_E \\ a_N \\ a_U \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{V}_E \\ \dot{V}_N \\ \dot{V}_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\varphi} \\ \dot{\lambda} \cos(\varphi) \\ \dot{\lambda} \sin(\varphi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix}}_{\text{Відносне прискорення}} + \underbrace{2 \begin{bmatrix} 0 \\ U \cos(\varphi) \\ U \sin(\varphi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix}}_{\text{Коріолісове прискорення}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g(\varphi, h) \end{bmatrix}}_{\text{Уявне прискорення}}. \quad (3.16)$$

Отримаємо сигнали акселерометрів у проекціях на осі пов'язаної з АБПА системи координат за допомогою матриці орієнтації:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} a_E \\ a_N \\ a_U \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

За отриманим рівняннями (3.17) та (3.16) проведено моделювання сигналів акселерометрів, результати якого наведено на рис. 3.8.

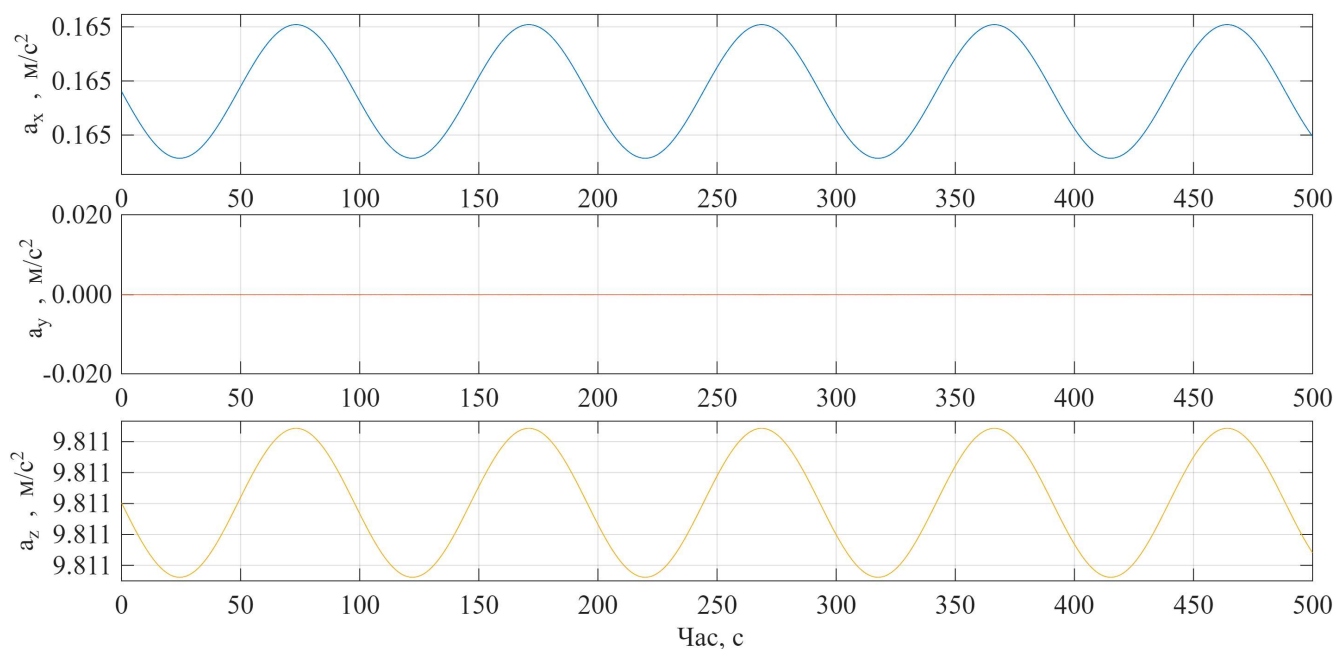


Рис. 3.8. Графіки змінювання еталонних сигналів акселерометрів у пов'язаній з АБПА системі координат

Нульовий сигнал акселерометра a_y відображає рух апарату зі сталою швидкістю. Стала складова прискорення в сигналі акселерометра a_x ($0,165 \text{ м/с}^2$) характеризує доцентрове прискорення. Період гармонічних коливань в сигналах акселерометрів a_x і a_z відповідає періоду колового руху АБПА.

Таким чином, для колового руху АБПА зі сталою швидкістю протягом заданого часу 500с проведено моделювання еталонних сигналів сенсорів ІВМ (гіроскопів та акселерометрів), за якими визначаються параметри руху АБПА в ІНС [88].

3.4 Урахування впливу випадкових завад у сигналах інерційних сенсорів

У реальних умовах вихідні сигнали інерційних сенсорів спотворюються випадковими та систематичними похибками, що зумовлює накопичення похибок визначення кутів орієнтації, швидкості та координат у автономному режимі ІНС. У межах даного дослідження для оцінювання впливу випадкових складових похибок прийнято моделі випадкового білого шуму та повільно змінної складової дрейфу

(нестабільності нуля) гіроскопів і акселерометрів. Кількісні значення характеристик шумів (табл. 3.1) прийнято за технічною документацією IBM тактичного класу, що використовується у складі ІНС «Inertial Labs» (INS-B) [106, 119].

Таблиця 3.1 – Характеристики випадкових похибок сенсорів IBM (INS-B)

Гіроскопи	
Нестабільність нуля при запуску (BI_{ω} , $\tau_{\omega}=1000$ сек)	$4,85 \times 10^{-6}$ рад/с
Кутове випадкове блукання (ARW)	$5,81 \times 10^{-5}$ рад/ $\sqrt{с}$
Акселерометри	
Нестабільність нуля при запуску (BI_a , $\tau_a=100$ сек)	$4,903 \times 10^{-5}$ м/с ²
Випадкове блукання швидкості (VRW):	$2,5 \times 10^{-4}$ (м/с ²)/ $\sqrt{Гц}$

3.4.1 Моделювання випадкових завад у сигналах інерційних сенсорів

Моделювання сигналів інерційних сенсорів з урахуванням випадкових завад виконано у середовищі MATLAB за допомогою стандартного інструмента симуляції інерційних сенсорів [120], що дає змогу окремо задавати спектральну щільність шуму та параметри нестабільності нуля для кожної осі.

На рис. 3.9 наведено результати моделювання, що характеризують змінювання у часі трьох проекцій кутової швидкості (ω_x , ω_y , ω_z), отриманих від гіроскопів з урахуванням шумів, властивих реальним сенсорам, характеристики яких наведено в табл. 3.1. Порівняльний аналіз наведених результатів з графіками для еталонних сигналів на рис. 3.7 показує, що корисний сигнал низькочастотних коливань, що відповідає еталонним значенням, суттєво спотворюється впливом випадкових завад.

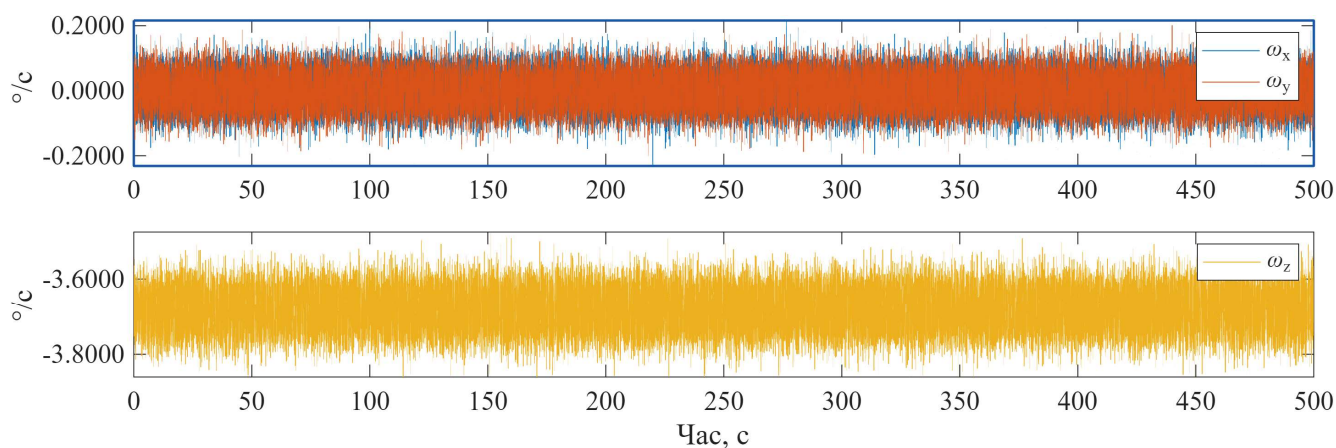


Рис. 3.9. Результати моделювання сигналів гіроскопів з урахуванням випадкових завад

На рис. 3.10 наведено результати моделювання, що характеризують змінювання у часі трьох проекцій прискорення з урахуванням шумів, властивих реальним акселерометрам, характеристики яких наведено в табл. 3.1.

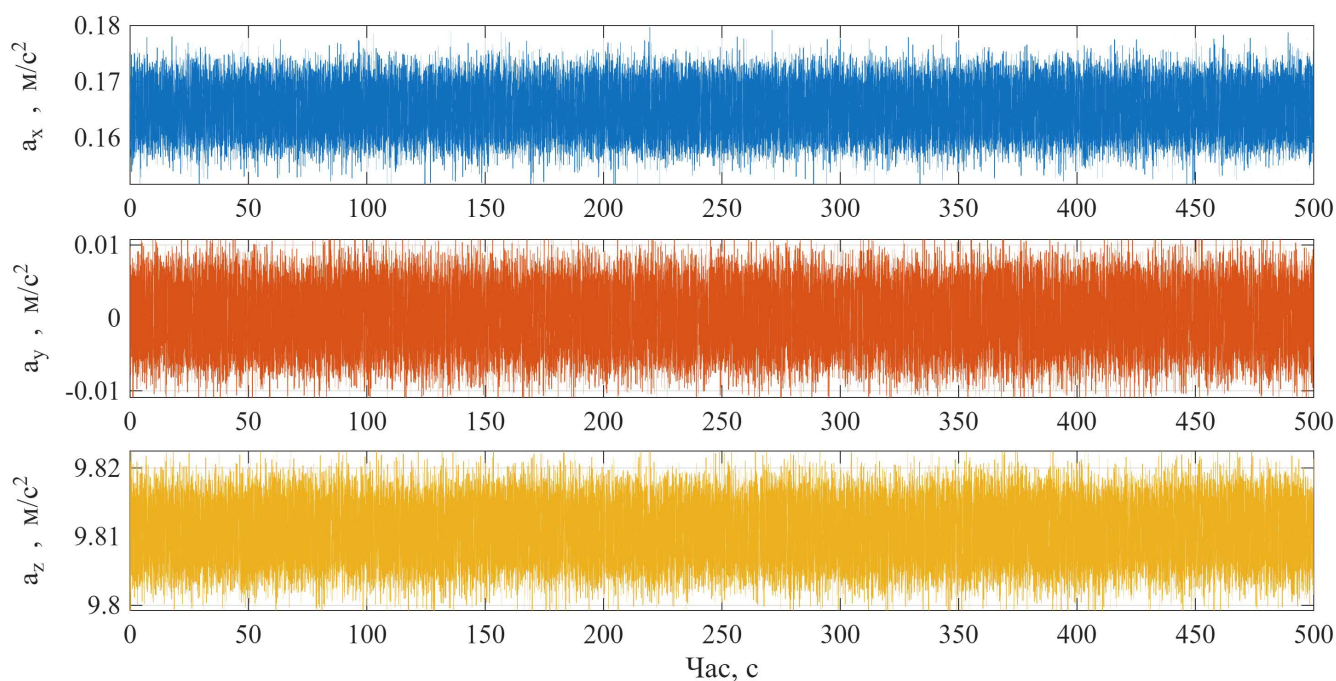


Рис. 3.10. Результати моделювання сигналів акселерометрів з урахуванням випадкових завад

З наведених на рис. 3.10 результатів видно, що порівняно з графіками для еталонних сигналів на рис. 3.8 шум повністю спотворює основну форму сигналів акселерометрів.

Наявність випадкових завад в сигналах сенсорів ІВМ буде негативно впливати на визначення за отриманими сигналами навігаційних параметрів та координат місцеположення АБПА при його коловому русі, призводити до накопичення похибок ІНС і, як наслідок, до похибок відображення інформації в системі візуалізації.

3.4.2 Аналітичне оцінювання накопичуваних похибок автономної ІНС

Для попереднього оцінювання порядку похибок, що накопичуються у автономному режимі, використано відомі аналітичні співвідношення для моделей білого шуму та дрейфу нуля сенсорів [121]. Вони дозволяють кількісно обґрунтувати очікувану точність визначення кутів орієнтації, швидкості та координат АБПА без зовнішньої корекції та коректність налаштувань моделі шумів при подальшому моделюванні роботи ІНС.

Оцінка похибки орієнтації θ_{err} , що накопичується під дією випадкових завад гіроскопів, може бути записана у вигляді:

$$\theta_{\text{err}} = BI_{\omega}t + ARW \cdot \sqrt{t} . \quad (3.18)$$

Значення ARW характеризує накопичення кутової помилки при інтегруванні випадкового білого шуму гіроскопа. Модель кутової похибки враховує ARW та нестабільність нуля гіроскопа BI_{ω} . Розрахунок за виразом (3.18) показав, що за 500с очікувана похибка орієнтації θ_{err} становить $0,21^{\circ}$.

Оцінка похибки визначення швидкості V_{err} з урахуванням шумів акселерометрів та впливу похибки орієнтації визначається за виразом:

$$V_{\text{err}} = BI_a t + VRW \cdot \sqrt{t} + g \left(\frac{1}{2} BI_{\omega} t^2 + \frac{2}{3} ARW \cdot t^{3/2} \right) \quad (3.19)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Випадкове блукання швидкості VRW характеризує накопичення помилки визначення швидкості при інтегруванні білого шуму акселерометра. Модель похибки визначення швидкості враховує VRW, нестабільність нуля акселерометра BI_{accel} та похибки орієнтації. Очікувана похибка визначення швидкості V_{err} за виразом (3.19) становить 10,2 м/с.

Оцінка похибки визначення координат (похибки положення) P_{err} у автономному режимі при двократному інтегруванні спотворених шумом прискорень характеризує відстань, на яку відхилиться рухомий об'єкт від очікуваної точки місця положення за заданий час автономної роботи. Модель похибки враховує наведені в табл. 3.1 характеристики гіроскопа та акселерометра відповідно до виразу:

$$P_{\text{err}} = \frac{1}{2} B I_a t^2 + \frac{2}{3} \text{VRW} \cdot t^{3/2} + g \left(\frac{1}{6} B I_\omega t^3 + \frac{4}{15} \text{ARW} \cdot t^{5/2} \right). \quad (3.20)$$

Розрахунок за виразом (3.20) показав, що очікувана похибка визначення позиції за 500с автономного руху АБПА складає 1850 м.

Таким чином, внаслідок аналітичного оцінювання накопичуваних похибок ІНС, сигнали сенсорів якої спотворені випадковими завадами, встановлено, що похибка орієнтації становить близько $0,2^\circ$, похибка визначення швидкості 10 м/с, а похибка положення 1850 м. Отримані оцінки підтверджують необхідність комплексування ІНС із зовнішніми корекційними сенсорами або застосування методів фільтрації, спрямованих на обмеження дрейфу навігаційного розв'язку.

Для контролю коректності формування спотворених випадковими завадами сигналів сенсорів ІВМ виконано порівняння середньоквадратичного відхилення (СКВ), обчисленого за реалізаціями, отриманими в результаті моделювання, та аналітичних оцінок, отриманих за параметрами шуму у п. 3.4.2.

Значення СКВ визначались за виразами:

$$\sigma_\omega = \text{ARW} \sqrt{f_s}; \quad \sigma_a = \text{VRW} \sqrt{f_s}, \quad (3.21)$$

де f_s – частота дискретизації даних ІВМ.

Обчислення за виразами (3.21) показали, що розбіжності між аналітичними та експериментальними оцінками є малими (біля 0,5% для гіроскопів і 0,1% для акселерометрів) та зумовлені скінченністю вибірки даних. Таким чином, параметри ARW/VRW вірно застосовуються у сформованих спотворених випадковими завадами сигналах сенсорів [119].

3.5 Імітаційне моделювання роботи ІНС при коловому русі АБПА

Для дослідження впливу випадкових завад в ІВМ на похибки визначення кутів орієнтації, швидкості та місцеположення АБПА при русі по коловій траєкторії в автономному режимі ІНС проведемо імітаційне моделювання роботи ІНС. Для моделювання приймаємо, що осі пов'язаної з АБПА системи координат співпадають з осями ІНС. Моделювання виконується для двох наборів інерціальних даних, розглянутих у п. 3.3 та п. 3.4: еталонних сигналів сенсорів ІВМ [88]; сигналів, спотворених випадковими завадами відповідно до наведених в табл. 3.1 характеристик сенсорів [119].

Вихідними даними моделі є початкові умови $\varphi(t_0)$, $\lambda(t_0)$, $h(t_0)$, початкова орієнтація $K(t_0)$, $\theta(t_0)$, $\gamma(t_0)$, параметри колового руху (швидкість V , радіус r), частота дискретизації f_s та параметри шумової моделі сенсорів.

3.5.1 Аналітичні рівняння та алгоритм інерціальної навігації

Орієнтація визначається інтегруванням узагальненого рівняння Пуассона для матриці направляючих косинусів C [31] з описаними у п. 3.3.1 складовими:

$$\dot{C} = C[\omega \times] - [Ug \times]C. \quad (3.22)$$

Підставимо в (3.22) вирази (3.9) і (3.10), отримаємо рівняння орієнтації в розгорнутій матричній формі:

$$\dot{C} = C \begin{bmatrix} 0 & -\omega_y & \omega_z \\ \omega_y & 0 & -\omega_x \\ -\omega_z & \omega_x & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -(\dot{\lambda} + U)\cos(\varphi) & (\dot{\lambda} + U)\sin(\varphi) \\ (\dot{\lambda} + U)\cos(\varphi) & 0 & \dot{\varphi} \\ -(\dot{\lambda} + U)\sin(\varphi) & -\dot{\varphi} & 0 \end{bmatrix} C, \quad (3.23)$$

Швидкість в ГСК обчислюється за сигналами акселерометрів та матрицею орієнтації з врахуванням обертання Землі та гравітаційної моделі [31, 88, 119]:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_E \\ \dot{V}_N \\ \dot{V}_U \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} -\dot{\varphi} \\ \dot{\lambda}\cos(\varphi) \\ \dot{\lambda}\sin(\varphi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix}}_{\text{Відносне прискорення}} - 2 \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ U\cos(\varphi) \\ U\sin(\varphi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix}}_{\text{Коріолісове прискорення}} - \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g(\varphi, h) \end{bmatrix}}_{\text{Уявне прискорення}}, \quad (3.24)$$

де: $V = [V_E \ V_N \ V_U]^T$ – вектор лінійної швидкості об'єкту в географічній системі координат; $\dot{V} = [\dot{V}_E \ \dot{V}_N \ \dot{V}_U]^T$ – вектор прискорення об'єкту в географічній системі координат; $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ – сигнали акселерометрів у проєкціях на осі об'єкту; $g(\varphi, h)$ – гравітаційна модель Землі WGS-84.

Оновлення географічного положення визначаємо за швидкостями змінювання широти, довготи та висоти [31]:

$$\dot{\varphi} = \frac{V_N}{R_N + h}, \quad \dot{\lambda} = \frac{V_E}{(R_E + h) \cos \varphi}, \quad \dot{h} = V_U. \quad (3.25)$$

Використаємо наведені вище рівняння (3.22), (3.24) та (3.25) для визначення орієнтації, швидкості руху та місця положення АБПА за даними гіроскопів і акселерометрів ІВМ інерціальної навігаційної системи. Чисельна реалізація алгоритму інерціальної навігації виконується в дискретній формі з використанням методу прямокутника (методу Ейлера) з кроком $\Delta t = 1/f_s$.

Таким чином отримаємо [119]:

– алгоритм розрахунку матриці орієнтації при інтегруванні рівняння (3.22):

$$C(k+1) = C(k) + \Delta t [C(k)[\omega \times] - [Ug \times]C(k)]; \quad (3.26)$$

– алгоритм розрахунку швидкості при інтегруванні рівняння (3.24):

$$V(k+1) = V(k) + \Delta t \cdot \left\langle C(k+1)a(k+1) - \begin{bmatrix} -\dot{\varphi} \\ \dot{\lambda} \cos(\varphi) \\ \dot{\lambda} \sin(\varphi) \end{bmatrix} \times V(k) - 2 \begin{bmatrix} 0 \\ U \cos(\varphi) \\ U \sin(\varphi) \end{bmatrix} \times V(k) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g(\varphi, h) \end{bmatrix} \right\rangle; \quad (3.27)$$

– алгоритм розрахунку положення при інтегруванні рівнянь (3.25):

$$\begin{aligned} \varphi(k+1) &= \varphi(k) + \Delta t \cdot \frac{V_N(k)}{R_N + h(k)}, \\ \lambda(k+1) &= \lambda(k) + \Delta t \cdot \frac{V_E(k)}{(R_E + h(k)) \cos \varphi(k)}, \\ h(k+1) &= h(k) - \Delta t \cdot V_U(k). \end{aligned} \quad (3.28)$$

За наведеними алгоритмами інерціальної навігації (3.26)-(3.28) проведено моделювання роботи ІНС при коловому русі АБПА з використанням результатів мо-

делювання сигналів інерційних сенсорів (гіроскопів та акселерометрів). Моделювання проведено як для еталонних сигналів сенсорів, так і для сигналів, спотворених випадковими завадами.

3.5.2 Аналіз результатів моделювання роботи ІНС

Отримані в результаті моделювання роботи ІНС залежності параметрів орієнтації, складових швидкості руху АБПА та параметрів місця положення АБПА порівнювались з отриманими в п.3.2 еталонними значеннями широти, довготи, швидкості та кута курсу при моделюванні колового руху АБПА із заданою швидкістю протягом часу 500с. В результаті порівняння встановлено залежності накопичених похибок параметрів руху та параметрів траєкторії [119].

На рис. 3.11 і рис.3.12 наведено графіки, що ілюструють динаміку накопичення похибок орієнтації при моделюванні роботи ІНС протягом встановленого часу 500с за еталонними сигналами сенсорів IBM (рис. 3.11) та сигналами з випадковими завадами (рис. 3.12).

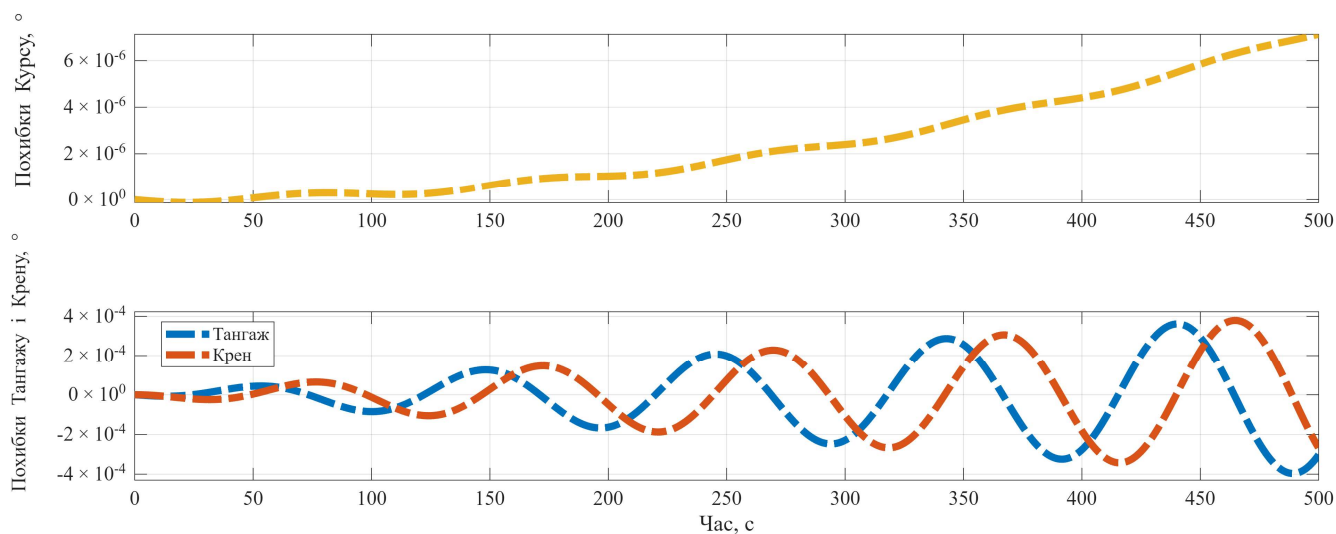


Рис. 3.11. Змінювання похибок орієнтації (кутів курсу, тангажу, крену) при використанні в алгоритмі ІНС еталонних сигналів сенсорів [119]

Як видно з наведених на рис. 3.11 графіків, для еталонних сигналів сенсорів похибка визначення кута курсу демонструє повільну монотонну зміну, а похибки визначення кутів тангажу і крену мають коливальний характер, амплітуда яких зростає до значень $\pm 0,0004^\circ$ [119].

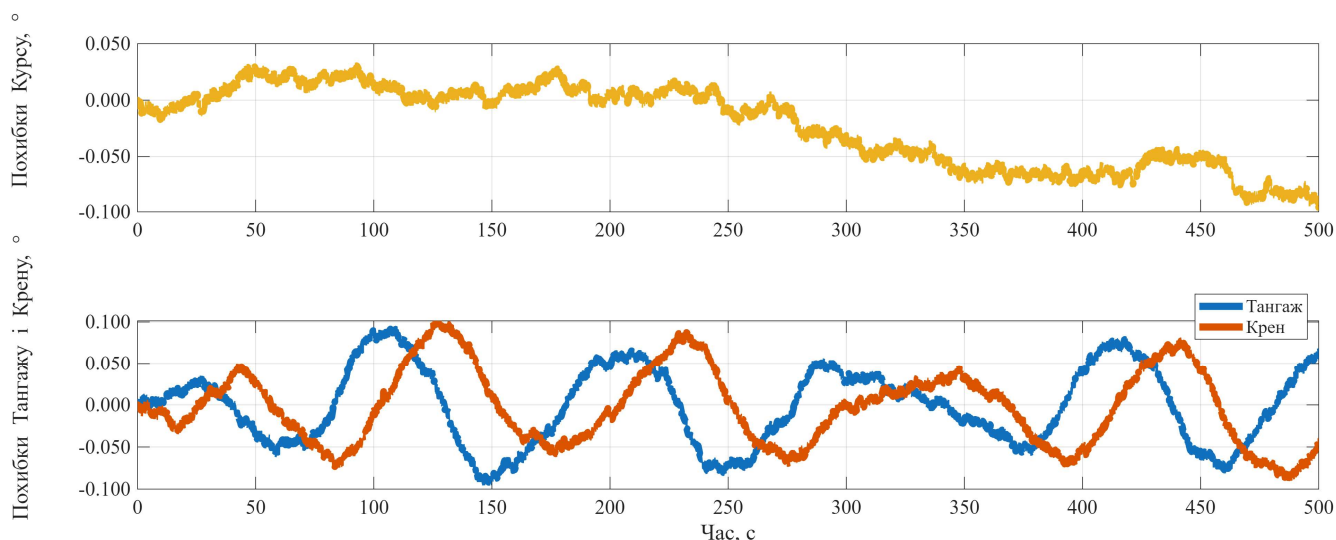


Рис. 3.12. Змінювання похибок орієнтації (кутів курсу, тангажу, крену) при використанні в алгоритмі ІНС сигналів сенсорів з випадковими завадами

При використанні в алгоритмі ІНС сигналів сенсорів з випадковими завадами, як показано на рис. 3.12, відбувається значне збільшення чисельних значень похибок: похибка визначення кута курсу змінюється в межах від $+0,05^\circ$ до $-0,01^\circ$; похибки визначення кутів тангажу та крену – в межах до $\pm 0,1^\circ$. Спостерігається зростання похибок орієнтації з часом, що характерно для автономного режиму роботи ІНС [119].

На рис. 3.13 і рис. 3.14 наведено графіки, що ілюструють динаміку накопичених похибок визначення швидкості при моделюванні роботи ІНС протягом встановленого часу 500с.

Графіки на рисунку 3.13 показують змінювання у часі похибок визначення складових швидкості руху АБПА вздовж східного (V_E), північного (V_N) та вертикального (V_U) напрямків при використанні в алгоритмі ІНС еталонних сигналів сенсорів ІВМ. Похибки визначення складових V_E та V_N зростають поступово відповідно до накопичення чисельної похибки при інтегруванні прискорень. Похибка визначення швидкості руху у вертикальному напрямку має коливальний характер зі збільшенням з часом амплітуди коливань та помітним трендом, але амплітудні значення похибки за час руху 500с є незначними (до $0,00003$ м/с) [119].

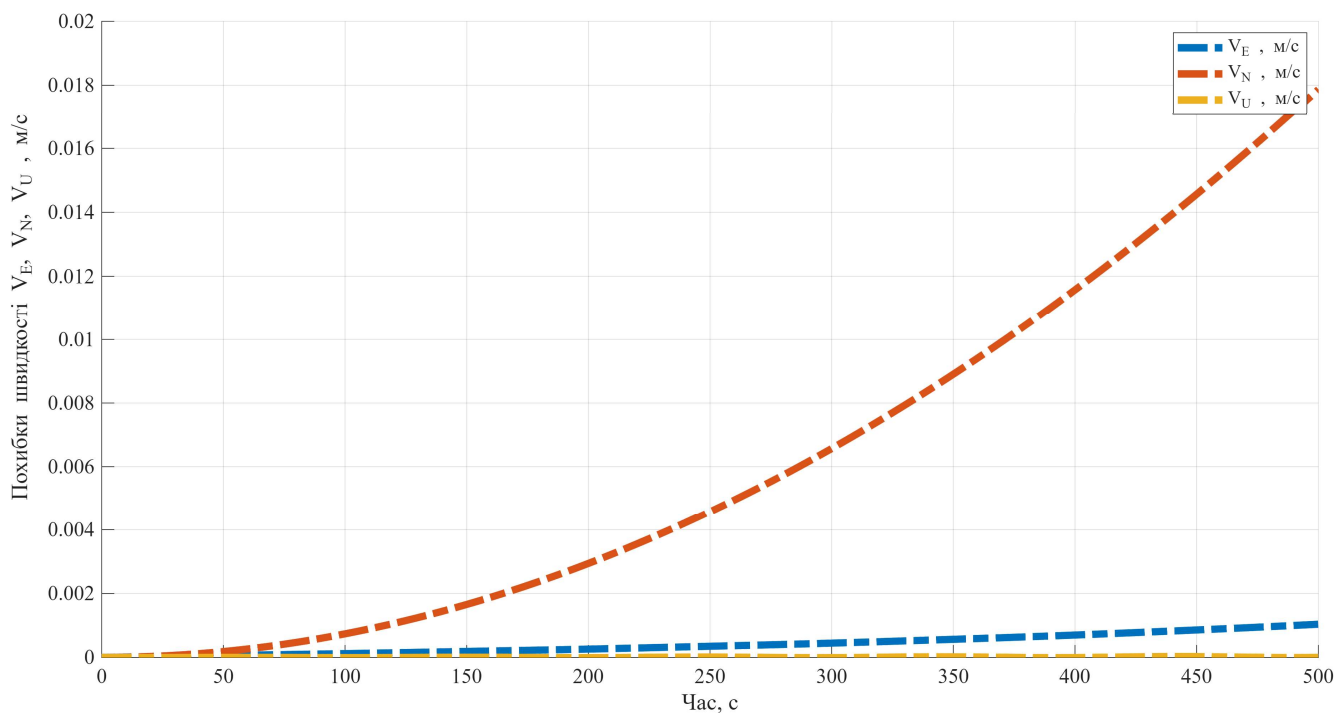


Рис. 3.13. Змінювання похибок визначення складових швидкості руху при використанні в алгоритмі ІНС еталонних сигналів сенсорів

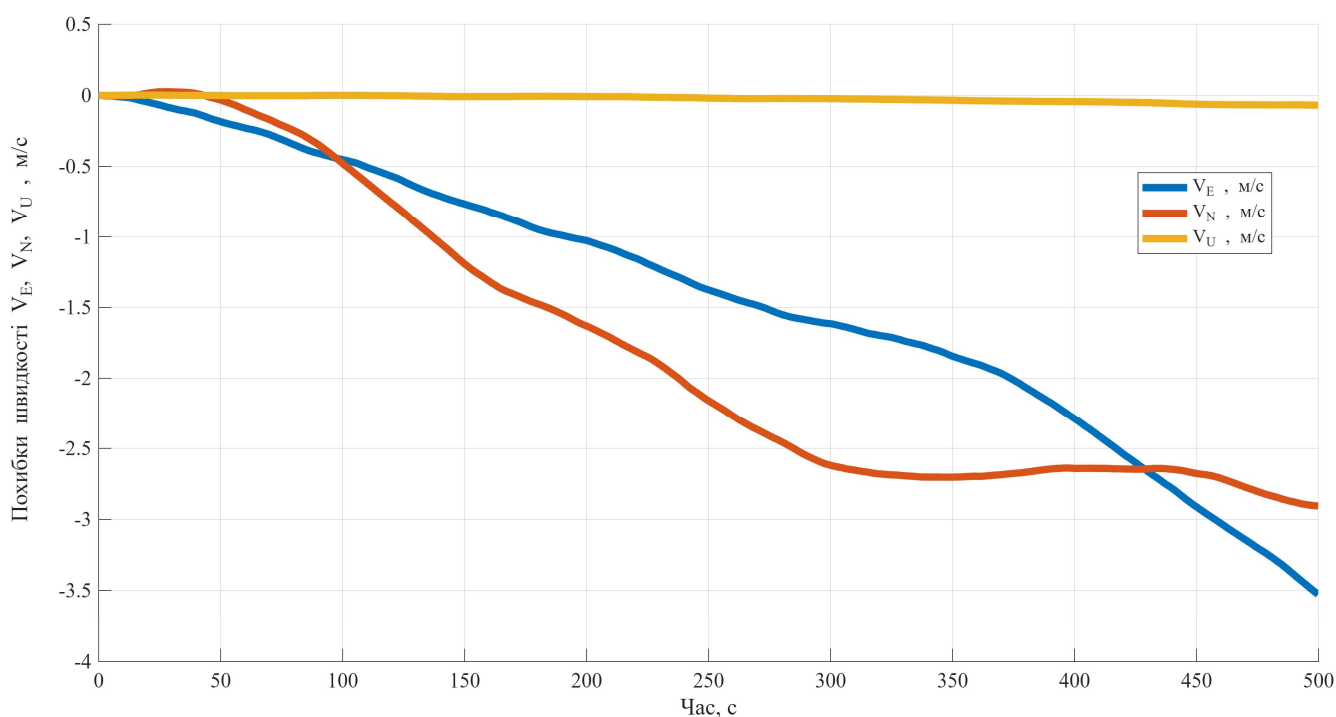


Рис. 3.14. Змінювання похибок визначення складових швидкості руху при використанні в алгоритмі ІНС сигналів сенсорів з випадковими завадами [119]

При використанні в алгоритмі ІНС сигналів сенсорів ІВМ з випадковими завадами, як видно з результатів на рис. 3.14, спостерігається значне зростання похибок: похибки визначення складових V_E та V_N за час руху 500с досягають значень до

3–4 м/с при коловому русі АБПА зі сталою швидкістю $V = 2,57$ м/с; похибка визначення складової V_U за час руху досягає значення 0,06 м/с у той час, як рух АБПА розглядається лише в площині горизонту географічної системи координат [119].

Графіки, що ілюструють динаміку накопичених похибок визначення координат місцеположення АБПА при моделюванні роботи ІНС протягом встановленого часу 500с наведено на рис. 3.15 та рис. 3.16.

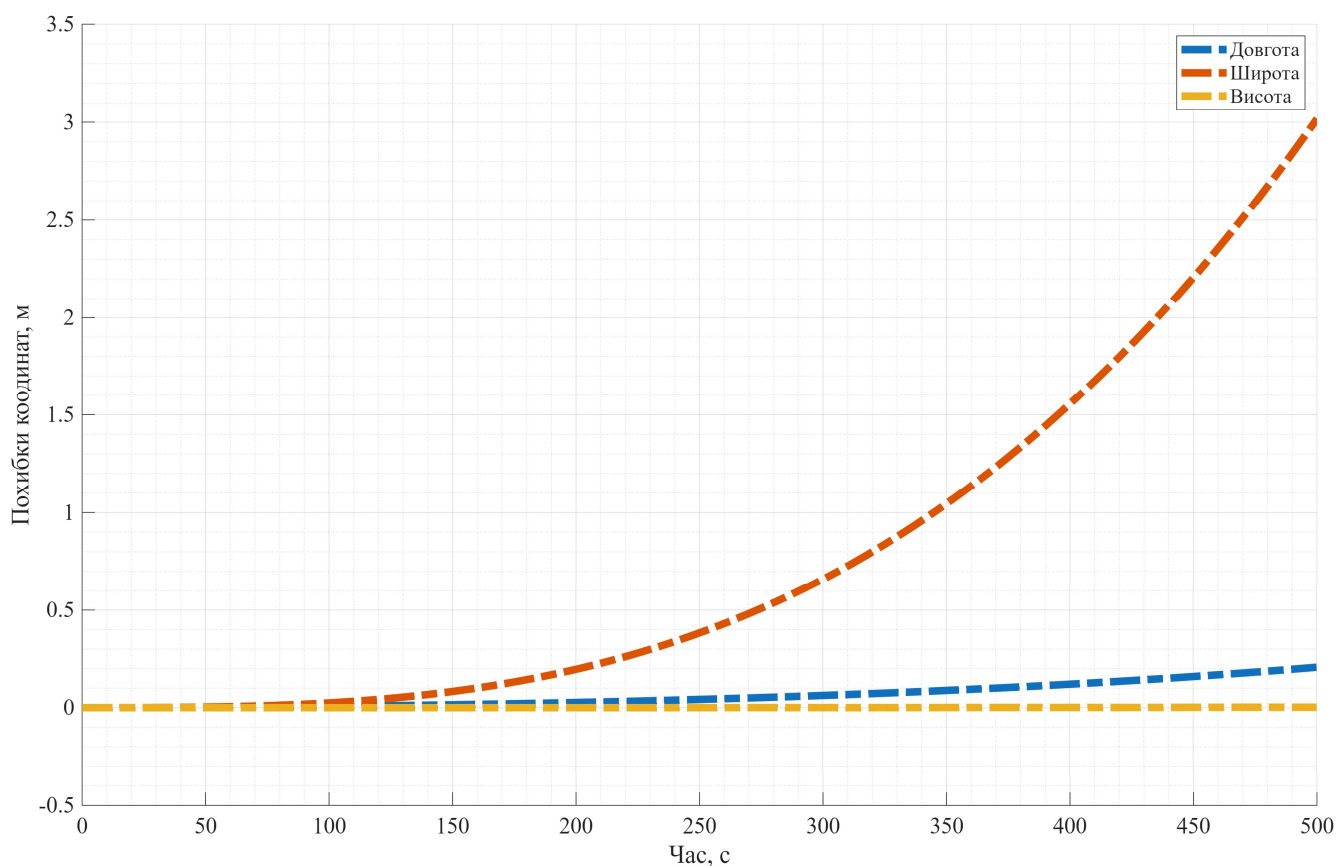


Рис. 3.15. Змінювання похибок визначення координат АБПА при використанні в алгоритмі ІНС еталонних сигналів сенсорів

Як видно з наведених на рис. 3.15 результатів, при використанні еталонних сигналів сенсорів по завершенні часу моделювання 500с похибка визначення широти досягає значення 3 м, а похибки визначення довготи і висоти не перевищують 0,2 м [119].

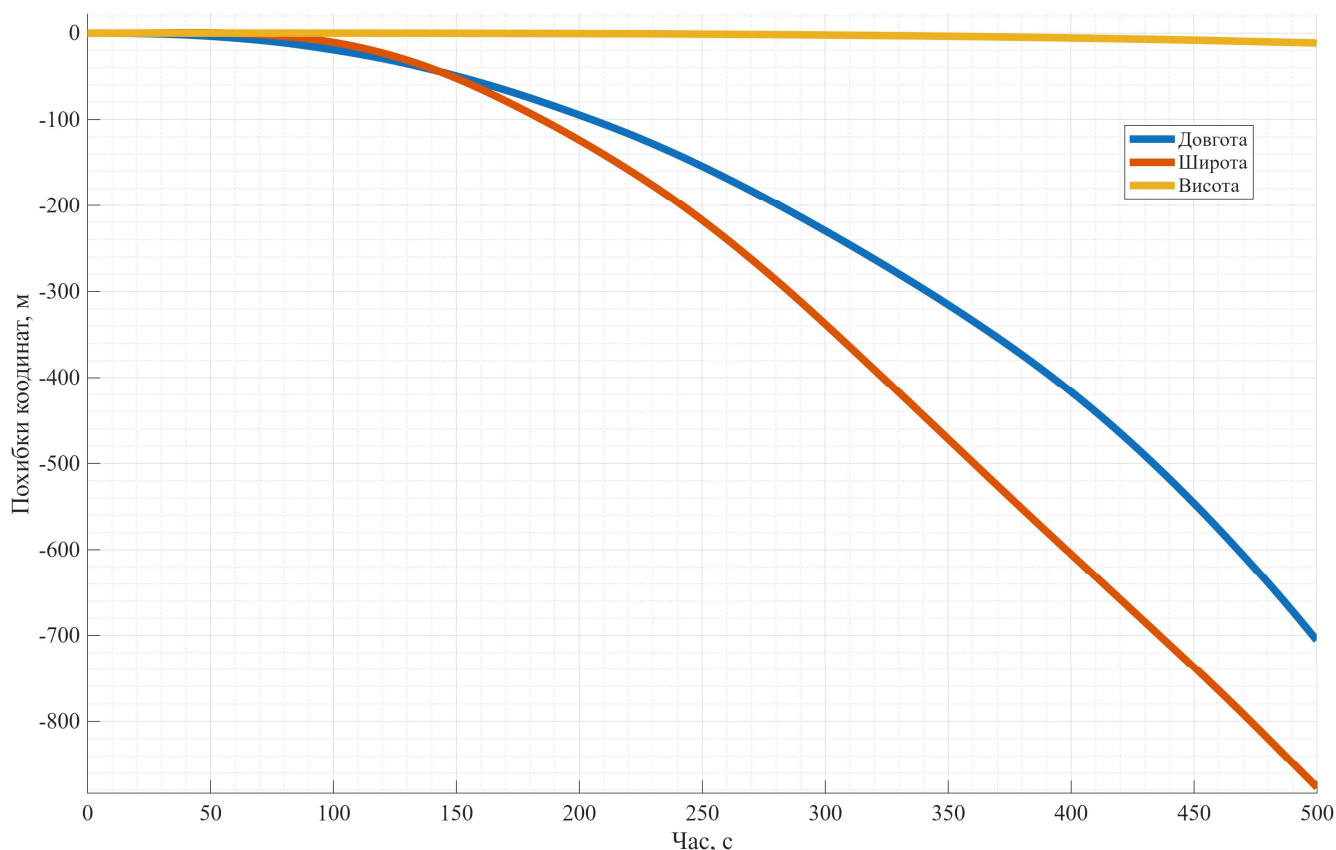


Рис. 3.16. Змінювання похибок визначення координат АБПА при використанні в алгоритмі ІНС сигналів сенсорів з випадковими завадами

При використанні в алгоритмі ІНС сигналів сенсорів з випадковими завадами похибка визначення широти досягає значення 900 м, похибка визначення довготи – 700 м, а похибка визначення висоти – 10 м.

Таким чином, за результатами моделювання встановлено, що за відсутності зовнішньої корекції випадкові завади в сигналах сенсорів призводять до прогресуючого зростання похибок визначення кутів орієнтації та швидкості, що, у свою чергу, зумовлює систематичне зміщення розрахованих координат місцеположення АБПА відносно заданої колової траєкторії. У випадку еталонних сигналів сенсорів похибки визначення параметрів руху ІНС мають малі значення, які обумовлені чисельним інтегруванням. Імітаційне моделювання та аналітичний розрахунок для оцінки накопичення похибок ІНС показують узгодженість отриманих результаті [119].

Результати проведеного дослідження свідчать про необхідність врахування наявності випадкових похибок сенсорів в інерціальних даних при проєктуванні на-

вігаційних комплексів АБПА та про необхідність застосування методів компенсації похибок ІНС як для забезпечення ефективного виконання АБПА заданих маневрів, так і для забезпечення коректного відображення місцеположення та руху АБПА в системі візуалізації.

3.6 Аналіз похибок передачі та візуалізації параметрів руху АБПА

На точність відображення параметрів руху АБПА системою візуалізації у складі інтегрованого навігаційного комплексу впливають не лише накопичені похибки ІНС, але й характеристики каналу передавання телеметрії та особливості пакетів даних, що передаються. Зокрема, як зазначалось у Розділі 1, для гідроакустичного зв'язку характерні мала пропускна здатність і значна часова затримка, що призводить до відставання відображеної навігаційної інформації від фактичного руху апарата. Це відставання зростає зі збільшенням швидкості руху та ускладнює операторський моніторинг у реальному часі, тому потребує кількісного оцінювання й урахування під час проєктування системи візуалізації [98, 99, 122].

3.6.1 Модель часової затримки передавання даних

Швидкість поширення звуку у воді становить приблизно 1500 м/с, що еквівалентно затримці близько 0,67 с на кожний кілометр проходження сигналу. Наприклад, на відстані 5 км в одному напрямку сигнал проходить із затримкою 3,3 с, а часова затримка обміну «запит–відповідь» складає 6 – 7 с [56].

Сумарну часову затримку передавання одного пакета можна оцінити як суму затримки поширення та часу передавання бітів пакета [99, 122]:

$$\Delta t = \frac{D}{v_s} + \frac{L}{R}, \quad (3.29)$$

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

Розрахований за виразом (3.29) час затримки Δt для системи візуалізації даних, отриманих на основі описаних вище (п.3.1) параметрів руху, відомої довжини пакету (1096 біт), що приймається в системі візуалізації «OPVT2HR» від ІНС фірми Inertial Labs, та віддаленості АБПА на відстані 500 м становить близько $\Delta t = 1,43$ с.

Виконаємо кількісну оцінку похибок передачі та візуалізації параметрів руху АБПА за коловою траєкторією в горизонтальній площині зі сталою швидкістю та нульовими кутами крену і тангажу. Така траєкторія руху є характерною для маневрених режимів, де вплив затримки на відображення зростає.

3.6.2 Аналітичні залежності похибок передачі та візуалізації

В системі візуалізації будуть відображатись дані, затримані на величину Δt , які відповідають моменту часу t_D :

$$t_D = t - \Delta t, \quad (3.30)$$

3.6.3 Аналітичні залежності похибок передачі та візуалізації

де t – дійсне значення часу.

Похибку передачі та візуалізації певного параметра визначаємо як різницю між затриманим (відображеним в системі) і дійсним значенням значенням параметра, який передається [122].

Похибка відображення поточного значення кута курсу.

Для прийнятих параметрів колового руху АБПА швидкість зміни курсу є сталою відповідно до (3.1), тоді похибка передачі та відображення курсу через затримку матиме лінійний характер:

$$\begin{aligned} K(t_D) &= \dot{K} \cdot (t - \Delta t) \\ \Delta K &= K(t_D) - K(t) = \dot{K} \cdot (t - \Delta t) - \dot{K} \cdot t = -\dot{K} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (3.31)$$

Це означає, що за фіксованого значення часу затримки Δt похибка ΔK прямо пропорційна швидкості зміни курсу.

Похибка передачі та відображення складових горизонтальної швидкості.

Похибки передачі та відображення проекцій швидкості визначаємо з виразу (3.2) як різницю їх значень в моменти часу t і t_D

$$\begin{aligned}\Delta V_E &= V \sin(K(t_D)) - V \sin(K(t)) \\ \Delta V_N &= V \cos(K(t_D)) - V \cos(K(t))\end{aligned}\quad (3.32)$$

а вираз для визначення модуля похибки ΔV передачі горизонтальної швидкості після нескладних перетворень виразів (3.32) отримаємо у вигляді:

$$\Delta V = 2V \cdot \left| \sin \frac{-\dot{K} \cdot \Delta t}{2} \right|. \quad (3.33)$$

Це означає, що за фіксованого значення часу затримки Δt похибка ΔV змінюється нелінійно. Для малих $(\dot{K} \Delta t)$ справедлива наближена оцінка $\Delta V \approx V \dot{K} \Delta t$, що також демонструє зростання похибки зі збільшенням швидкості руху V та часу затримки Δt , або швидкості зміни курсу, що характеризує більшу маневреність АБПА.

Похибка передачі та відображення місця положення АБПА на площині руху.

На основі виразу (3.7) похибки ΔX_E і ΔY_N передачі та відображення координат місця положення АБПА на площині руху визначаємо як:

$$\begin{aligned}\Delta X_E &= X_E(t - \Delta t) - X_E(t) \\ \Delta X_N &= X_N(t - \Delta t) - X_N(t)\end{aligned}$$

а модуль похибки

$$\Delta_{EN} = \sqrt{\Delta X_E^2 + \Delta X_N^2} \quad (3.34)$$

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

Саме величина Δ_{EN} є найбільш наочною для оператора, оскільки безпосередньо інтерпретується як «просторове відставання» мітки АБПА на карті/траєкторії.

За результатами імітаційного моделювання колового руху АБПА, еталонних сигналів сенсорів ІВМ (без врахування випадкових завад) та з використанням залежностей (3.31), (3.33) та (3.34) проведено моделювання зумовлених затримкою похибок передачі та візуалізації даних про поточні значення кута курсу, горизонтальної швидкості та положення АБПА на площині руху.

Отримані результати наведено на рис. 3.17 у вигляді графіків залежності відповідних похибок від часу затримки Δt , розрахованих для кількох значень сталої швидкості руху апарату за коловою траєкторією [122].

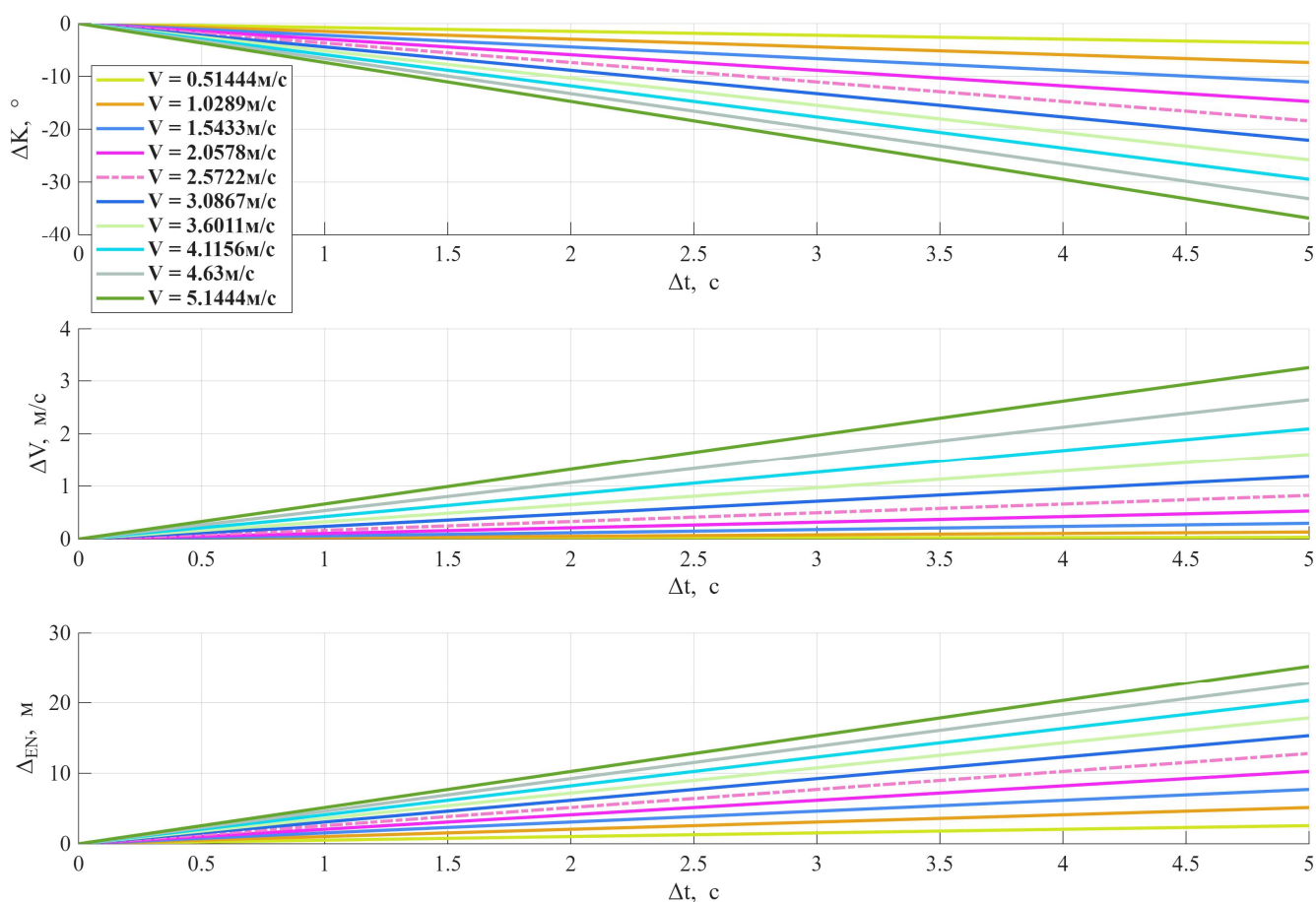


Рис. 3.17. Графіки залежностей похибок передачі та візуалізації кута курсу ΔK , горизонтальної швидкості ΔV та положення апарату на площині руху Δ_{EN}

Як видно з наведених на рис. 3.17 результатів, залежності усіх розглянутих похибок передачі та візуалізації даних в межах часової затримки до 5с для розглянутого діапазону значень швидкості руху мають лінійний характер. Для розміщення АБПА на відстані 500м до судна-носія і розглянутих вище налаштувань протоколів передачі даних з ІНС фірми Inertial Labs часова затримка складає $\Delta t = 1,43$ с. Тоді, на основі отриманих результатів визначаємо, що при русі АБПА по коловій траєкторії зі швидкістю $V = 2,5722$ м/с (5 вуз.), значення якої в цьому розділі використовувалось для моделювання руху АБПА та імітаційного моделювання роботи ІНС, система візуалізації буде відображати параметри руху з такими похибками: $\Delta K = -5,15^\circ$; $\Delta V = 0,23$ м/с; $\Delta_{EN} = 3,59$ м.

Отримані залежності та результати моделювання показують, під час розробки інтегрованого навігаційного комплексу та операторського інтерфейсу необхідно враховувати похибки передачі разом із накопиченими похибками ІНС, а також передбачати заходи для їх зменшення (скорочення довжини пакетів, підвищення швидкості обміну, прогнозування стану на час Δt у візуалізації тощо) [122].

Висновки до Розділу 3

1. Виконано математичне моделювання руху АБПА зі сталою швидкістю за складною (коловою) траєкторією в горизонтальній площині. Отримано аналітичні залежності та сформовано еталонні (розрахункові) часові реалізації параметрів руху АБПА, які використовуються як базові значення для подальшої перевірки працездатності алгоритмів навігації та оцінювання похибок: координат місцеположення, проекцій швидкості та лінійного прискорення у географічній системі координат, кута курсу і кутової швидкості його зміни.

2. На основі розрахованих еталонних параметрів руху та перетворень між географічною і пов'язаною з апаратом системами координат сформовано еталонні сигнали сенсорів (гіроскопів та акселерометрів) інерційного вимірювального модуля, що відповідають заданому руху АБПА і за якими визначаються параметри руху АБПА в інерціальній навігаційній системі.

3. Проведено моделювання сигналів сенсорів з урахуванням випадкових завад, характеристики яких відповідають технічним умовам сенсорів тактичного класу, що використовується у складі ІНС «Inertial Labs». В результаті встановлено, що випадкові завади суттєво спотворюють корисні сигнали сенсорів, які відповідають еталонним значенням, що негативно впливатиме на визначення за отриманими сигналами навігаційних параметрів та координат місцеположення АБПА при його коловому русі.

4. Для обґрунтування очікуваної точності визначення кутів орієнтації, швидкості та координат АБПА без зовнішньої корекції та коректності налаштувань моделі завад при подальшому моделюванні роботи навігаційної системи проведено

аналітичне оцінювання накопичуваних похибок ІНС при коловому русі АБПА. В результаті встановлено, що при спотворенні сигналів сенсорів випадковими завадами що похибка орієнтації становить близько $0,2^\circ$, похибка визначення швидкості становить 10 м/с, а похибка положення складає 1850 м.

5. Проведено імітаційне моделювання роботи ІНС та досліджено вплив випадкових завад сенсорів на похибки визначення кутів орієнтації, швидкості та місцеположення АБПА при русі по коловій траєкторії в автономному режимі ІНС. В результаті встановлено, що для еталонних сигналів сенсорів похибки визначення параметрів руху ІНС мають малі значення, які обумовлені чисельним інтегруванням. Для сигналів, спотворених випадковими завадами встановлено залежності накопичених похибок параметрів руху та параметрів траєкторії:

- значне збільшення чисельних значень похибок визначення кутів орієнтації: для кута курсу – в межах від $+0,05^\circ$ до $-0,01^\circ$; для кутів тангажу та крену – в межах до $\pm 0,1^\circ$;

- похибки визначення складових швидкості V_E та V_N за час руху 500с досягають значень до 3–4 м/с при коловому русі АБПА зі сталою швидкістю $V = 2,57$ м/с; похибка визначення складової V_U за час руху досягає значення 0,06 м/с у той час, як рух АБПА розглядається лише в площині горизонту географічної системи координат;

- похибки визначення координат місцеположення АБПА: широти – до 900 м; довготи – 700 м, висоти – 10 м.

6. Прогресуюче зростання похибок визначення кутів орієнтації, швидкості систематичне зміщення розрахованих координат місцеположення АБПА відносно заданої колової траєкторії свідчить про необхідність застосування методів компенсування похибок ІНС як для забезпечення ефективного виконання АБПА заданих маневрів, так і для забезпечення коректного відображення місцеположення та руху АБПА в системі візуалізації

7. Для розглянутого колового руху АБПА проведено аналіз похибок передачі та відображення навігаційних параметрів та місцеположення апарату в системі візуалізації. Встановлено, що залежності похибок передачі та візуалізації даних від

значення часової затримки для різних значень швидкості руху мають лінійний характер. Визначено, що для швидкості АБПА 2,57 м/с (5 вуз.), яка використовувалась для моделювання руху АБПА та імітаційного моделювання роботи ІНС, система візуалізації буде відображати параметри руху з похибкою визначення кута курсу $5,15^\circ$, похибкою визначення горизонтальної швидкості 0,23 м/с та похибкою визначення місцеположення 3,59 м. Отримані результати показують необхідність враховувати похибки передачі разом із накопиченими похибками ІНС, а також передбачати заходи для їх зменшення.

РОЗДІЛ 4

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ШЛЯХОМ ГЛИБОКОГО КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Проведене у Розділі 3 математичне та комп'ютерне моделювання роботи інерційних сенсорів та ІНС, як основи модуля визначення орієнтації та параметрів руху інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, показало, що для забезпечення ефективного виконання заданих маневрів та коректного відображення місцеположення і навігаційних параметрів АБПА в системі візуалізації необхідно компенсувати похибки, що накопичуються внаслідок недосконалості навігаційного алгоритму та впливу випадкових завад у сигналах сенсорів.

У цьому розділі на основі математичного та комп'ютерного моделювання проводиться дослідження можливості забезпечення точності визначення навігаційних параметрів шляхом глибокого комплексування ІНС та системи довгої базової лінії. Для підтвердження результатів теоретичних досліджень та моделювання виконується фізичне моделювання комплексної системи ІНС/ДБЛ, в рамках якого також перевірено працездатність розробленої системи візуалізації руху АБПА.

4.1 Модель похибок інерціальної навігаційної системи

Похибки ІНС поділяються на три основні категорії [31]:

- Інструментальні: залишкові некомпенсовані зміщення нуля (bias), масштабні коефіцієнти та не ортогональність осей чутливих елементів (акселерометрів та гіроскопів).
- Методичні: виникають через недосконалість алгоритмів чисельного інтегрування та дискретність обробки сигналів.

– Початкові: похибки виставки (початкової орієнтації) та початкового визначення координат/швидкості.

Для кількісного оцінювання та подальшої компенсації цих відхилень у ІНС необхідно перейти від фізичної природи похибок до їх формалізованого математичного опису. З цією метою будується лінеаризована модель похибок у просторі станів. Вона дозволяє пов'язати інструментальні та початкові недоліки сенсорів із їхнім безпосереднім впливом на навігаційні параметри.

Рівняння похибок ІНС будуються для трьох основних груп параметрів: кутів орієнтації $(\Delta K, \Delta \theta, \Delta \gamma)$, складових швидкості $(\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_U)$, координат місцеположення $(\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h)$, а також похибок ІВМ, які розглядаються як зміщення нулів гіроскопів $(b_{\omega_x}, b_{\omega_y}, b_{\omega_z})$ і акселерометрів $(b_{a_x}, b_{a_y}, b_{a_z})$ [31].

Похибки визначення кутів орієнтації ІНС:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\gamma} \\ \Delta \dot{K} \end{bmatrix} &= -C \begin{bmatrix} b_{\omega_x} + \eta_{\omega_x}(t) \\ b_{\omega_y} + \eta_{\omega_y}(t) \\ b_{\omega_z} + \eta_{\omega_z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta \dot{\varphi} \\ \Delta \dot{\lambda} \cos \varphi - (\dot{\lambda} + U) \Delta \varphi \sin \varphi \\ \Delta \dot{\lambda} \sin \varphi + (\dot{\lambda} + U) \Delta \varphi \cos \varphi \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} \Delta \gamma \left(\frac{V_E}{R} + U \cos \varphi \right) \operatorname{tg} \varphi - \Delta K \left(\frac{V_E}{R} + U \cos \varphi \right) \\ -\Delta \theta \left(\frac{V_E}{R} + U \cos \varphi \right) \operatorname{tg} \varphi - \Delta K \frac{V_N}{R} \\ \Delta \theta \left(\frac{V_E}{R} + U \cos \varphi \right) + \Delta \gamma \frac{V_N}{R} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{V_E}{R \cos \varphi}, \quad \Omega = \dot{\lambda} + U; \quad \dot{\varphi} = \frac{V_N}{R}.$$

Похибки визначення складових швидкості ІНС:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_E \\ \Delta \dot{V}_N \\ \Delta \dot{V}_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \Delta K & -\Delta \gamma \\ -\Delta K & 0 & \Delta \theta \\ \Delta \gamma & -\Delta \theta & 0 \end{bmatrix} C \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} b_{a_x} + \eta_{a_x}(t) \\ b_{a_y} + \eta_{a_y}(t) \\ b_{a_z} + \eta_{a_z}(t) \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Похибки визначення координат ІНС:

$$\Delta \dot{\varphi} = \frac{\Delta V_N}{R}; \quad \Delta \dot{\lambda} = \frac{\Delta V_E}{R \cos \varphi} + \frac{V_E \sin \varphi}{R \cos^2 \varphi} \Delta \varphi; \quad \Delta \dot{h} = \Delta V_U. \quad (4.3)$$

Похибки інерційного вимірювального модуля:

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_{\omega_x} \\ \dot{b}_{\omega_y} \\ \dot{b}_{\omega_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{\omega_x}(t) \\ \xi_{\omega_y}(t) \\ \xi_{\omega_z}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{b}_{a_x} \\ \dot{b}_{a_y} \\ \dot{b}_{a_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{a_x}(t) \\ \xi_{a_y}(t) \\ \xi_{a_z}(t) \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

У виразах (4.1) - (4.4) використано такі позначення: $\Delta K, \Delta\theta, \Delta\gamma$ – похибки визначення відповідно кутів курсу, тангажу, крену; $\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_U$ – похибки визначення складових швидкості в ГСК; $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ – відповідно похибки визначення широти, довготи та висоти (або глибини занурення); η_ω, η_a – відповідно шум гіроскопів і акселерометрів; b_ω, b_a – зміщення нулів відповідно гіроскопів і акселерометрів; ξ_ω, ξ_a – породжуючий білий шум моделей зміщень нулів відповідно гіроскопів та акселерометрів.

Математична модель похибок будується на припущенні, що шуми вимірювань ІВМ відповідають моделі гауссового білого шуму, що є необхідною умовою для застосування класичного апарату фільтрації Калмана [31]. Такий склад вектора стану (15 компонентів) є оптимальним компромісом між обчислювальною складністю та точністю опису фізичних процесів у МЕМС-сенсорах. Більша кількість компонентів (наприклад, врахування масштабних коефіцієнтів) може призвести до втрати спостережуваності системи в умовах обмежених маневрів АБПА.

Розроблена модель повинна забезпечувати компенсацію за такими напрямками наведених вище категорій похибок:

– Інструментальні похибки: динамічне оцінювання та компенсація зміщень нуля сенсорів у процесі фільтрації, що зупиняє квадратичне або кубічне зростання похибки положення; окремо враховується вплив високочастотних шумів ІВМ в моделі похибок.

– Методичні похибки: похибки алгоритмів інтегрування, компенсація ефектів дискретності.

– Початкові похибки: уточнення орієнтації та координат апарата відразу після отримання перших корекційних сигналів від системи ДБЛ, що фактично виконує уточнення системи у русі.

Запишемо модель похибок ІНС для виразів (4.1) - (4.4) у просторі стану:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= A \cdot X + G \cdot w, \\ Y &= H \cdot X\end{aligned}, \quad (4.5)$$

де X – вектор стану; A – матриця стану; w – вектор випадкових вхідних збурень; G – матриця збурень; Y – вектор вимірювань; H – матриця вимірювання.

Вектор стану X має розмірність (15×1) і включає всі основні похибки навігаційного розв'язку та параметри дрейфу ІВМ:

$$X = \left[\Delta\varphi \ \Delta\lambda \ \Delta h \ \Delta V_E \ \Delta V_N \ \Delta V_U \ \Delta\theta \ \Delta\gamma \ \Delta K \ b_{\omega_x} \ b_{\omega_y} \ b_{\omega_z} \ b_{a_x} \ b_{a_y} \ b_{a_z} \right]^T, \quad (4.6)$$

Вектор випадкових вхідних збурень w характеризує випадкові збурення під час вимірювань ІВМ, що відповідають моделі гауссового білого шуму:

$$w = \left[\eta_{a_x} \ \eta_{a_y} \ \eta_{a_z} \ \eta_{\omega_x} \ \eta_{\omega_y} \ \eta_{\omega_z} \ \xi_{a_x} \ \xi_{a_y} \ \xi_{a_z} \ \xi_{\omega_x} \ \xi_{\omega_y} \ \xi_{\omega_z} \right]^T, \quad (4.7)$$

Вирази для матриці коефіцієнтів стану A та матриці коефіцієнтів збурень G наведено в додатках (Г.1) та (Г.2).

4.2 Модель вимірювань системи довгої базової лінії

Для комплексування ІНС використаємо метод ДБЛ, за яким, відповідно до викладеного в п. 1.2.4, при позиціонуванні використовується три або більше транспондерів (приймально-передавальних пристроїв), які розміщуються у відомих місцях на дні під водою [36]. Тоді формування вимірювання у фільтрі Калмана під час комплексування ІНС із системою ДБЛ для m -го донного маяка описується рівнянням [27, 36]:

$$y_m = \rho_m^{INC} - \rho_m^{ДБЛ}, \quad (4.8)$$

де $\rho_m^{ДБЛ}$ – виміряна дальність акустичним методом до m -го донного маяка (акустичного транспондера); ρ_m^{INC} – розрахована дальність ІНС до m -го донного маяка.

Дальність ІНС до m -го донного маяка розраховуємо за виразом:

$$\rho_m^{INC} = \|\mathbf{r}^{INC} - \mathbf{r}_m^{ДБЛ}\| = \sqrt{(X^{INC} - X_m^{ДБЛ})^2 + (Y^{INC} - Y_m^{ДБЛ})^2 + (Z^{INC} - Z_m^{ДБЛ})^2}, \quad (4.9)$$

де: $\mathbf{r}^{IHC} = [x^{IHC} \ y^{IHC} \ z^{IHC}]^T$ і $\mathbf{r}_m^{ДБЛ} = [x_m^{ДБЛ} \ y_m^{ДБЛ} \ z_m^{ДБЛ}]$ – прямокутні декартові координати ІНС і розміщення донного маяка ДБЛ в геоцентричній системі координат Землі (ECEF).

Геометричні перетворення широти довготи і висоти в ECEF координати описується виразом [105]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_N(\varphi) + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (R_N(\varphi) + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ (R_N(\varphi)(1 - e^2) + h) \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

Результат лінеаризації рівняння (4.9) за похибками позиції ІНС в системі координат ECEF має вигляд:

$$\delta \rho_m = \frac{\partial \rho_m^{IHC}}{\partial \mathbf{r}^{IHC}} \Delta \mathbf{r}^{IHC} = -(\mathbf{l}_{IHC}^m)^T \Delta \mathbf{r}^{IHC}, \quad (4.11)$$

де: $\Delta \mathbf{r}^{IHC} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ – похибки визначення координат ІНС в геоцентричній декартовій системі координат Землі; $\mathbf{l}_{IHC}^m$ – одиничний вектор лінії візування для m-го донного маяка, який визначається за виразом:

$$\mathbf{l}_{IHC}^m = \begin{bmatrix} l_{x,IHC}^m \\ l_{y,IHC}^m \\ l_{z,IHC}^m \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{r}_m^{ДБЛ} - \mathbf{r}^{IHC}}{\rho_m^{IHC}} = \begin{bmatrix} \frac{X_m^{ДБЛ} - X^{IHC}}{\sqrt{(X^{IHC} - X_m^{ДБЛ})^2 + (Y^{IHC} - Y_m^{ДБЛ})^2 + (Z^{IHC} - Z_m^{ДБЛ})^2}} \\ \frac{Y_m^{ДБЛ} - Y^{IHC}}{\sqrt{(X^{IHC} - X_m^{ДБЛ})^2 + (Y^{IHC} - Y_m^{ДБЛ})^2 + (Z^{IHC} - Z_m^{ДБЛ})^2}} \\ \frac{Z_m^{ДБЛ} - Z^{IHC}}{\sqrt{(X^{IHC} - X_m^{ДБЛ})^2 + (Y^{IHC} - Y_m^{ДБЛ})^2 + (Z^{IHC} - Z_m^{ДБЛ})^2}} \end{bmatrix}$$

Таким чином, модель вимірювання має вигляд:

$$y_m = -(\mathbf{l}_{IHC}^m)^T \Delta \mathbf{r}^{IHC} + \varepsilon_{\rho,m}(t), \quad (4.12)$$

де $\varepsilon_{\rho,m}(t)$ – гаусівський білий шум вимірювання дальності.

Оскільки похибки ІНС задаються координатами, необхідно виконати перетворення похибок геодезичних координат $(\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h)$ у похибки геоцентричних координат $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$:

$$\Delta \mathbf{r}^{IHC} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \Delta \varphi \\ \Delta \lambda \\ \Delta h \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

$$\mathbf{T}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} -(R_N + h) \sin \varphi \cos \lambda & -(R_N + h) \cos \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ -(R_N + h) \sin \varphi \sin \lambda & (R_N + h) \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ (R_N(1 - e^2) + h) \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

Підставляємо (4.13) в (4.12) і в результаті отримаємо модель вимірювання:

$$y_m = - \underbrace{\left(l_{IHC}^m \right)^T}_{H_m} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \varphi \\ \Delta \lambda \\ \Delta h \end{bmatrix}}_X + \varepsilon_{\rho, m} \quad (4.15)$$

У виразі (4.15) через H_m позначено рядок матриці вимірювання для m -го виміру:

$$H_m = \begin{array}{c|c|c|c} & \Delta \varphi & \Delta \lambda & \Delta h & \dots \\ \hline H_m & -(l_{x,IHC}^m T_{11} + l_{y,IHC}^m T_{21} + l_{z,IHC}^m T_{31}) & -(l_{x,IHC}^m T_{12} + l_{y,IHC}^m T_{22} + l_{z,IHC}^m T_{32}) & -(l_{x,IHC}^m T_{13} + l_{y,IHC}^m T_{23} + l_{z,IHC}^m T_{33}) & 0 \end{array}$$

Таким чином, отримуємо елементи вектору вимірювань Y та матриці коефіцієнтів вимірювання H у моделі похибок ІНС (4.5).

4.3 Дискретний фільтр Калмана

Застосування фільтра Калмана (ФК) вимагає, щоб і модель системи, і модель вимірювань для досліджуваного процесу були лінійними. Лінійну систему дискретного часу можна описати рівнянням [31]:

$$x_k = \Phi_{k,k-1} x_{k-1} + G_{k-1} w_{k-1}, \quad (4.16)$$

де: x_k – вектор стану; $\Phi_{k,k-1}$ – матриця стану в дискретній формі; G_{k-1} – матриця розподілу шуму; w_{k-1} – вектор процесного шуму; k – епоха вимірювання.

Дискретне лінійне рівняння вимірювань системи має вигляд

$$y_k = H_k x_k + \xi_k, \quad (4.17)$$

де: y_k – вектор вимірювань, H_k – матриця спостереження (модель вимірювань); ξ_k – шум вимірювань.

Матриця переходу станів Φ відображає відому динаміку системи та пов’язує вектор стану від часу $(k-1)$ до k . За відомої матриці динамічних коефіцієнтів A неперервної системи матриця переходу станів визначається як

$$\Phi = \exp(A\Delta t), \quad (4.18)$$

Для застосування у ФК використовується наближення першими двома членами розкладання в ряд Тейлора:

$$\Phi_k \approx I + A(t_k) \cdot \Delta t; \quad G_k \approx G(t_k) \cdot \Delta t, \quad (4.19)$$

де: I – одинична матриця, Δt – інтервал дискретизації.

Оцінка вектора стану системи x у момент часу k , що використовує лише інформацію до моменту часу $(k-1)$, називається прогнозом (апріорною оцінкою) $\hat{x}_k(-)$, оскільки вона отримується до надходження вимірювання.

Оскільки процесний шум має нульове середнє, найкращий прогноз вектора стану на момент часу k :

$$\hat{x}_k(-) = \Phi_{k|k-1} \hat{x}_{k-1}(+), \quad (4.20)$$

де $\hat{x}_{k-1}(+)$ – найкраща оцінка стану на попередній епосі $(k-1)$, яка називається апостеріорною оцінкою і базується на моделі процесу, що задається матрицею переходу станів $\Phi_{k|k-1}$.

Фільтр Калмана також прогнозує невизначеність цієї оцінки від епохи $(k-1)$ до k . Цю невизначеність характеризує коваріаційна матриця похибки $P_k(-)$, або апріорна коваріаційна матриця:

$$P_k(-) = \Phi_{k|k-1} P_{k-1}(+) \Phi_{k|k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T, \quad (4.21)$$

де $P_{k-1}(+)$ – апостеріорна оцінка коваріації на епосі $(k-1)$, отримана з урахуванням вимірювання.

Як бачимо з виразу (4.21), апріорна коваріаційна матриця $P_k(-)$ залежить як від процесного шуму (через Q_{k-1}), так і від апостеріорної коваріації $P_{k-1}(+)$.

Після формування прогнозу оцінки стану ФК виконує корекцію щоразу, коли стає доступним вимірювання із зовнішнього джерела. Спочатку, на основі коваріації вимірювань R_k обчислюється ваговий коефіцієнт підсилення Калмана K_k , що мінімізує середньоквадратичну похибку оцінювання:

$$K_k = P_k(-)H_k^T \left[H_k P_k(-)H_k^T + R_k \right]^{-1}. \quad (4.22)$$

Прогноз оцінок оновлюється за виразом:

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [y_k - H_k \hat{x}_k(-)], \quad (4.23)$$

а апостеріорна коваріація оновлюється за виразом:

$$P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-). \quad (4.24)$$

У класичній постановці ФК виконує рекурсивне оцінювання вектора стану $\hat{x}_k$ та його коваріації P , а корекція ІНС здійснюється шляхом використання оцінених станів, як поправок до навігаційного розв'язку. В роботі [123] застосовано спеціальну форму ФК зі зворотним зв'язком, в якій явне обчислення $\hat{x}_k$ не є потрібним, а замість оновлення оцінок виконується розрахунок вектору поправок стану:

$$\delta X = K_k y_k, \quad (4.25)$$

де: K – матриця підсилення Калмана, y – вектор вимірювань.

Після цього відповідні компоненти (широта, довгота, висота, швидкості, нулі/зміщення сенсорів тощо) миттєво коригуються в алгоритмі ІНС. Такий підхід зменшує накопичення похибок та підтримує малу величину похибок.

Таким чином, використання корекційного сигналу в ІНС буде наступним.

Корекція координат і швидкостей ІНС:

$$\begin{aligned} \varphi_{(+)}^{IHC} &= \varphi_{(-)}^{IHC} - \frac{f_{ДБЛ}}{f_s} \delta X[i_{\Delta\varphi}]; & V_{E(+)}^{IHC} &= V_{E(-)}^{IHC} - \frac{f_{ДБЛ}}{f_s} \delta X[i_{\Delta E}]; \\ \lambda_{(+)}^{IHC} &= \lambda_{(-)}^{IHC} - \frac{f_{ДБЛ}}{f_s} \delta X[i_{\Delta\lambda}]; & V_{N(+)}^{IHC} &= V_{N(-)}^{IHC} - \frac{f_{ДБЛ}}{f_s} \delta X[i_{\Delta N}]; \\ h_{(+)}^{IHC} &= h_{(-)}^{IHC} - \frac{f_{ДБЛ}}{f_s} \delta X[i_{\Delta h}]; & V_{U(+)}^{IHC} &= V_{U(-)}^{IHC} - \frac{f_{ДБЛ}}{f_s} \delta X[i_{\Delta U}]. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Корекція орієнтації ІНС:

$$C_{(+)} = \begin{bmatrix} 1 & \delta X[i_{\Delta K}] & -\delta X[i_{\Delta\gamma}] \\ -\delta X[i_{\Delta\theta}] & 1 & \delta X[i_{\Delta K}] \\ \delta X[i_{\Delta\gamma}] & -\delta X[i_{\Delta\theta}] & 1 \end{bmatrix}^T C_{(-)}. \quad (4.27)$$

Оновлення зміщення нулів ІВМ:

$$\begin{aligned}
 b_{\omega_x(+)} &= b_{\omega_x(-)} + \delta X[i_{b_{\omega_x}}] & b_{a_x(+)} &= b_{a_x(-)} + \delta X[i_{b_{\omega_x}}] \\
 b_{\omega_y(+)} &= b_{\omega_y(-)} + \delta X[i_{b_{\omega_y}}] ; & b_{a_y(+)} &= b_{a_y(-)} + \delta X[i_{b_{\omega_y}}] . \\
 b_{\omega_z(+)} &= b_{\omega_z(-)} + \delta X[i_{b_{\omega_z}}] & b_{a_z(+)} &= b_{a_z(-)} + \delta X[i_{b_{\omega_z}}]
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

У виразах (4.26) - (4.28) використано такі позначення: індекси $(-)$ та $(+)$ позначають значення відповідного параметра до та після внесення поправки, сформованої фільтром Калмана; позначення $\delta X[i.]$ у формулах означає відповідну компоненту вектора стану X ; $f_{\text{ДБЛ}}/f_s$ – коефіцієнт узгодження частот.

Оскільки корекційні вимірювання ДБЛ надходять з низькою частотою $f_{\text{ДБЛ}}$, а обчислення за алгоритмом ІНС виконуються з вищою частотою f_s , корекція, сформована ФК, не вводиться одноразово, а розподіляється на кожному кроці обчислення за алгоритмом ІНС протягом інтервалу між двома послідовними оновленнями ДБЛ для координат і швидкостей. Для цього використано коефіцієнт узгодження частот. Корекція орієнтації і оновлення оцінок нулів ІВМ також виконується з частотою $f_{\text{ДБЛ}}$.

На основі викладеного розроблено узагальнені структурно-функціональні схеми формування вимірювань (рис. 4.1) та навігаційного алгоритму (рис. 4.2) глибокого комплексування ІНС і ДБЛ з використанням фільтра Калмана.

Схема на рис. 4.1 описує процес формування вектора поправок стану δX на основі порівняння реальних вимірювань дальності з ДБЛ та розрахункових даних з ІНС і складається з таких блоків.

1. Модель вимірювань системи довгої базової лінії:

- вхідні дані: прямокутні координати донних маяків $[X_m^{\text{ДБЛ}}, Y_m^{\text{ДБЛ}}, Z_m^{\text{ДБЛ}}]^T$ та координати ІНС $[\lambda_{(-)}, \varphi_{(-)}, h_{(-)}]^T$, що включають накопичені похибки;
- прямокутні перетворення координат (ECEF): розрахунок прямокутних координат ІНС (X, Y, Z) через параметри земного еліпсоїда (радіуси кривизни R_N);
- обчислення геометричної дальності ρ_m до маяка з прямокутних координат ІНС;

- розрахунок вектора візування $[l_x^m, l_y^m, l_z^m]^T$: використовується дальність ρ_m , прямокутні координат ІНС (X, Y, Z) і прямокутні координати донного маяка $[X_m^{ДБЛ}, Y_m^{ДБЛ}, Z_m^{ДБЛ}]^T$;
- матриця узгодження похибок координат;
- формування матриці вимірювань Н: обчислення частинних похідних для елементів $(\Delta\lambda, \Delta\varphi, \Delta h)$ вектору стану X.

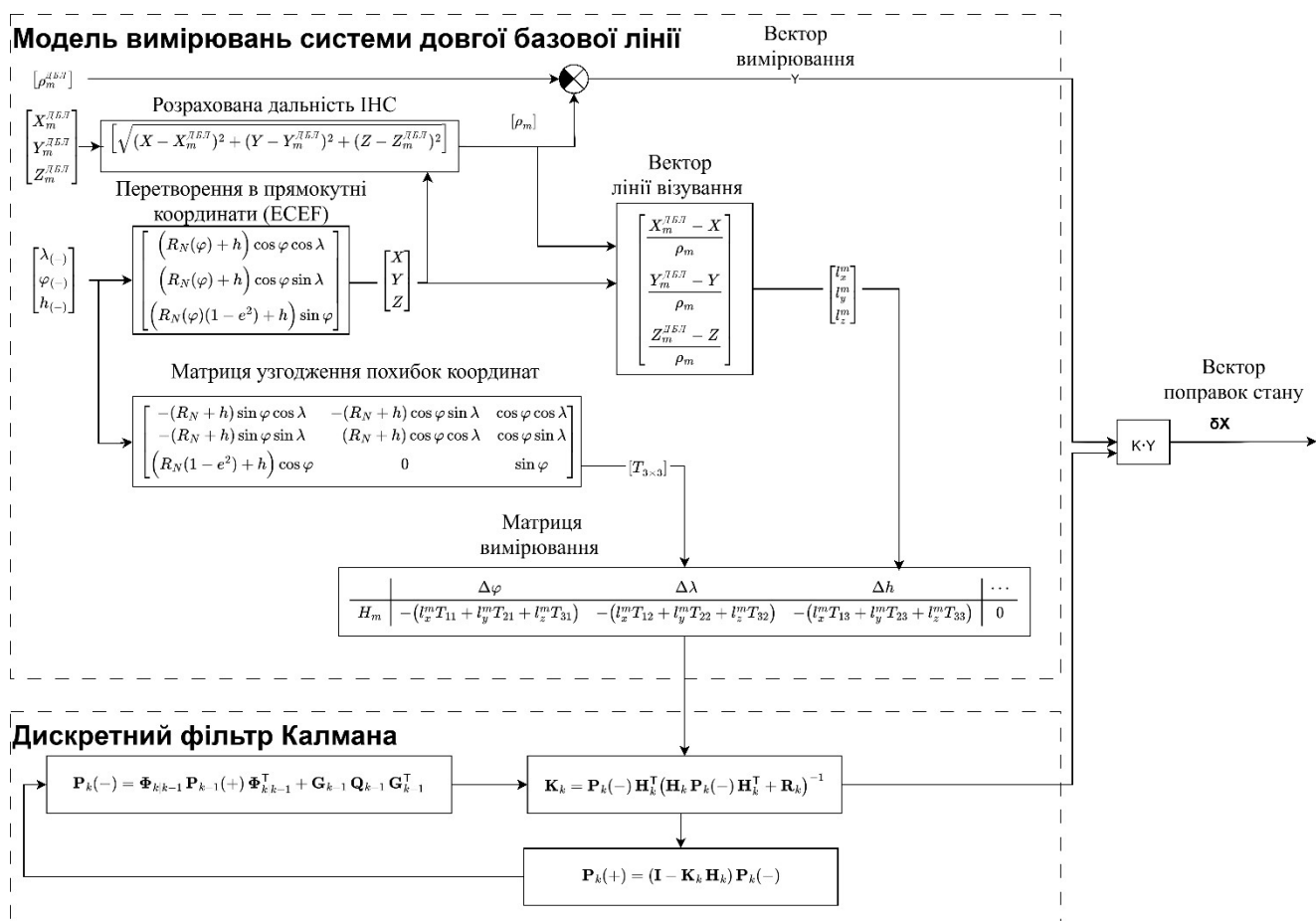


Рис. 4.1. Структурно-функціональна схема формування вимірювань ІНС і ДБЛ для використання в фільтрі Калмана

2. Дискретний фільтр Калмана, що реалізує класичний ітераційний цикл: прогноз коваріаційної матриці помилок $P_k(-)$, обчислення коефіцієнта підсилення Калмана K_k та оновлення оцінки стану $P_k(+)$.

Результат: на виході формується вектор поправок стану δX , який використовується для корекції ІНС.

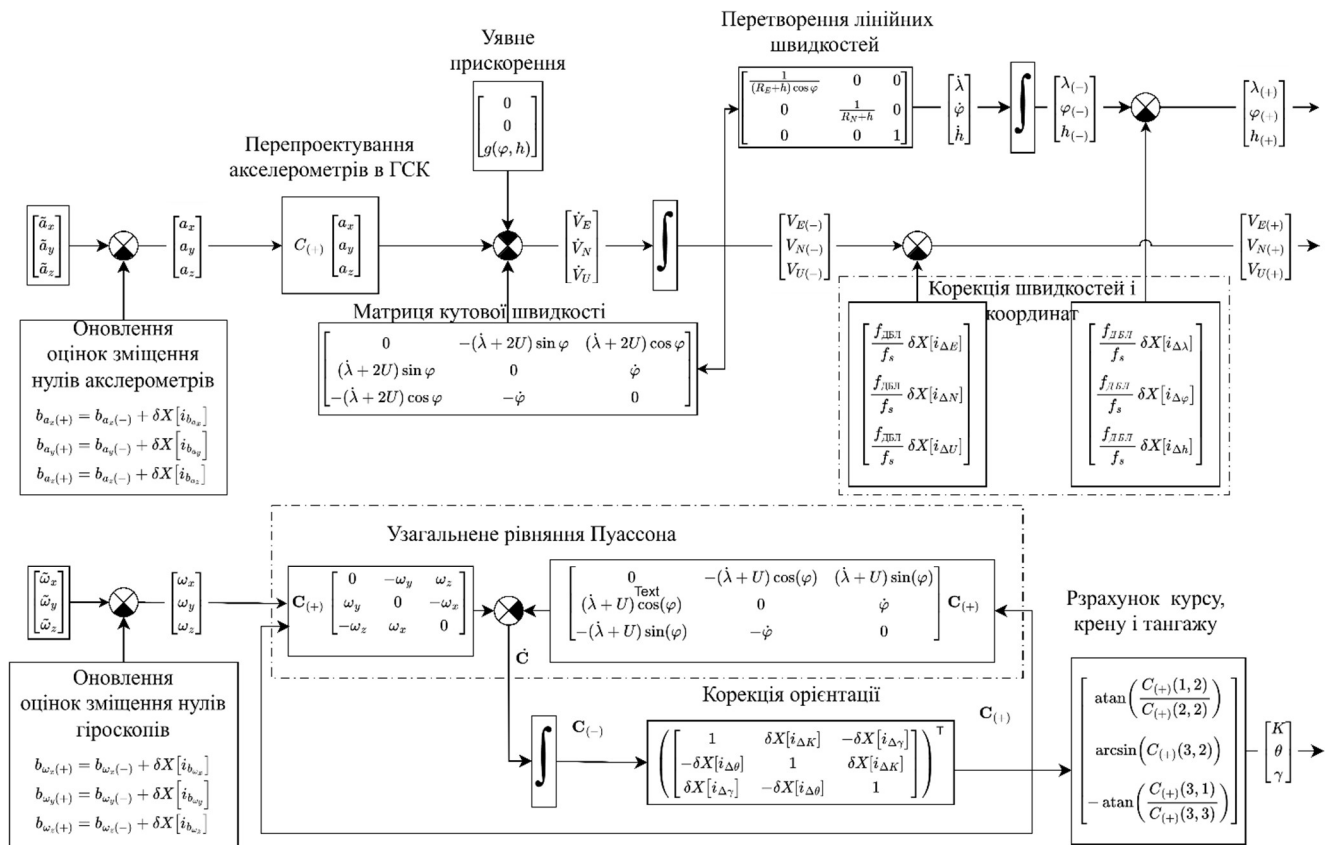


Рис. 4.2. Структурно-функціональна схема алгоритму ІНС з корекцією

В наведеній на рис.4.2 схемі алгоритму ІНС реалізовано замкнений контур корекції ІНС за оцінками похибок, що формуються фільтром Калмана на рис.4.1. Схема поділяється на два функціональні блоки:

1. Обчислення навігаційних параметрів (складових швидкості і координат):
 - первинна обробка: виміряні акселерометрами прискорення $[\tilde{a}_x, \tilde{a}_y, \tilde{a}_z]^T$ корегуються на оновлені оцінки зміщення нулів;
 - перепроєктування в ГСК: за допомогою матриці орієнтації $C_{(+)}$ прискорення переводяться з осей XYZ в ГСК;
 - формування вектору $[\dot{V}_E \ \dot{V}_N \ \dot{V}_U]^T$: з сигналів акселерометрів в ГСК віднімаються уявне прискорення та за допомогою «Матриці кутової швидкості» відносять і Коріолісове прискорення;

- швидкості $\begin{bmatrix} V_{E(-)} & V_{N(-)} & V_{U(-)} \end{bmatrix}^T$ отримуються після інтегрування вектору $\begin{bmatrix} \dot{V}_E & \dot{V}_N & \dot{V}_U \end{bmatrix}^T$;
- швидкість зміни географічних координат $[\dot{\lambda}, \dot{\phi}, \dot{h}]^T$ розраховується при проходженні вектору $\begin{bmatrix} V_{E(-)} & V_{N(-)} & V_{U(-)} \end{bmatrix}^T$ через блок «Перетворення лінійних швидкостей»;
- координати $\begin{bmatrix} \lambda_{(-)} & \phi_{(-)} & h_{(-)} \end{bmatrix}^T$ отримуються після інтегрування вектору $[\dot{\lambda}, \dot{\phi}, \dot{h}]^T$;
- корекція швидкостей і координат: від обчислених координат та швидкостей віднімаються поправки δX ;
- вихідні дані: $\begin{bmatrix} V_{E(+)} & V_{N(+)} & V_{U(+)} \end{bmatrix}^T$ і $\begin{bmatrix} \lambda_{(+)} & \phi_{(+)} & h_{(+)} \end{bmatrix}^T$.

2. Обчислення кутових параметрів орієнтації:

- первинна обробка: виміряні гіроскопами кутові швидкості $[\tilde{\omega}_x, \tilde{\omega}_y, \tilde{\omega}_z]^T$ корегуються на оновлені оцінки зміщення нулів;
- узагальнене рівняння Пуассона: на основі скорегованих вимірювань гіроскопів $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ і розрахованого обертання Землі і ГСК обчислюється похідна матриці напрямних косинусів $\dot{C}$, яка використовується в блоці інтегрування для розрахунку матриці орієнтації $C_{(-)}$;
- корекція орієнтації: матриця $C_{(-)}$ корегується за допомогою матриці малих поворотів, що містить поправки по кутах $\delta X[i_{\Delta\gamma}, i_{\Delta\theta}, i_{\Delta\kappa}]$;
- вихідні дані: кути курсу K , крену θ , тангажу γ .

Схема формування вимірювань ІНС і ДБЛ на рис. 4.1 і схема алгоритму ІНС з корекцією на рис. 4.2 функціонують з використанням зворотного зв'язку: ІНС видає поточні координати для моделі вимірювань, а фільтр Калмана, порівнюючи їх з реальними даними від гідроакустичних донних маяків, розраховує оцінки зміщення нулів сенсорів (для усунення похибок ІВМ), та вносить поправки у визначені в ІНС кути, швидкості і координати.

4.4 Моделювання інерціальної навігаційної системи з інтеграцією системи дальньої базової лінії

Моделювання ІНС з інтеграцією системи ДБЛ проведено на основі результатів попередніх етапів дослідження. Для опису динаміки похибок ІНС було побудовано модель у просторі стану, у якій вектор стану (4.6) включає похибки орієнтації, швидкості, координат, а також зсуви нуля гіроскопів і акселерометрів. Для цієї моделі отримано матрицю стану та матрицю збурень, що описують еволюцію випадкових складових похибок.

Модель вимірювань системи ДБЛ ґрунтується на обчисленні дальностей від еталонного положення АБПА до донних маяків за їх відомими просторовими координатами з порівнянням дальності, обчисленої ІНС. Враховується наявність випадкових похибок вимірювання дальності в системі ДБЛ.

Фільтр Калмана побудовано у дискретній формі. На етапі прогнозу матриці коваріацій використовуються рівняння динаміки похибок ІНС, на етапі корекції – модель вимірювань ДБЛ. Вектор вимірювань включає похибки обчислених за моделлю дальностей, що дозволяє пов'язати похибки координат та орієнтації з результатами вимірювання системи ДБЛ.

Моделювання проведено з метою перевірки алгоритму комплексування ІНС з системою ДБЛ на основі ФК шляхом порівняння результатів моделювання з еталонними даними. У процесі моделювання враховано, що кожен сенсорний канал має власну частоту оновлення та характерні похибки вимірювань, які задаються відповідними статистичними характеристиками шумів. Додатково в сигналах гіроскопів ІВМ враховано постійні складові кутової швидкості. Тривалість моделювання 1 година. Для реалізації зовнішньої корекції координат у моделі створено віртуальну систему акустичної навігації ДБЛ, яка включає чотири донні акустичні маяки, розміщення яких показано на рис. 4.3.

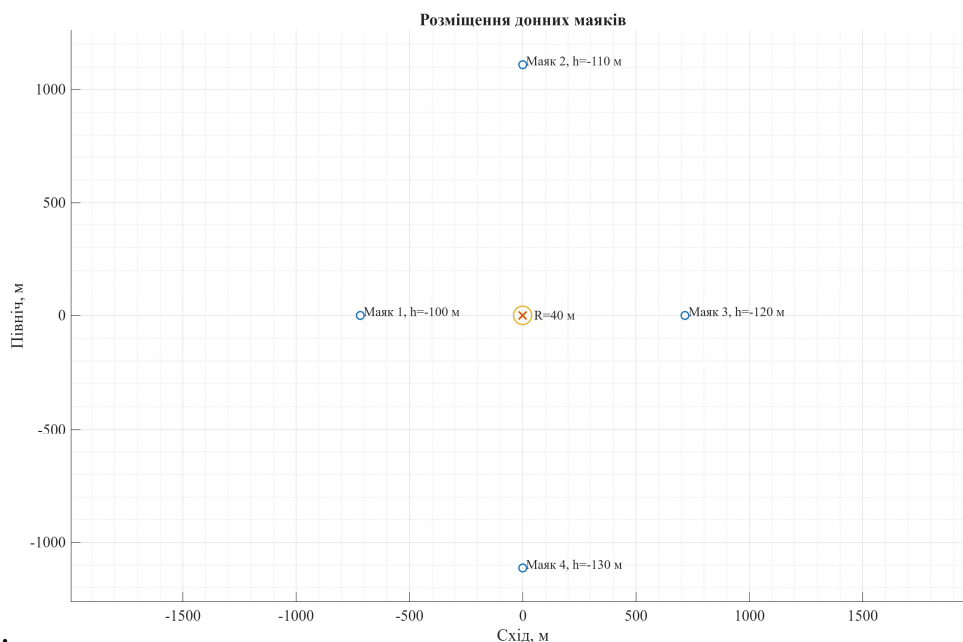


Рис. 4.3. Розміщення віртуальних донних маяків ДБЛ

Відповідно до наведеного на рис. 4.3 плану, маяки системи ДБЛ розміщені хрестоподібно, біля кожної позначки наведено номер маяка та його висоту (глибини) h . Додатково в центрі показано коло радіусом $R = 40$ м, яке позначає локальну область очікуваного положення АБПА. Координати розміщення віртуальних донних маяків наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Координати розміщення віртуальних донних маяків ДБЛ

Номер маяка	Широта, °	Довгота, °	Висота, м
1	50	30-0,01	-100
2	50 + 0,01	30	-110
3	50	30+0,01	-120
4	50 - 0,01	30	-130

Дальності до m -го маяка обчислюються за формулою (4.9) з використанням еталонних координат переміщення АБПА та координат маяків (табл. 4.1). Для імітації реального сигналу враховано випадкову складову (типу білого шуму) з середньоквадратичним відхиленням (СКВ) $\sigma_p = 0,5$ м [124], тобто:

$$\rho_m^{\text{ДБЛ}}(t_k) = \rho_m(t_k) + \varepsilon_{\rho,m}(t_k), \quad \varepsilon_{\rho,m}(t_k) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\rho^2), \quad (4.29)$$

де t_k відповідає періоду оновлення вимірювань 2,5 с; $\mathcal{N}(0, \sigma_\rho^2)$ – шум вимірювання дальності з нульовим середнім та СКВ, що дорівнює $\sigma_\rho = 0,5$ м.

Відповідно до рівняння (4.8) формується вектор вимірювань, який у моделі подано у вигляді різниці розрахованих дальностей за поточними оцінками ІНС та змодельованих дальностей системи ДБЛ:

$$Y = \begin{bmatrix} \rho_1^{\text{ІНС}} - \rho_1^{\text{ДБЛ}} \\ \rho_2^{\text{ІНС}} - \rho_2^{\text{ДБЛ}} \\ \rho_3^{\text{ІНС}} - \rho_3^{\text{ДБЛ}} \\ \rho_4^{\text{ІНС}} - \rho_4^{\text{ДБЛ}} \end{bmatrix}, \quad (4.30)$$

Результати моделювання дальностей системи вимірювань ДБЛ наведено в додатку Г (рис. Г.1).

Оскільки в моделюванні дальності ДБЛ шум вимірювань задається СКВ σ_ρ згідно з (4.29), матрицю коваріації шумів вимірювань R прийнято діагональною з елементами σ_ρ^2 :

$$R = \text{diag}(\sigma_{\rho_1}^2, \sigma_{\rho_2}^2, \sigma_{\rho_3}^2, \sigma_{\rho_4}^2). \quad (4.31)$$

Сигнали сенсорів ІВМ для імітаційного моделювання роботи ІНС сформовано на основі результатів, отриманих у п. 3.5, тривалістю 3600с з урахуванням випадкових завад. Зокрема, у сигналах гіроскопів додатково враховано зміщення нуля, що моделює наявність систематичної складової: 0,03 %/с по осі X , 0,02 %/с по осі Y та 0,01 %/с по осі Z , для перевірки здатності ФК оцінити систематичні похибки гіроскопів. Параметри випадкових завад задано відповідно до прийнятих у п. 3.5 статистичних характеристик, що дозволяє забезпечити контрольоване відтворення шумових компонент у сигналах ІВМ. Змодельовані сигнали ІВМ наведено в додатку Г (рис. Г.2).

Значення елементів матриці процесного шуму дискретного ФК визначаються на основі оцінених статистичних характеристик випадкових входніх збурень ІВМ

$$Q = \text{diag}(w_\sigma^2), \quad (4.32)$$

де w_σ – вектор СКВ компонент вхідних збурень.

Середньоквадратичні відхилення шумів вимірювань ІВМ η_ω та η_a обчислено за формулою (3.21) на основі даних, наведених в табл. 3.1. Для гіроскопів та акселерометрів задані однакові значення за осями X, Y, Z:

$$\sigma_{\eta_\omega} = \sigma_\omega = 0,048 \text{ } ^\circ/\text{с}; \quad \sigma_{\eta_a} = \sigma_a = 0,0035 \text{ м/с}^2.$$

Зміщення нулів гіроскопів та акселерометрів, що входять до вектора стану X (4.6), моделюються як випадкове блукання, а їх зміна задається породжуючими шумами ξ_ω та ξ_a у складі w , СКВ породжуючих шумів приймаємо однаковими за трьома осями і обчислюємо за формулами [125]:

$$\sigma_{\xi_\omega} = BI_\omega \sqrt{\frac{\Delta t}{\tau_\omega}}, \quad \sigma_{\xi_a} = BI_a \sqrt{\frac{\Delta t}{\tau_a}}, \quad (4.33)$$

де $\Delta t = 0,005 \text{ с}$ – крок дискретизації алгоритму; τ – час усереднення варіацій Алана (значення по осі τ), при якому визначено параметр BI (табл. 3.1).

Розраховані значення СКВ породжуючих шумів: $\sigma_{\xi_\omega} = 6,213 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ/\text{с}$ та $\sigma_{\xi_a} = 3,4669 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$ по кожній з осей X, Y, Z.

На основі виконаних розрахунків матриця Q матиме вигляд:

$$Q = \text{diag}(\sigma_{\eta_a}^2 \quad \sigma_{\eta_a}^2 \quad \sigma_{\eta_a}^2 \quad \sigma_{\eta_\omega}^2 \quad \sigma_{\eta_\omega}^2 \quad \sigma_{\eta_\omega}^2 \quad \sigma_{\xi_a}^2 \quad \sigma_{\xi_a}^2 \quad \sigma_{\xi_a}^2 \quad \sigma_{\xi_\omega}^2 \quad \sigma_{\xi_\omega}^2 \quad \sigma_{\xi_\omega}^2). \quad (4.34)$$

Початкові значення коваріації P є нульовими, крім елементів, що відповідають за похибки нулів гіроскопів $b_{\omega_x}, b_{\omega_y}, b_{\omega_z}$. Встановлене значення $0,001^\circ$ для швидшого сходження оцінок нулів гіроскопів під час роботи ІНС з корекцією від ДБЛ.

Результат моделювання переміщення АБПА відносно центру кола в горизонтальній площині ІНС з корекцією від ДБЛ зображено на рис. 4.4. Як видно з наведених результатів, у разі комплексування ІНС з системою ДБЛ траєкторія колового руху АБПА є максимально наближеною до еталонної (заданої) траєкторії та до еталонної траєкторії з урахуванням шуму вимірювання дальності (за винятком одного оберту, де максимальне відхилення в північному напрямку складає 9м, а в східному – біля 3м за час моделювання 3600с). Результати оцінювання похибок навігаційних параметрів АБПА при комплексуванні ІНС/ДБЛ наведено на рис. 4.5.

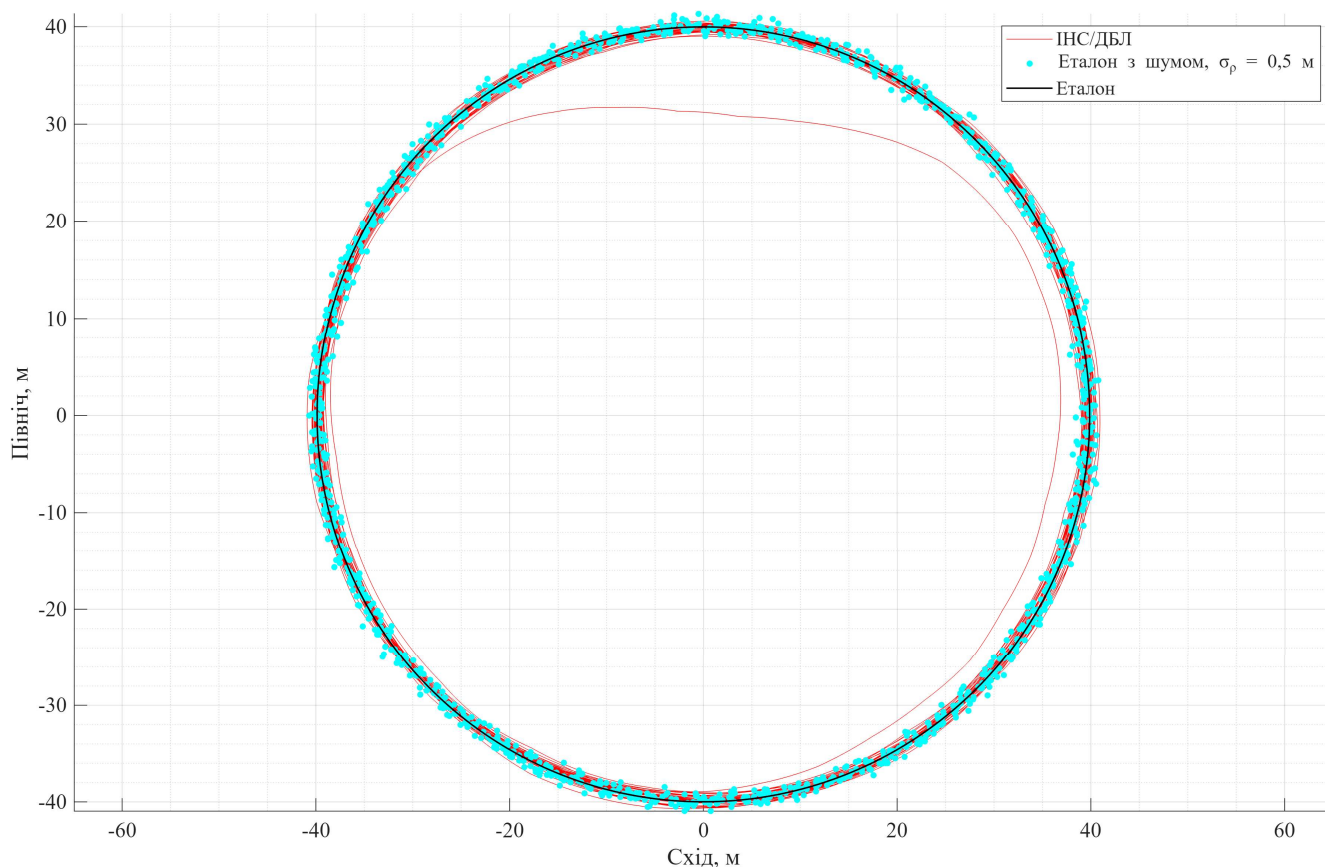


Рис. 4.4. Траєкторія переміщення АБПА відносно центру кола в горизонтальній площині

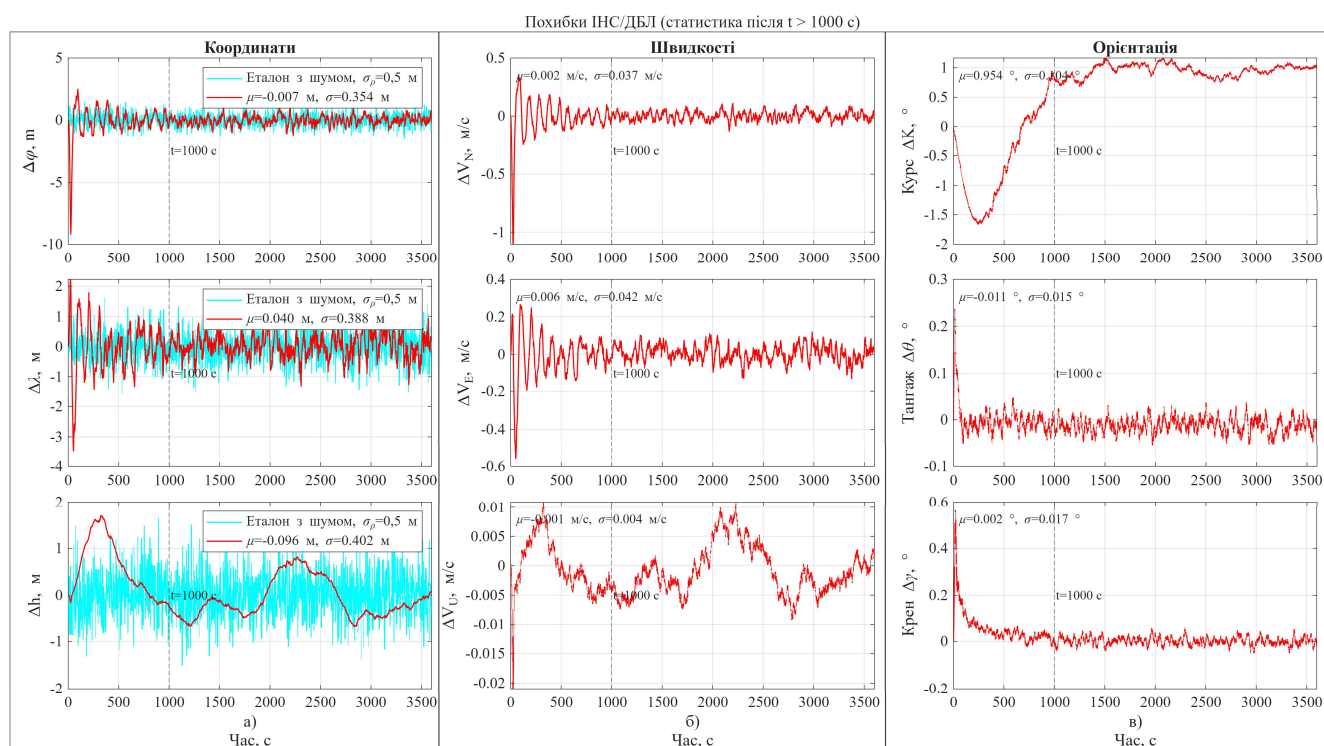


Рис. 4.5. Похибки визначення параметрів руху АБПА: а) координат; б) складових швидкості; в) кутів орієнтації

На рис. 4.5 вертикальною штриховою лінією позначено момент $t = 1000\text{с}$, починаючи з якого виконувалося оцінювання статистичних характеристик наведених оцінок похибок (середнього значення μ та СКВ σ), результати наведено в табл. 4.2. На рис. 4.5,а порівнюються похибки для результату комплексування ІНС/ДБ (червона крива) та еталонних значень із доданим шумом (ціанова крива), який відповідає моделі похибок вимірювань ДБЛ із СКВ $\sigma_p = 0,5\text{м}$. На початковій ділянці моделювання спостерігається перехідний процес, пов'язаний з ініціалізацією та збіжністю ФК під дією корекцій ДБЛ для всіх параметрів.

Таблиця 4.2 – Статистичні характеристики похибок ІНС/ДБЛ для $t > 1000\text{с}$

ІНС/ДБЛ	Координати, м			Швидкості, м/с			Орієнтація, °		
	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔV_N	ΔV_E	ΔV_U	ΔK	$\Delta\theta$	$\Delta\gamma$
μ	-0,007	-0,040	-0,096	-0,002	-0,006	0,001	0,954	-0,011	0,002
σ	0,354	0,388	0,402	0,037	0,042	0,004	0,044	0,015	0,017
* RMS	0,354	0,390	0,413	0,037	0,042	0,004	0,955	0,019	0,017

$$* \text{RMS} = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$$

У цілому отримані похибки в таблиці 4.2 підтверджують, що інтеграція за дальностями ДБЛ забезпечує стабілізацію похибок координат на рівні близько 0,35–0,41м (за СКВ) та низький рівень похибок швидкостей ($\approx 0,04$ м/с). Водночас наявність сталого зміщення курсу на рівні близько 1° вказує на доцільність додаткової корекції курсового каналу (наприклад, за даними магнітометра, гірокомпасування або зовнішнього курсового спостереження) або уточнення моделі похибок/налаштувань фільтра для підвищення точності саме по азимуту.

На рис. 4.6 наведено оцінки зсувів нуля ІВМ у часі. Для оцінок зсувів нуля гіроскопів $b_{g,x}$, $b_{g,y}$, $b_{g,z}$ характерною є наявність перехідного процесу на початковому етапі, після чого оцінки стабілізуються і набувають встановлених моделюванням значень (0,03 °/с, 0,02 °/с та 0,01 °/с відповідно за осями X,Y,Z). Для акселерометрів оцінки $b_{a,x}$, $b_{a,y}$, $b_{a,z}$ мають значно більш повільну збіжність, а також можуть демонструвати тренд або низькочастотні коливання.

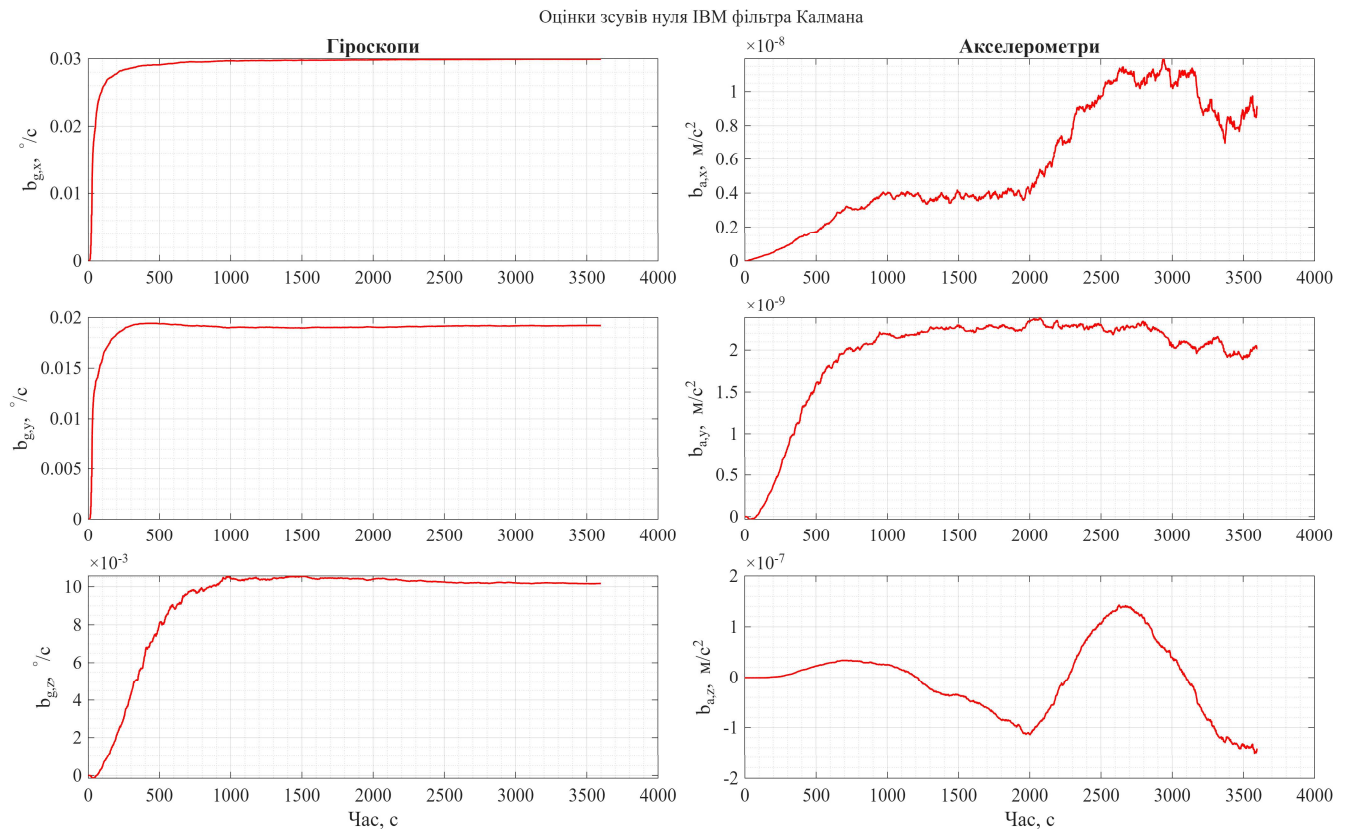


Рис. 4.6. Оцінки зсувів нуля ІВМ, отримані ФК при комплексуванні ІНС/ДБЛ.

Отримані результати свідчать про здатність алгоритму комплексування ІНС/ДБЛ ідентифікувати та компенсувати детерміновані складові похибок сенсорів.

Загальний результат роботи ІНС з корекцією від ДБЛ узгоджується з поведінкою коваріацій показаних на рис. 4.7, де наведено часові залежності коренів з діагональних елементів матриці коваріації P фільтра Калмана, тобто оцінки апіорної/апостеріорної невизначеності відповідних компонент вектора стану похибок: похибок координат $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$, похибок складових швидкостей $\Delta V_N, \Delta V_E, \Delta V_U$, похибок кутів орієнтації $\Delta K, \Delta\theta, \Delta\gamma$, а також зсувів нуля гіроскопів і акселерометрів. Після завершення перехідного процесу ($t > 1000$ с) значення $\sqrt{P_{ii}}$ переходять у стабільний режим, що свідчить про стабілізацію оцінок та узгодження моделі шумів із характером вимірювань у каналі ДБЛ.

За наведеними в табл. 4.2 даними СКВ похибок координат становлять $\sigma_{\Delta\varphi} = 0,354$ м, $\sigma_{\Delta\lambda} = 0,388$ м, $\sigma_{\Delta h} = 0,402$ м. На графіках (рис. 4.7,а) діагональні елементи

$\sqrt{P(\Delta\varphi)}$ та $\sqrt{P(\Delta\lambda)}$ у сталому режимі наближаються до значень близько 0,45м–0,50м, а елемент $\sqrt{P(\Delta h)}$ – до значення 0,55м–0,60 м. Отже, фільтр переоцінює СКВ похибок визначення координат відносно фактичних СКВ похибок на незначні значення.

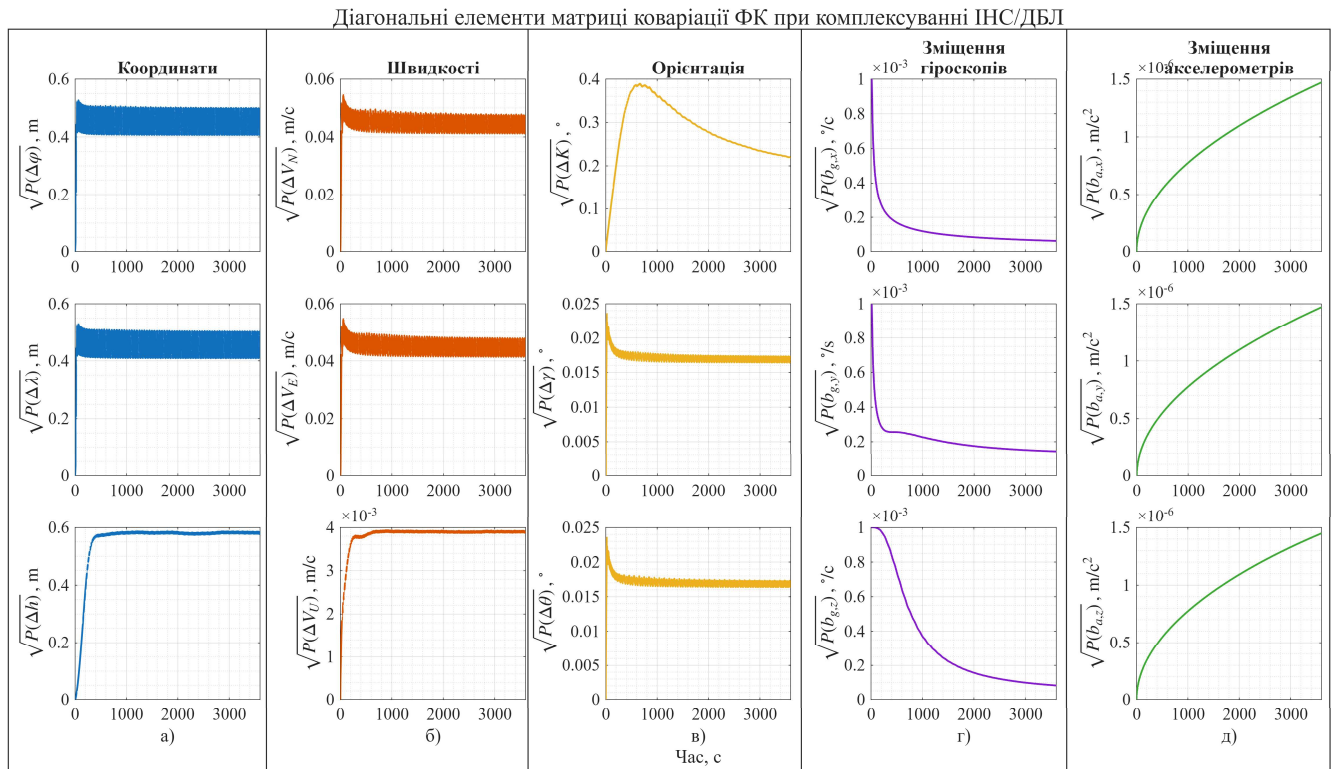


Рис. 4.7. Діагональні елементи матриці коваріації ФК при комплексуванні ІНС/ДБЛ для: а) похибок координат; б) похибок складових швидкості; в) похибок кутів орієнтації; г) зміщень нулів гіроскопів; д) зміщень нулів акселерометрів

Для швидкостей отримані з табл. 4.2 значення СКВ похибок визначення складових швидкостей $\sigma_{\Delta V_N} = 0,037\text{м/с}$, $\sigma_{\Delta V_E} = 0,042\text{м/с}$ та $\sigma_{\Delta V_U} = 0,004\text{м/с}$ узгоджуються з отриманими на рис. 4.7,б значеннями. Графіки для елементів $\sqrt{P(\Delta V_N)}$ та $\sqrt{P(\Delta V_E)}$ у сталому режимі набувають значень близько 0,04м/с–0,05 м/с, а для елементу $\sqrt{P(\Delta V_U)}$ – близько 0,0003м/с–0,0004 м/с. Це свідчить про коректне врахування випадкових завад сенсорів ІВМ та шуму вимірювань від ДБЛ у ФК для каналу оцінювання складових швидкості.

Щодо похибок кутів орієнтації, то для кута курсу в табл. 4.2 отримано ненульове зміщення $\mu_{\Delta K} = 0,954^\circ$ при малій випадковій складовій $\sigma_{\Delta K} = 0,044^\circ$. На графіку (рис. 4.7,в) для елементу $\sqrt{P(\Delta K)}$ бачимо, що після перехідного процесу невизначеність похибки кута курсу лишається суттєво більшою (близько $0,2^\circ$) за СКВ $\sigma_{\Delta K}$. Це означає, що фільтр Калмана оцінює свою випадкову похибку (невизначеність) більшою, ніж вона фактично спостерігається за СКВ. Водночас, наявність сталого зсуву похибки $\mu_{\Delta K} \approx 1^\circ$ означає, що в каналі визначення кута курсу присутня залишкова систематична складова, яка не компенсується за час моделювання 3600 с запропонованим комплексуванням ІНС з лише дальнісними вимірюваннями ДБЛ. Причиною може бути слабка спостережуваність кута курсу за дальностями для заданого сценарію руху, коли розглядається рух АБПА за коловою траєкторією. Практично це означає доцільність додаткового курсового вимірювання.

Для зсувів нуля гіроскопів (рис. 4.7,г) графіки для діагональних елементів $\sqrt{P(b_\omega)}$ монотонно зменшуються, що відповідає ідентифікації цих параметрів фільтром і зростанню впевненості в їх оцінках. Натомість, для зсувів нуля акселерометрів (рис. 4.7,д) графіки для елементів $\sqrt{P(b_a)}$ з часом зростають, що вказує на їх нижчу спостережуваність.

Імітаційні дослідження підтвердили коректність побудованих моделей і працездатність алгоритму комплексування ІНС з системою ДБЛ через ФК для усунення загрози накопичення похибок ІНС та забезпечення прийнятної точності визначення навігаційних параметрів при русі АБПА за коловою траєкторією.

4.5 Фізичне моделювання інерціальної навігаційної системи з інтеграцією системи дальньої базової лінії

Для підтвердження отриманих результатів математичного та комп'ютерного (імітаційного) моделювання проведено фізичне (напівнатурне) моделювання ІНС з інтеграцією акустичної системи ДБЛ.

Фізичне моделювання можна розглядати як проміжний етап дослідження між математичним та імітаційним моделюванням і повномасштабними морськими випробуваннями. Воно дозволить поєднати переваги математичної моделі, повторюваність експериментів з можливістю оцінки реальної реалізації алгоритмів.

Метою фізичного моделювання є перевірка працездатності та ефективності розроблених алгоритмів глибокого комплексування MEMС-ІНС з системою ДБЛ в умовах, що максимально наближені до реальних, що не враховувало проведене моделювання в п.4.4.

Для досягнення поставленої мети сформовано такі завдання фізичного моделювання:

- дослідити точність навігаційного розв’язку ІНС/ДБЛ для різних варіантів конфігурації гідроакустичних маяків;
- оцінити можливості фільтра Калмана щодо оцінки та компенсації зсувів нуля гіроскопів і акселерометрів;
- перевірити узгодженість навігаційного розв’язку з еталонними даними ГНСС та готовність інтегрованої системи до подальших натурних випробувань.

В основу фізичного моделювання покладено записані реальні дані руху об’єкта, отримані під час наземного тесту на автомобілі, які доповнюються змодельованими віртуальними вимірюваннями системи ДБЛ. В якості ІВМ використано ІНС-В на базі MEMС-датчиків з частотою дискретизації 200 Гц. Еталонні координати для формування вимірювань ДБЛ забезпечувалися використанням координат ГНСС і відомими позиціями віртуальних донних маяків. Отримані значення дальностей подавалися на вхід ФК з частотою оновлення даних ГНСС (1 Гц), що відповідає можливій частоті корекції ІНС від ДБЛ. У такій постановці записані дані дозволяють відтворити роботу реального програмно-апаратного комплексу, що використовує ці сигнали, як штатні вимірювання, що надходять від бортового ІВМ і гідроакустичної системи. Це дозволяє оцінити поведінку інтегрованого комплексу ІНС/ДБЛ з урахуванням усіх особливостей програмної реалізації, числових методів, можливого впливу ефектів дискретизації, затримок обробки даних тощо.

Важливою частиною фізичного моделювання є аналіз впливу конфігурації системи ДБЛ на точність навігаційного розв'язку. Просторове розташування віртуальних маяків та траєкторію руху об'єкта в геодезичних координатах за даними ГНСС ілюструє рис. 4.8.

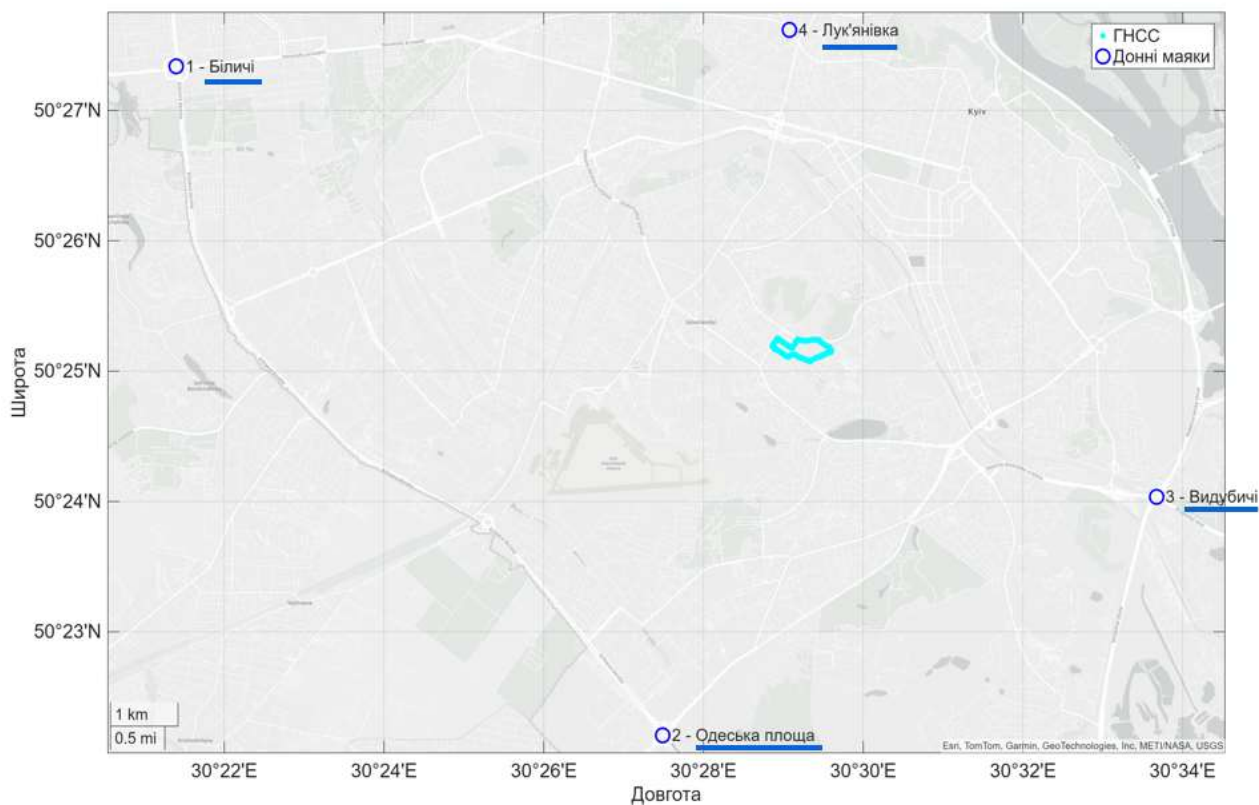


Рис. 4.8. Розміщення віртуальних донних маяків системи ДБЛ (сині маркери) та траєкторія руху об'єкта за даними ГНСС (ціанова лінія)

Використано картографічне подання конфігурації системи ДБЛ та результатів визначення траєкторії руху об'єкта у геодезичних координатах (широта, довгота). Координатна сітка та підписи осей відображають довготу (за віссю абсцис) і широту (за віссю ординат) у градусах і хвилинах; масштаб карти наведено в лівому нижньому куті. Координати місцезоположення віртуальних донних маяків (1 – Біличі, 2 – Одеська площа, 3 – Видубичі, 4 – Лук'янівка) наведено в табл. 4.3. Траєкторію руху об'єкта показано у центральній частині карти на основі точкових вимірювань ГНСС.

Для дослідження працездатності та ефективності алгоритму до деградації геометрії ДБЛ виконано серію моделювань на одному експериментальному наборі

даних. Використано базову конфігурація з чотирма донними маяками та чотири сценарії з трьома маяками (імітація відмови одного маяка): 4 маяки (базовий режим); 3 маяки – без №1; 3 маяки – без №2; 3 маяки – без №3; 3 маяки – без №4.

Таблиця 4.3 – Координати розміщення віртуальних донних маяків ДБЛ

Номер маяка	Широта, °	Довгота, °	Висота, м
1 – Біличі	50,455623	30,356655	120
2 – Одеська площа	50,370091	30,458152	120
3 – Видубичі	50,400605	30,561196	120
4 – Лук'янівка	50,460272	30,484625	120

В додатках Г (рис. Г.3) наведено часові залежності дальностей $\rho_m^{\text{ДБЛ}}$ від об'єкта до чотирьох акустичних маяків системи ДБЛ ($m = 1 \dots 4$), які сформовані за результатами руху (за даними ГНСС) і за координатами місцеположення донного маяка. Наведені залежності використовуються як вхідні вимірювання системи ДБЛ під час корекції ІНС у ФК та для подальшого аналізу точності інтегрованої навігаційної системи.

Загальний вплив деградації геометрії ДБЛ на навігаційне рішення ІНС/ДБЛ показано на рис 4.9, де наведено траєкторії руху об'єкта на мапі, які були отримані за різних конфігурацій використання системи ДБЛ. Точками ціанового кольору показано вимірювання ГНСС, які приймаються як контрольні (еталонні) дані для оцінювання точності. Суцільною червоною лінією наведено розв'язок ІНС/ДБЛ у базовому випадку з чотирма донними маяками. Штриховими лініями різного типу наведено розв'язки ІНС/ДБЛ для конфігурацій з трьома маяками, отримані шляхом виключення вимірювань дальності від одного з маяків (варіанти «без №1», «без №2», «без №3», «без №4»), що імітує відмову одного з маяків або тимчасової втрати доступності вимірювань. З наведених результатів видно, що у базовому режимі (4 маяки) траєкторія об'єкта за комплексування ІНС/ДБЛ узгоджується з контрольними вимірюваннями ГНСС на всій ділянці маршруту.

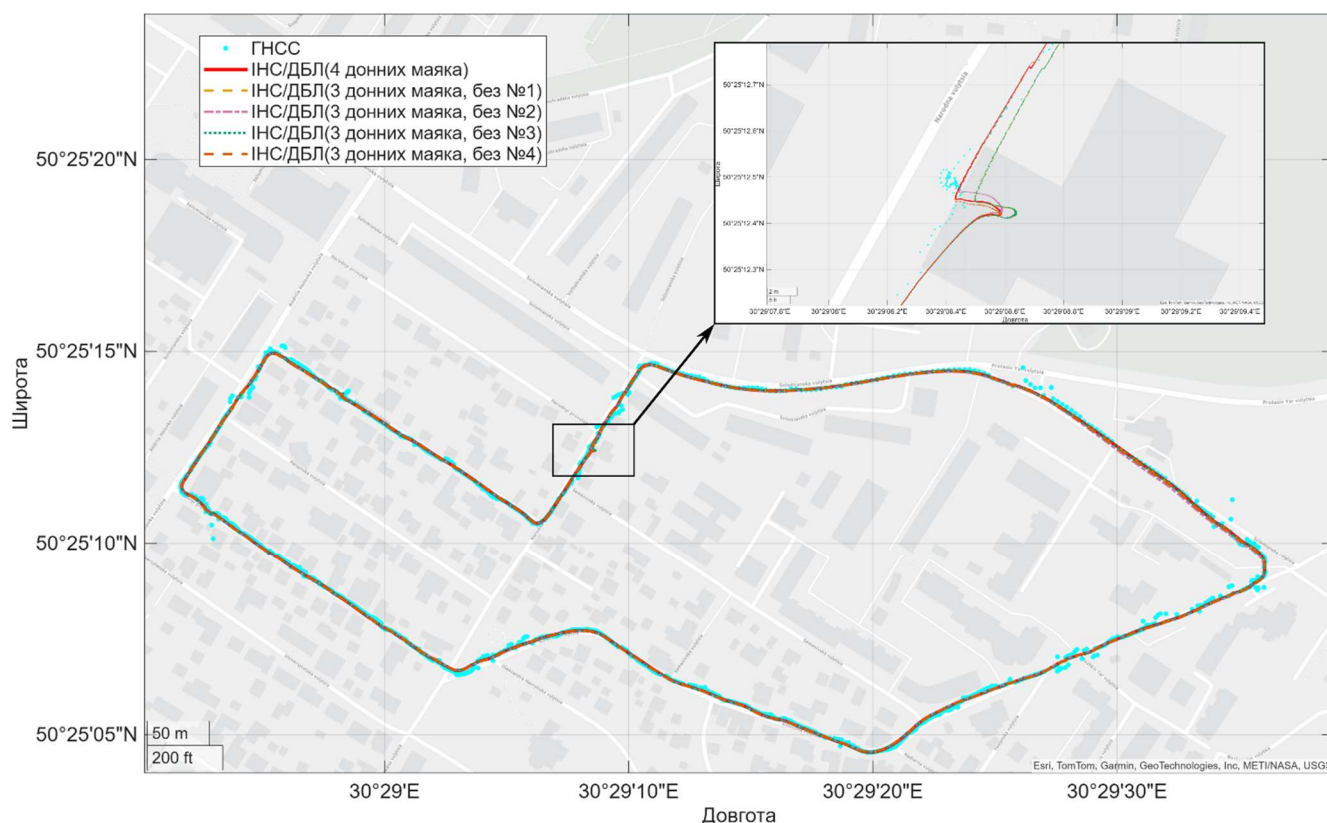


Рис. 4.9. Траєкторія руху об'єкта на мапі за даними ГНСС та ІНС/ДБЛ з різними конфігураціями геометрії віртуальних донних маяків

У режимі використання трьох маяків траєкторії зберігають загальну форму базового розв'язку, однак локальні розбіжності зростають на ділянках маневрування. У збільшеній області, виділеній прямокутником, показано такі відхилення, що можуть бути зумовлені погіршенням геометрії ДБЛ і зменшенням надлишкової вимірююваності при відсутності одного маяка, а також похибками ГНСС у умовах міської забудови. Отримані результати свідчать про загальну стабільність роботи інтегрованої системи ІНС/ДБЛ, навіть за втрати одного маяка навігаційний розв'язок залишається стабільним та відтворює траєкторію руху без суттєвих спотворень її геометрії, що підтверджує працездатність та ефективність алгоритму комплексування до часткової деградації системи ДБЛ.

Після аналізу впливу деградації системи ДБЛ (втрата одного маяка) розглянемо більш детально роботу інтегрованої системи у базовій конфігурації з чотирма маяками. Графіки змінювання у часі параметрів руху об'єкта, розрахованих за різними даними, наведено на рис. 4.10.

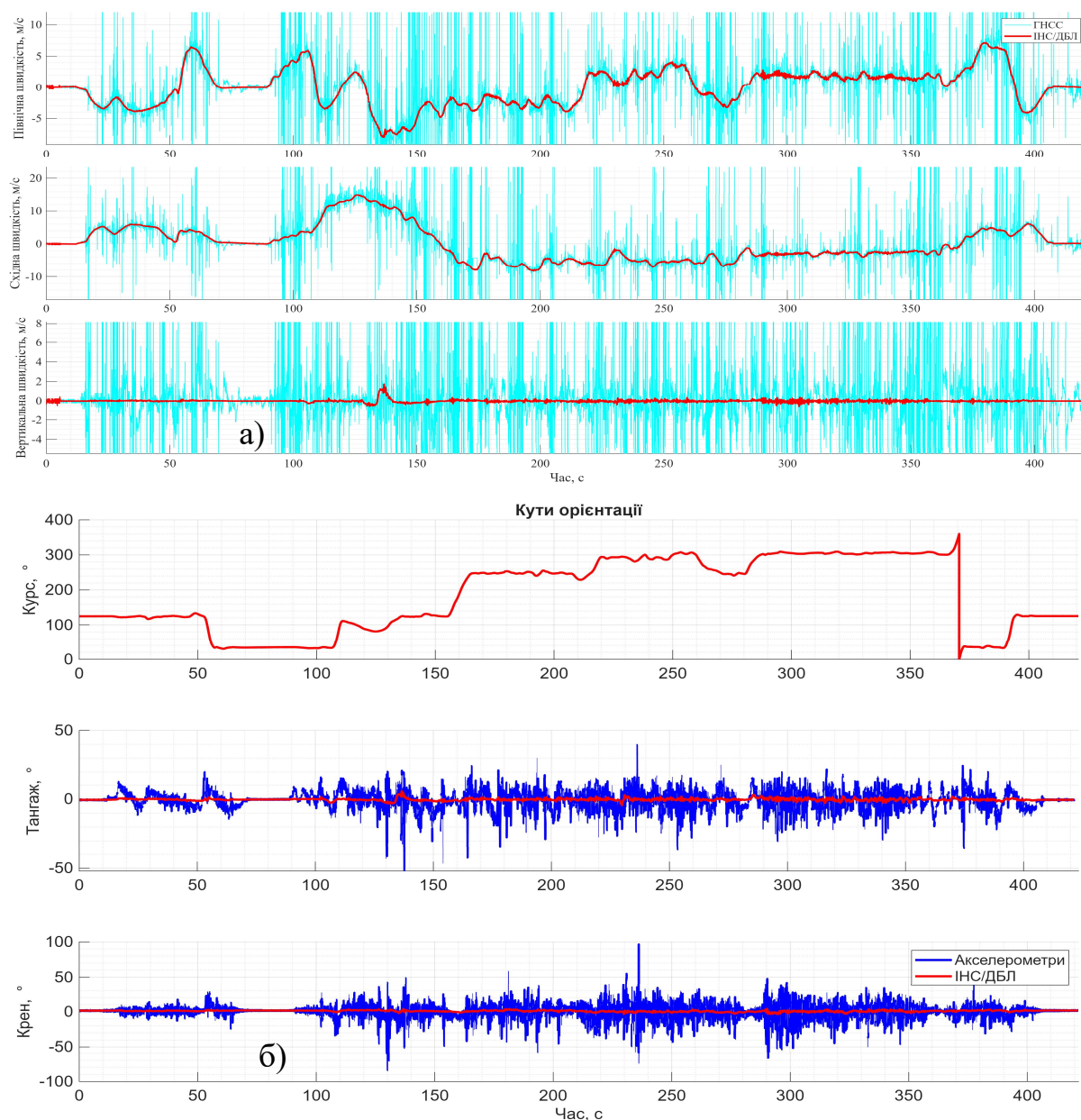


Рис. 4.10. Розраховані параметри руху об'єкта: а) проекції швидкості в ГСК з ГНСС (ціанові криві) та з ІНС/ДБЛ (червоні криві); б) кути орієнтації за ІНС/ДБЛ (червоні криві) та визначені за сигналами акселерометрів (сині криві)

Порівняльний аналіз наведених на рис. 4.10,а залежностей проекцій швидкості в ГСК, отриманих за даними ГНСС та ІНС/ДБЛ, показує відсутність дрейфу швидкостей ІНС та їх згладжений характер в порівнянні з ГНСС.

На рис. 4.10,б наведено залежності кутів орієнтації, визначених ІНС з корекцією за вимірюваннями дальностей ДБЛ. Зміна кута курсу відображає характер руху на маршруті та послідовність маневрів (прямолінійні ділянки й повороти).

Кути тангажу та крену протягом всього руху змінюються в межах кількох градусів, що є типовим для автомобіля. Застосування корекції за дальностями ДБЛ забезпечує стабільність рішення орієнтації та узгодженість динаміки кутів із реальним характером руху.

Для аналізу ефективності інтегрованої системи ІНС/ДБЛ виконано порівняння між розв'язками ІНС/ДБЛ та реальної системи INS-B з корекцією від ГНСС (INS-B/ГНСС) які наведено на рис. 4.11.

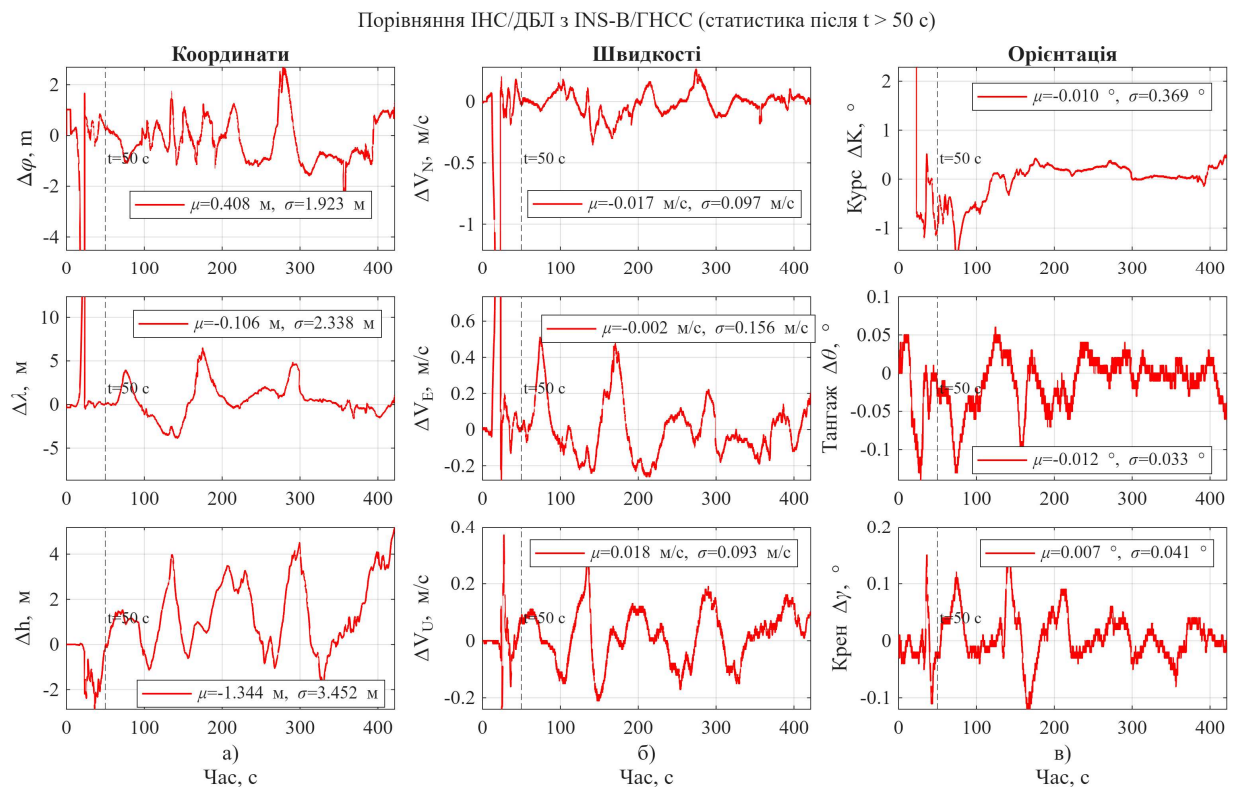


Рис. 4.11. Залежності від часу різниці між навігаційними розв'язками ІНС/ДБЛ і INS-B/ГНСС для координат, швидкостей і кутів орієнтації

Обчислення статистики для різниці між розв'язками ІНС/ДБЛ – INS-B/ГНСС виконано на інтервалі часу $t > 50$ с. Як видно з наведених графіків, інтегрований навігаційний розв'язок ІНС/ДБЛ підтверджує узгодженість з даними INS-B/ГНСС.

Додатково на рис. 4.12 наведено оцінки зсувів нуля гіроскопів $b_{\omega x}$, $b_{\omega y}$, $b_{\omega z}$ та акселерометрів b_{ax} , b_{ay} , b_{az} ІВМ, отримані фільтром Калмана під час проведення фізичного моделювання.

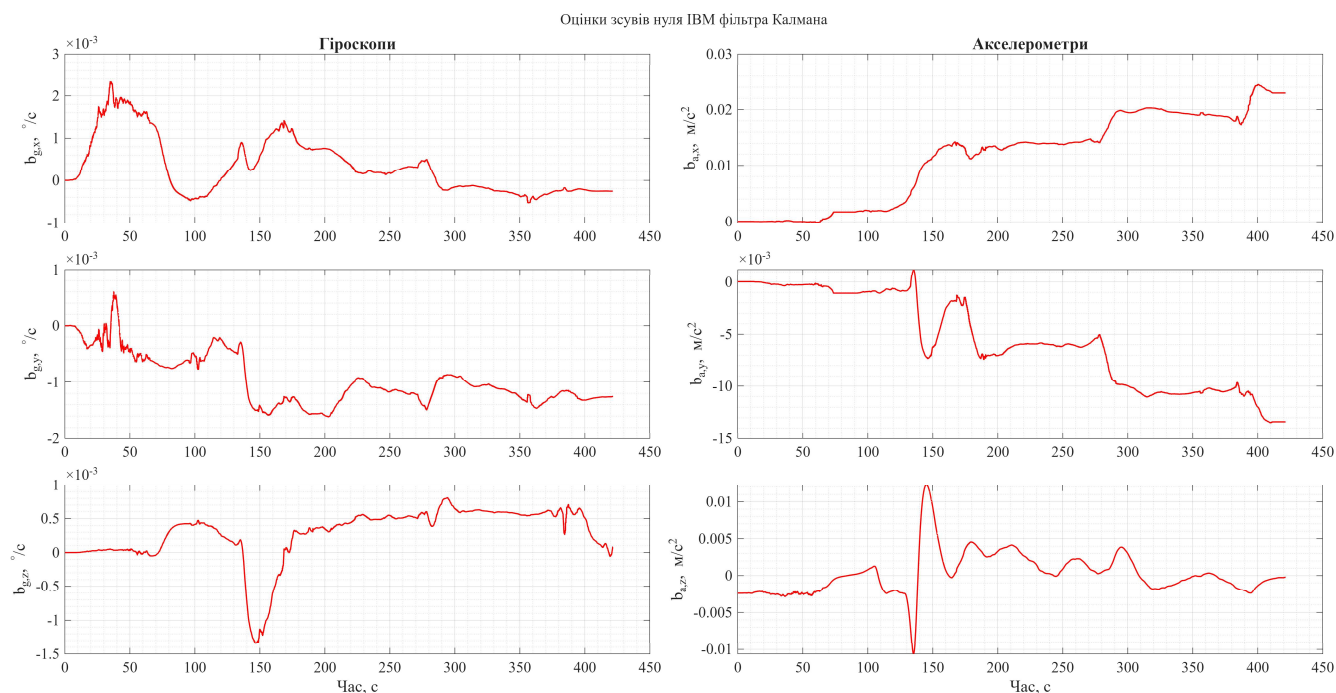


Рис. 4.12. Оцінки зсувів нуля сенсорів ІВМ фільтром Калмана

Подання цих оцінок дозволяє показати роботу алгоритму ідентифікації та нестабільність похибок сенсорів ІВМ у реальних умовах руху об'єкта за складною траєкторією. Наведені на рис. 4.12 результати підтверджують, що фільтр Калмана не лише виконує корекцію навігаційних параметрів за ДБЛ, але й забезпечує оцінювання зсувів нуля сенсорів ІВМ, що є необхідним для зменшення систематичних складових похибок і підвищення точності для навігаційного розв'язку. В додатку Г (рис. Г.5) наведено графіки змінювання в часі діагональних елементів матриці коваріації в ФК.

Проведене фізичне моделювання дозволило не лише підтвердити ефективність алгоритмів комплексування інерціальної навігаційної системи з системою ДБЛ, а й повноцінно перевірити працездатність системи візуалізації, розробленої у середовищі Node-RED. На рис. 4.13 наведено результати роботи системи візуалізації, відкритої у веббраузері «Google Chrome», в режимі реального часу для комплексованого рішення INS-B з корекцією від даних ГНСС під час проведення тесту. Графічний інтерфейс користувача забезпечує відображення маршруту руху на мапі (червоний для INS-B та ціановий для ГНСС), що дозволяє оператору порівнювати дані з різних джерел.

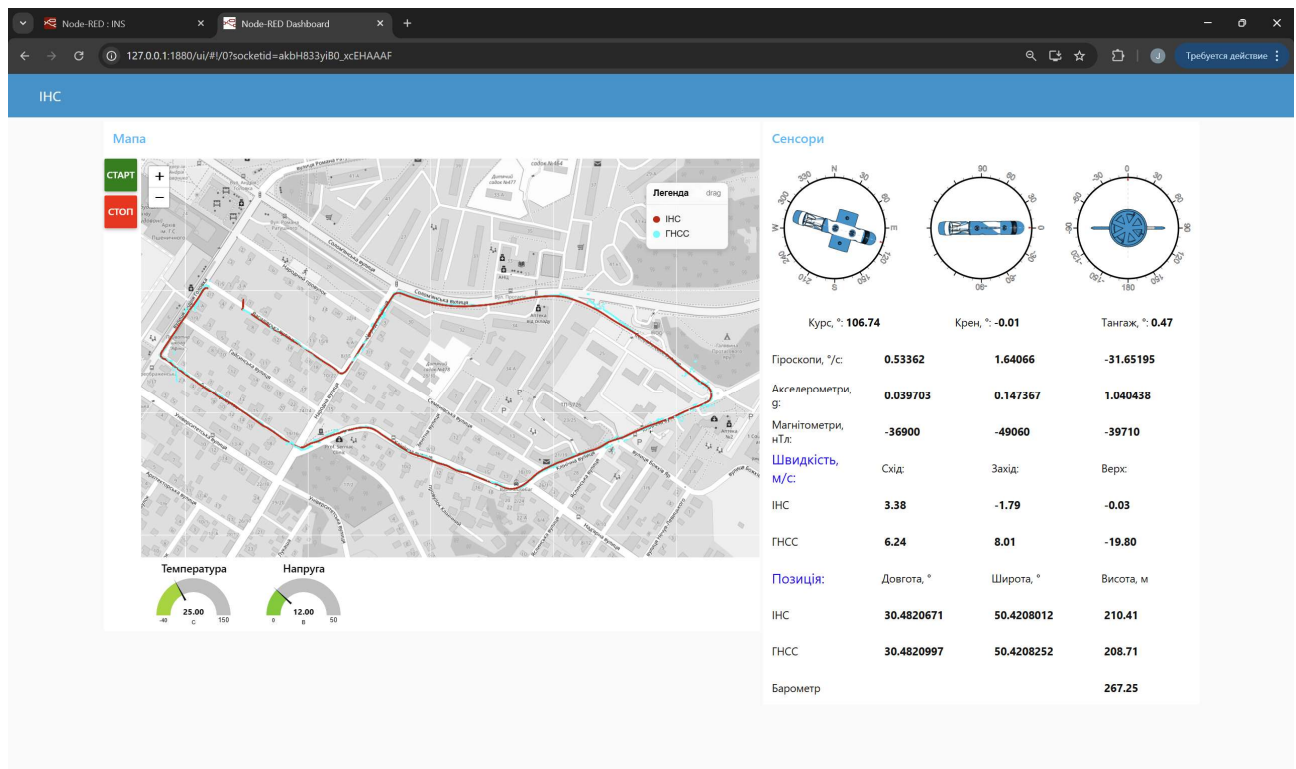


Рис. 4.13. Візуалізація результатів роботи комплексованої системи INS-B/ГНСС, розробленої у середовищі Node-RED

Скалярна та векторна графіка кутів орієнтації змінюється відповідно до відображених цифрових значень. Розроблений інтерфейс у середовищі Node-RED продемонстрував стійку та безперебійну роботу. Він забезпечує оператору повну інформацію щодо поточного стану АБПА, що дає змогу оперативно реагувати на зміни динаміки руху або відхилення в роботі бортових систем.

Таким чином, результати проведених досліджень підтверджують, що комплексування ІНС та системи ДБЛ забезпечує допустимі похибки визначення навігаційних параметрів АБПА, що дозволяє здійснювати їх подальшу передачу в систему візуалізації руху, розроблену у середовищі Node-RED.

Висновки до Розділу 4

1. Для дослідження можливості забезпечення точності визначення навігаційних параметрів шляхом глибокого комплексування ІНС та системи довгої базової

лінії побудовано лінеаризовану модель похибок ІНС у просторі станів для каналів визначення кутів орієнтації, складових швидкості та координат місцеположення АБПА, а також для похибок ІВМ у вигляді зміщень нулів гіроскопів і акселерометрів за припущення про гауссівський білий шум у якості випадкових завад при вимірюваннях. У результаті запропоновано та обґрунтовано використання 15-компонентного вектора стану, як компромісу між обчислювальною складністю та повнотою опису похибок.

2. Для зменшення накопичених похибок визначення навігаційних параметрів запропоновано та обґрунтовано комплексування ІНС з системою ДБЛ, що використовує три або більше транспондерів, які розміщуються у відомих місцях на дні під водою. Сформовано модель вимірювань системи ДБЛ у вигляді різниці вимірювань розрахованої дальності ІНС і дальності системи ДБЛ.

3. Розроблено дискретну процедуру оцінювання похибок ІНС фільтром Калмана, за результатами якого реалізовано корекцію ІНС за принципом зворотного зв'язку через внесення поправок у координати, швидкості, орієнтацію та оцінки зміщень нулів ІВМ. Встановлено, що з урахуванням різниці частот роботи ІНС та надходження корекційних вимірювань ДБЛ поправки для координат і швидкостей, сформовані фільтром Калмана, доцільно вводити не одноразово, а розподіляти на кроках інтегрування ІНС у межах інтервалу між двома оновленнями ДБЛ із використанням коефіцієнта узгодження частот.

4. Для глибокого комплексування ІНС та системи ДБЛ з використанням фільтра Калмана розроблено та обґрунтовано такі узагальнені структурно-функціональні схеми:

- схема для формування вимірювань, за якою відбувається процес формування вектора поправок стану δX на основі порівняння реальних вимірювань дальності з ДБЛ та розрахункових даних з ІНС;

- схема реалізації навігаційного алгоритму з корекцією, в якій реалізовано замкнений контур корекції ІНС за оцінками похибок, що формуються фільтром Калмана.

Розроблені схеми забезпечують процедури формування вимірювань, геометричні перетворення координат, розрахунок дальності та вектора візування, формування матриці вимірювань, оцінювання компонент вектора стану (похибок) і введення поправок, що забезпечує однозначне трактування інформаційних зв'язків між підсистемами у замкненому контурі.

5. Виконано імітаційне моделювання ІНС/ДБЛ з віртуальною мережею з чотирьох донних маяків та з урахуванням випадкової завади визначення дальності. В результаті встановлено, що на розглянутому часовому інтервалі розроблений алгоритм комплексування є працездатним:

- стабілізуються похибки визначення координат і складових швидкостей;
- фільтр Калмана забезпечує ідентифікацію зміщень нулів гіроскопів, заданих у моделі.

Виявлено, що зсуви нуля акселерометрів мають нижчу спостережуваність, а отримане ненульове зміщення курсу свідчить про доцільність використання додаткових засобів корекції курсового каналу при використанні ДБЛ.

6. Проведено фізичне моделювання інтегрованого комплексу ІНС/ДБЛ на основі реального наземного експерименту з використанням IBM INS-B із частотою 200 Гц, та формуванням «віртуальних» дальностей ДБЛ за координатами ГНСС і відомим місцеположенням маяків, які подавались у фільтр Калмана з частотою 1 Гц. Така постановка дозволила оцінити роботу інтегрованої ІНС/ДБЛ з урахуванням особливостей програмної реалізації, ефектів дискретизації та можливих затримок обробки.

В результаті проведеного фізичного моделювання встановлено:

- метод і алгоритм комплексування ІНС/ДБЛ є стійким до деградації геометрії ДБЛ, зменшення похибок визначення навігаційних параметрів відбувається як для базової конфігурації системи ДБЛ (4 маяки), так і сценаріїв з трьома маяками за умови виключення з розгляду одного маяка;
- навігаційний розв'язок залишається стабільним і відтворює траєкторію руху без суттєвих спотворень її геометрії: у базовому режимі траєкторія ІНС/ДБЛ

узгоджується з контрольними вимірюваннями INS-B/ГНСС на всій ділянці маршруту, а у режимі трьох маяків траєкторії зберігають загальну форму базового розв'язку, проте локальні розбіжності зростають на ділянках маневрування;

- розраховані параметри координат, трьох складових швидкостей в ГСК, кутів курсу, крену і тангажу під час проведення тесту в INS-B/ГНСС узгоджуються з результатами моделювання ІНС/ДБЛ;

- локальні відхилення траєкторії зумовлені погіршенням геометрії ДБЛ, зменшенням надлишковості вимірювань, а також похибками ГНСС в умовах міської забудови;

- працездатність підсистеми візуалізації, реалізованої в середовищі Node-RED, що підтверджує готовність програмно-апаратного комплексу до подальших натурних випробувань.

7. Результати досліджень підтвердили можливість забезпечення прийнятної точності визначення навігаційних параметрів шляхом глибокого комплексування ІНС та системи ДБЛ у модулі визначення орієнтації та параметрів руху інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, що сприятиме як ефективному виконанню заданих маневрів апарату, так і коректному відображенню місцеположення і навігаційних параметрів АБПА в системі візуалізації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення точності визначення та забезпечення передачі і відображення в реальному часі параметрів руху (кутів орієнтації, складових швидкості та координат місцеположення) автономного безпілотного підводного апарата класу міні/мікро інтегрованим навігаційним комплексом з розробленою системою візуалізації.

1. На основі аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку автономних безпілотних підводних апаратів і систем забезпечення їх руху встановлено, що існуючі системи візуалізації орієнтовані переважно на габаритні АБПА або дистанційно керовані апарати та не враховують специфіку мікро- і міні-АБПА, зокрема обмежену точність МЕМС-інерціальних вимірювальних модулів, особливості гідроакустичного каналу зв'язку та вплив часових затримок на точність відображення навігаційних параметрів. Обґрунтовано необхідність розробки системи візуалізації як невід'ємної складової інтегрованого навігаційного комплексу АБПА для автономної орієнтації та навігації АБПА в різних режимах його руху, передачі-прийому та відображення даних про місцезнаходження і параметри руху АБПА на пристроях базової станції.

2. Запропоновано та обґрунтовано узагальнену функціональну схему інтегрованого навігаційного комплексу АБПА, до складу якого входять технічні та програмних засоби орієнтації, навігації, задання та виконання режимів руху і місії в цілому, визначення, передачі та відображення на борту судна-носія інформації про поточне місцезнаходження АБПА та параметри його руху, реалізації дистанційного керування апаратом. Узагальнена функціональна схема відображає взаємодію навігаційної, керуючої та вимірювальних підсистем, а також системи візуалізації як функціонально пов'язаної складової комплексу. Сформовано вимоги до складу навігаційно-телеметричних даних і до архітектури системи візуалізації.

3. Розроблено методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення системи візуалізації руху АБПА з використанням технології Інтернету речей у середовищі візуального програмування потоків даних Node-RED, яке забезпечує приймання, обробку, передачу та відображення навігаційно-телеметричних даних та траєкторії

апарата в реальному часі. Результат розробки системи візуалізації представлено як інтерактивний операторський інтерфейс для моніторингу місцеположення та параметрів руху апарата.

4. Створено математичну модель руху АБПА за складною (коловою) траєкторією та виконано імітаційне моделювання сигналів інерціального вимірювального модуля та навігаційної системи без врахування та з урахуванням випадкових завад інерційних сенсорів тактичного класу. В результаті встановлено, що для еталонних сигналів сенсорів похибки визначення параметрів руху ІНС мають малі значення, які обумовлені чисельним інтегруванням. Для сигналів, спотворених випадковими завадами, встановлено залежності накопичених похибок параметрів руху та параметрів траєкторії, які демонструють, що автономна робота ІНС без зовнішньої корекції призводить до значного накопичення похибок визначення кутів орієнтації, швидкості та координат місцеположення, що унеможлиблює коректну візуалізацію руху АБПА на тривалих часових інтервалах.

5. Виконано аналіз впливу часових затримок передачі навігаційних даних у гідроакустичному каналі на точність відображення параметрів руху АБПА в системі візуалізації. Встановлено лінійний характер залежності похибок візуалізації від величини затримки та швидкості руху апарата, що підтвердило необхідність комплексного урахування похибок ІНС і похибок передачі даних.

6. Запропоновано, обґрунтовано та розроблено алгоритми зовнішньої корекції інерціальної навігаційної системи шляхом глибокого комплексування з акустичною системою довгої базової лінії на основі непрямого фільтра Калмана у просторі похибок. Для алгоритму сформовано 15-компонентний вектор стану, що забезпечує достатню повноту опису похибок за прийнятною обчислювальною складністю. Розроблено структурно-функціональні схеми формування вимірювань та реалізації навігаційного алгоритму із замкненим контуром корекції, які формалізують процес оцінювання похибок, введення поправок у координати, швидкості та орієнтацію ІНС і забезпечують однозначне трактування інформаційних зв'язків між ІНС і системою довгої базової лінії.

В результаті проведеного імітаційного та фізичного моделювання інтегрованого комплексу ІНС/ДБЛ підтверджено працездатність і стійкість розробленого алгоритму комплексування, зменшення накопичення похибок навігаційних параметрів, стабільність навігаційного розв'язку при деградації геометрії системи ДБЛ, коректність відображення траєкторії руху та навігаційних параметрів АБПА в розробленій системі візуалізації.

7. Отримані наукові та практичні результати можуть бути використані при проєктуванні інтегрованих навігаційних комплексів та систем візуалізації руху автономних безпілотних підводних апаратів класу міні/мікро, а також слугувати базовою платформою для подальшого розширення функціоналу, зокрема інтеграції додаткових навігаційних сенсорів і створення систем дистанційного моніторингу груп АБПА. Результати дисертаційного дослідження використані у науково-дослідній та дослідно-конструкторській діяльності ТОВ «ІНЕРШІАЛ ЛЕБЗ ЮЕЙ» (м.Київ), що підтверджується Актом впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Н. І. Бурау, Л. Л. Яцко, М. Д. Расулов та В. С. Бобрик, «Огляд стану сучасних автономних безпілотних підводних апаратів», *Вісник інженерної академії України*, pp. 12-17, 2017.
- [2] M. Jahanbakht, W. Xiang, L. Hanzo та M. R. Azghadi, «Internet of underwater things and big marine data analytics—a comprehensive survey», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021.
- [3] Y. Yang, Y. Xiao та T. Li, «A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021.
- [4] E. Petritoli та F. Leccese, «Autonomous underwater glider: A comprehensive review», *Drones*, 2024.
- [5] H. Zhang, S. Zhang, Y. Wang, Y. Liu, Y. Yang, T. Zhou та H. Bian, «Subsea pipeline leak inspection by autonomous underwater vehicle», *Applied Ocean Research*, 2021.
- [6] M. Bjerkeng, T. Kirkhus, W. Caharija, J. T. Thielemann, H. B. Amundsen, S. J. Ohrem та E. I. Grøtli, «ROV navigation in a fish cage with laser-camera triangulation», *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021.
- [7] W. Pan, Y. Wang, B. Lv, L. Wang та L. Li, «Research on multi-UUV mission planning for mine countermeasures based on preferred multi-objective optimization», *Ain Shams Engineering Journal*, 2024.
- [8] G. Fan, X. Liu, Y. Hao, G. Yin та L. He, «Optimized Hydrodynamic Design for Autonomous Underwater Vehicles», *Machines*, 2025.
- [9] L. A. Bush, L. Blackmore та B. C. Williams, «AUV bathymetric mapping depth planning for bottom following spline linear programming algorithm», в *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, 2016.

- [10] Y. Zhang, B. Kieft, B. W. Hobson, B. Y. Raanan, W. I. Ussler та C. M. Preston, «Using a long-range autonomous underwater vehicle to find and sample harmful algal blooms in Lake Erie,» *Limnology and Oceanography: Methods*, 2024.
- [11] Q. Zhong, N. Bose, J. Hwang та T. Zou, «Exploring the potential of autonomous underwater vehicles for microplastic detection in marine environments: A systematic review,» *Drones*, 2025.
- [12] J. Keane, K. F. Joiner, S. Arulampalam та R. Webber, «Expediting recovery of autonomous underwater vehicles in dynamic mission environments: A system-of-systems challenge for underwater warfare,» *Journal of Field Robotics*, 2022.
- [13] A. A. Dalhatu, A. M. Sa'ad, R. Cabral de Azevedo та G. De Tomi, «Remotely operated vehicle taxonomy and emerging methods of inspection, maintenance, and repair operations: An overview and outlook,» *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2023.
- [14] «Q1 2021 company presentation: Fast, cost-effective AUV survey solutions,» 2021.
- [15] Q. Ding, L. Ye, H. Chen, H. Liu, A. Liang та W. Cui, «AUV Intelligent Decision-Making System Empowered by Deep Learning: Evolution, Challenges and Future Prospects,» 2025.
- [16] S. Fan, N. Bose та Z. Liang, «Polar AUV challenges and applications: a review,» *Drones*, 2024.
- [17] C. J. Peck, K. Langedock, W. Boone, F. Fourie, I. Moulaert, A. Semeraro та L. Ponsoni, «The use of autonomous underwater vehicles for monitoring aquaculture setups in a high-energy shallow water environment: Case study Belgian North Sea,» *Frontiers in Marine Science*, 2024.
- [18] G. Woźniak, S. Bhat та I. Stenius, «Using Reinforcement Learning for Hydrobatic Maneuvering with Autonomous Underwater Vehicles,» в *OCEANS 2024, Singapore*, 2024.

- [19] D. Ma, Y. Li, T. Ma та A. M. Pascoal, «The state of the art in key technologies for autonomous underwater vehicles: A review,» *Engineering*, 2025.
- [20] S. Bhat, I. Stenius та T. Miao, «Real-time flight simulation of hydrobatic AUVs over the full 0° – 360° envelope,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021.
- [21] S. Bhat, «Hydrobatatics: Efficient and Agile Underwater Robots,» Stockholm, 2021.
- [22] J. Neira, A. López, L. Riaño та P. Sanz, «Review on unmanned underwater robotics: Structure designs, materials, sensors, actuators, and navigation control,» *Journal of Robotics*, 2021.
- [23] L. Paull, S. Saeedi, M. Seto та H. Li, «AUV navigation and localization: A review,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013.
- [24] D. Fenucci, F. Fanelli, A. Consensi, G. Salavasidis, M. Pebody та A. B. Phillips, «A multi-platform guidance, navigation and control system for the Autosub family of autonomous underwater vehicles,» *Control Engineering Practice*, 2024.
- [25] «SeeTrack v4 - Technical Whitepaper,» n.d..
- [26] B. Zhang, D. Ji, S. Liu, X. Zhu та W. Xu, «Autonomous underwater vehicle navigation: A review,» *Ocean Engineering*, 2023.
- [27] P. D. Groves, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Artech House, 2013.
- [28] P. D. Groves, «Navigation using inertial sensors,» *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2015.
- [29] A. Noureldin, T. B. Karamat та J. Georgy, «Basic navigational mathematics, reference frames and the earth's geometry,» в *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*, Berlin, Springer, 2012.

- [30] F. F. Sørensen, C. Mai, M. von Benzon, J. Liniger та S. Pedersen, «The localization problem for underwater vehicles: An overview of operational solutions,» *Ocean Engineering*, т. 330, р. 121173, 30 6 2025.
- [31] В. В. Мелешко та О. І. Нестеренко, Безплатформені інерційні навігаційні системи, 2011.
- [32] A. Tal, I. Klein та R. Katz, «Inertial Navigation System/Doppler Velocity Log (INS/DVL) Fusion with Partial DVL Measurements,» *Sensors*, 2017.
- [33] X. Mu, G. Yue, N. Zhou та C. Chen, «Occupancy grid-based AUV SLAM method with forward-looking sonar,» *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022.
- [34] M. Morgado, P. Oliveira та C. Silvestre, «Tightly coupled ultrashort baseline and inertial navigation system for underwater vehicles,» *Journal of Field Robotics*, 2013.
- [35] N. Shaukat, A. Ali, M. Javed Iqbal, M. Moinuddin та P. Otero, «Multi-Sensor Fusion for Underwater Vehicle Localization by Augmentation of RBF Neural Network and Error-State Kalman Filter,» *Sensors*, 2021.
- [36] K. W. Kolodziej та J. Hjelm, Local positioning systems: LBS applications and services, CRC Press, 2017.
- [37] D. K. Meduna, "Terrain relative navigation for sensor-limited systems with application to underwater vehicles," Stanford University, Stanford, CA, 2011.
- [38] Y. Han, B. Wang, Z. Deng та M. Fu, «A combined matching algorithm for underwater gravity-aided navigation,» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017.
- [39] A. R. Gidugu, B. N. J. Vandavasi та V. Narayanaswamy, «Bio-inspired machine-learning aided geo-magnetic field based AUV navigation system,» *Scientific Reports*, 2024.

- [40] Z. Yan, L. Hao, Y. Wang ta T. Chen, «A Terrain-Following Control Method for Autonomous Underwater Vehicles with Single-Beam Sensor Configuration,» *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024.
- [41] J. González-García, A. Gómez-Espinosa, E. Cuan-Urquizo, L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez ta J. A. Escobedo Cabello, «Autonomous underwater vehicles: Localization, navigation, and communication for collaborative missions,» *Applied Sciences*, 2020.
- [42] Y. Liu, Y. Zhang, Z. Li ta S. Li, «Terrain-Aided Navigation System with Relocation Item for AUV in Arctic,» *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- [43] G. Chen, G. Du ta C. Yang, «An underwater visual SLAM system with adaptive image enhancement,» *Ocean Engineering*, 2025.
- [44] Z. Xin, «ULL-SLAM: Underwater low-light enhancement for the front-end of visual SLAM,» *Frontiers in Marine Science*, 2023.
- [45] B. Liu, Y. Huang ta H. Feng, «A review of AUV-based bathymetric SLAM technology,» *Ocean Engineering*, 2025.
- [46] Y. Qu, Q. Zhang, X. Xiang, S. Yang ta L. Cai, «Cascaded guidance, state estimation, and control for depth tracking of underactuated autonomous underwater vehicles,» *Communications Engineering*, 2025.
- [47] L. Degorre, E. Delaleau ta O. Chocron, «A survey on model-based control and guidance principles for autonomous marine vehicles,» *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023.
- [48] L. He, M. Xie ta Y. Zhang, «A Review of Path Following, Trajectory Tracking, and Formation Control for Autonomous Underwater Vehicles,» *Drones*, 2025.
- [49] S. Fan, H. Wang, C. Zuo ta J. Han, «Fuzzy Adaptive PID-Based Tracking Control for Autonomous Underwater Vehicles,» *Actuators*, 2025.

- [50] S. Bhat та I. Stenius, «Hydrobatics: A review of trends, challenges and opportunities for efficient and agile underactuated AUVs,» в *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*, 2018.
- [51] L. D. Barker, "Scientific challenges and present capabilities in underwater robotic vehicle design and navigation for oceanographic exploration under-ice," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 16, p. 2588, 2020.
- [52] Gallimore, E., Partan, J., Vaughn, I., Singh, S., Shusta, J. та Freitag, L., «The WHOI micromodem-2: A scalable system for acoustic communications and networking,» в *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, Seattle, 2010.
- [53] «18/34 Devices | EvoLogics,» [Онлайновый]. Available: <https://www.evologics.com/acoustic-modem/18-34>.
- [54] «Acoustic Modems,» [Онлайновый]. Available: <https://www.teledynemarine.com/brands/benthos/acoustic-modems>.
- [55] J. An, H. Ra, C. Youn та K. Kim, «Experimental results of underwater acoustic communication with nonlinear frequency modulation waveform,» *Sensors*, т. 21, № 21, p. 7194, 2021.
- [56] J. Wang, C. Yuen, Y. L. Guan та F. Ge, «Reinforcement learning-based link adaptation in long delayed underwater acoustic channel,» в *MATEC Web of Conferences*, 2019.
- [57] Acoustic Communications Group, «Micromodem-2 User's Guide,» 2018.
- [58] P. Otero, Á. Hernández-Romero, M.-Á. Luque-Nieto та A. Ariza, «Underwater Positioning System Based on Drifting Buoys and Acoustic Modems,» *Journal of Marine Science and Engineering*, т. 11, № 4, p. 682, 2023.
- [59] C. Alexandris, P. Papageorgas та D. Piromalis, «Positioning Systems for Unmanned Underwater Vehicles: A Comprehensive Review,» *Applied Sciences*, т. 14, № 21, p. 9671, 2024.

- [60] Y. S. M. Simamora, H. A. Tjokronegoro, E. Leksono та I. S. Brodjonegoro, «Compensation of time-varying clock-offset in a LBL navigation,» *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, т. 9, № 4, p. 1364–1372, 2020.
- [61] Y. S. M. Simamora, H. A. Tjokronegoro, E. Leksono та I. S. Brodjonegoro, «Compensation of INS/LBL Navigation Errors in a Polynomial Sound-Speed-Profile,» *Journal of Engineering and Technological Sciences*, т. 54, № 2, p. 220211, 2022.
- [62] D. A. Robb, J. S. Willners, N. Valeyrie, F. J. Chiyah Garcia, A. Laskov, X. Liu, P. Patron, H. Hastie та Y. R. Petillot, «A Natural Language Interface with Relayed Acoustic Communications for Improved Command and Control of AUVs,» 08 11 2018. [Онлайновий]. Available: <https://arxiv.org/abs/1811.03566>.
- [63] Z. Luo, X. Xiang та Q. Zhang, «Autopilot System of Remotely Operated Vehicle Based on Ardupilot,» Cham, 2019.
- [64] C. Edge, «Design and Experiments with LoCO AUV: A Low Cost Open-Source Autonomous Underwater Vehicle,» 2020.
- [65] C. A. Zuluaga, L. M. Aristizábal, S. Rúa, D. A. Franco, D. A. Osorio та R. E. Vásquez, «Development of a modular software architecture for underwater vehicles using systems engineering,» *Journal of Marine Science and Engineering*, т. 10, № 4, p. 464, 2022.
- [66] EIVA, «EIVA launches a complete software solution for ROV steering,» 2023. [Онлайновий]. Available: <https://www.eiva.com/about/eiva-log/eiva-launches-a-complete-software-solution-for-rov-steering>. [Дата звернення: 14 5 2023].
- [67] M. C. Jayasinghe, «Graphical User Interface for the Supervisory Motion Control of BlueROV1.1,» 2018.
- [68] Andrew, «A different approach to controlling the Bluerov2,» 2017. [Онлайновий]. Available: <https://discuss.bluerobotics.com/t/a-different-approach-to-controlling-the-bluerov2/3072>. [Дата звернення: 14 5 2023].

- [69] Oceanbotics, «Integrated SubNav™ Software | SRV-8 ROV | RJE Oceanbotics,» 2023. [Онлайновий]. Available: <https://www.oceanbotics.com/sub-nav/>. [Дата звернення: 14 5 2023].
- [70] Greensea Systems, Inc., «Connecting the Marine Industry: The Greensea System,» Geo-matching, 2019. [Онлайновий]. Available: <https://cdn.geo-matching.com/EnkLdWp5.pdf>. [Дата звернення: 7 12 2025].
- [71] Seabotix, «SmartFlight 2.0 - Control software by Seabotix | NauticExpo,» 2023. [Онлайновий]. Available: <https://www.nauticexpo.com/prod/seabotix/product-25474-578444.html>. [Дата звернення: 14 5 2023].
- [72] C. Brew та D. Lane, «CSE 145/237D Embedded Systems Design Project,» Kastner Research Group, UC San Diego, 2014.
- [73] X. Zhang, «Design and Implementation of Autonomous Underwater Vehicle Simulation System Based on MOOS and Unreal Engine,» *Electronics*, т. 12, № 14, р. 3107, 2023.
- [74] Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), «LSTS Toolchain,» [Онлайновий]. Available: <https://lsts.fe.up.pt/toolchain>.
- [75] D. Langer, «Interactive hyperspectral data inspection during field operations,» в *WHISPERS 2022*, 2022.
- [76] A. Martorell-Torres, E. Guerrero-Font, J. Guerrero-Sastre та G. Oliver-Codina, «Xiroi II, an Evolved ASV Platform for Marine Multirobot Operations,» *Sensors (Basel)*, т. 23, № 1, р. 109, 22 12 2022.
- [77] M. Villa, Vallicrosa, G., Aaltonen, J., Ridao, P. та Koskinen, K. T., «Model-based Guidance, Navigation and Control architecture for an Autonomous Underwater Vehicle,» Biloxi, 2020.
- [78] Kongsberg Maritime, «University of Gothenburg selects HUGIN AUV to expand autonomy in marine research (mentions HUGIN Operator Station, HOS),» 2017. [Онлайновий]. Available: <https://www.kongsberg.com/maritime/news-and->

media/news-archive/2017/university-of-göthenburg-selects-hugin-auv-to-expand-autonomy-in-marine-research/.

- [79] Kongsberg Maritime, «HUGIN AUV – product page,» [Онлайновий]. Available: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/hugin-auv/>.
- [80] K. B. Ånonsen, «The HUGIN AUV Terrain Navigation Module,» 2011.
- [81] SeeByte Ltd., «Multi-Domain C2 Software for Deep-Water AUV / Kongsberg's HUGIN AUV sports SeeByte software,» 10 10 2022. [Онлайновий]. Available: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/>.
- [82] G. Griffiths, Technology and applications of autonomous underwater vehicles, Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [83] National Research Council, Undersea vehicles and national needs, Washington, DC: National Academies Press, 1996.
- [84] Cruz, N. A., Matos, A. C., Almeida, R. M. та Ferreira, B. M., «DART—A portable deep water hovering AUV,» в *OCEANS 2017 - Anchorage*, Anchorage, 2017.
- [85] Zhang, G., Lin, Y., Huang, J., Hong, L. та Wang, X., «Hydrodynamic Coefficient Estimation of Small Autonomous Underwater Vehicle,» в *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Cham, 2021.
- [86] X. Mu, B. He, S. Wu, X. Zhang, Y. Song та T. Yan, «A practical INS/GPS/DVL/PS integrated navigation algorithm and its application on Autonomous Underwater Vehicle,» *Applied Ocean Research*, 2021.
- [87] Н. І. Бурау та Є. О. Золотарьов, «Системи візуалізації руху безпілотних підводних апаратів,» *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 34 (73), № 3, р. 83–89, 2023.
- [88] Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Моделювання колового руху автономного безпілотного підводного апарату та сигналів датчиків інерціальної навігаційної системи,» *Електронне моделювання*, т. 47, № 1, р. 116–132, 2025.

- [89] Н. І. Бурай та Є. О. Золотарьов, «Інтегрований навігаційний комплекс автономного безпілотного підводного апарату,» в *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси*, Київ, 2025.
- [90] S. Bhat, D. Panteli, I. Stenius та D. V. Dimarogonas, «Nonlinear model predictive control for hydrobatics: Experiments with an underactuated AUV,» *Journal of Field Robotics*, т. 40, № 7, pp. 1840-1859, 2023.
- [91] M. von Benzon, F. F. Sørensen, E. Uth, J. Jouffroy, J. Liniger та S. Pedersen, «Control of a BlueROV2 Underwater Robot: An Open-Source Benchmark Simulator,» *Journal of Marine Science and Engineering*, т. 10, № 12, p. 1898, 2022.
- [92] L. Lin, Y. Chen, H. Xiong, C. Yu, H. Zhu, Y. Xing та G. Zheng, «Hydrodynamics Model Identification and Model-Based Control Application of a New Type of AUV,» *Journal of Marine Science and Engineering*, т. 13, № 2, p. 310, 2025.
- [93] M. Chen, Y. Liu, D. Zhu, A. Shen, C. Wang та K. Ji, «Parameter identification of an open-frame underwater vehicle based on numerical simulation and quantum particle swarm optimization,» *Intelligence & Robotics*, т. 4, pp. 216-229, 2024.
- [94] T. Praczyk та K. Naus, «Design of software for underwater vehicles operating in a swarm,» *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, т. 18, № 2, pp. 273-279, 2024.
- [95] M. Benjamin та T. Schneider, «MOOS-IvP,» [Онлайновий]. Available: <https://github.com/moos-ivp/moos-ivp>. [Дата звернення: 18 12 2025].
- [96] J. Braga, R. Martins та P. Calado, «LSTS DUNE,» [Онлайновий]. Available: <https://github.com/LSTS/dune>. [Дата звернення: 18 12 2025].
- [97] J. Borges de Sousa, «Evaluation and Testing in Operational Environments: Accelerating Development Cycles for Maritime Unmanned Systems,» *Journal of Marine Science and Engineering*, т. 13, № 1, p. 51, 2025.

- [98] Є. О. Золотарьов, «Методи передачі та відображення інформації про рух безпілотного підводного апарату,» в *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»*, Київ, 2023.
- [99] Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Затримки передачі даних у гідроакустичних системах зв'язку автономних безпілотних підводних апаратах,» в *5th International Scientific and Practical Conference «Research in Science, Technology and Economics»*, Люксембург, 2025.
- [100] «Example of parsing data of the OPVT and OPVT2AHR data formats,» 2023. [Онлайновий]. Available: <https://inertiallabs.com/example-of-parsing-data-of-the-opvt-and-opvt2ahr-data-formats/>.
- [101] T. Theocharidis та E. Kavallieratou, «Underwater communication technologies: a review,» *Telecommunication Systems*, т. 88, p. 54, 2025.
- [102] S. Duangsuwan та K. Klubsuwan, «Underwater Drone-Enabled Wireless Communication Systems for Smart Marine Communications: A Study of Enabling Technologies, Opportunities, and Challenges,» *Drones*, т. 9, № 11, p. 784, 2025.
- [103] A. Ameri, B. Çürüklü, B. Miloradović та M. Ekström, «Planning and Supervising Autonomous Underwater Vehicles through the Mission Management Tool,» в *Global OCEANS 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast*, 2020.
- [104] W. Wawrzyński, M. Zieja, M. Żokowski та N. Sigiel, «Optimization of autonomous underwater vehicle mission planning process,» *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, т. 70, № 2, p. e140371, 2022.
- [105] A. Noureldin, T. B. Karamat та J. Georgy, *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*, Springer, 2012.
- [106] «GPS-Aided INS Datasheet Rev. 6.23 (INS-B, INS-P, INS-D, INS-DL),» 4 2023. [Онлайновий]. Available: https://www.inertiallabs.com/wp-content/uploads/2023/04/INS-B-P-D-DL_Datasheet_rev-6.23_Apr_2023.pdf.

- [107] K. Smerpitak, S. Kaewchaiwong, P. Ukakimaparn, A. Julsereewong та S. Pongswatd, «Toward Interoperable SCADA: Node-RED-Based Edge Integration of Heterogeneous PLCs and IoT Devices.,» *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, т. 18, № 7, pp. 905-918, 2025.
- [108] Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Застосування технологій Node-RED для візуалізації руху об'єктів,» *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, № 1, p. 93–100, 2024.
- [109] Є. О. Золотарьов, «Технології інтернету речей для візуалізації руху об'єктів,» в *XIX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»*, Київ, 2023.
- [110] Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Використання цифрових технологій при розробці систем відображення руху безпілотних об'єктів,» в *Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси»*, Київ, 2024.
- [111] Z. Shi, J. Dong та Y. Gan, «Democratizing Digital Transformation: A Multisector Study of Low-Code Adoption Patterns, Limitations, and Emerging Paradigms,» *Applied Sciences*, т. 15, № 12, p. 6481, 2025.
- [112] K. S. Kiangala та Z. Wang, «An inceptive approach for designing simple digital twins and industrial metaverse process frameworks for small manufacturing I5.0 environments using Node-RED,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, т. 140, pp. 2245-2268, 1 9 2025.
- [113] C. Simpkin, I. Taylor, D. Harborne, G. Bent, A. Preece та R. K. Ganti, «Efficient orchestration of Node-RED IoT workflows using a vector symbolic architecture,» *Future Generation Computer Systems*, т. 111, pp. 117-131, 2020.
- [114] D. Clerissi, M. Leotta та F. Ricca, «A Set of Empirically Validated Development Guidelines for Improving Node-RED Flows Comprehension,» в *Proceedings of*

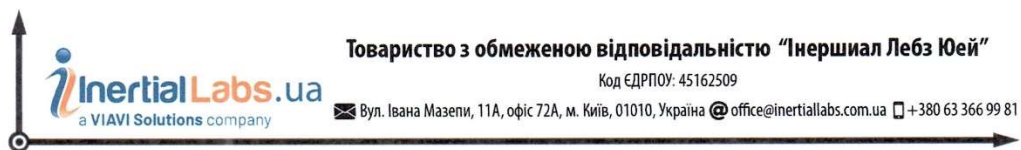
the 15th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE 2020), 2020.

- [115] S. Schneider, K. Kashish, K. Tuma та R. Scandariato, «In Specs we Trust? Conformance-Analysis of Implementation to Specifications in Node-RED and Associated Security Risks,» 2025.
- [116] B. Norris, «Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library,» 16 November 2019. [Онлайновий]. Available: <https://grabcad.com/library/rov-personal-submarine-1>.
- [117] Jarosław Foksa, «Boxy SVG,» [Онлайновий]. Available: <https://boxy-svg.com/>.
- [118] J. P. Snyder, «Map projections: A working manual,» U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1987.
- [119] Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Імітаційне моделювання колового руху автономного безпілотної підводного апарату з урахуванням випадкових завад у сигналах сенсорів,» *Електронне моделювання*, т. 47, № 6, р. 69–83, 2025.
- [120] Mathworks, «IMU simulation model,» [Онлайновий]. Available: <https://www.mathworks.com/help/fusion/ref/imusensor-system-object.html>. [Дата звернення: 19 12 2025].
- [121] VectorNav, "Learn how to determine the INS error budget for your application · VectorNav," [Online]. Available: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/specifications--and--error-budgets/specs-inserrorbudget>. [Accessed 19 12 2025].
- [122] Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Похибки передачі та візуалізації параметрів руху автономного безпілотної підводного апарату,» *Механіка гіроскопічних систем*, № 50, pp. 23-33, 2025.

- [123] D. P. Koch, D. O. Wheeler, R. W. Beard, T. W. McLain та K. M. Brink, «Relative multiplicative extended Kalman filter for observable GPS-denied navigation,» *The International Journal of Robotics Research*, т. 39, № 9, pp. 1085-1121, 2020.
- [124] «Surveying in all waters | Hydro International,» [Онлайновий]. Available: <https://www.hydro-international.com/content/article/lbl-underwater-positionin>. [Дата звернення: 29 12 2025].
- [125] O. J. Woodman, "An introduction to inertial navigation," Cambridge, 2007.

ДОДАТОК А

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи



Вих. № 10/10-1
від 10 жовтня 2025 р.

А К Т
впровадження результатів наукових досліджень

Ми, що нижче підписалися, директор Сопчинський Владислав Ярославович, директор технічний Нестеренко Олег Іванович, склали цей акт про те, що результати наукових досліджень Золотарьова Євгенія Олександровича, які отримані у дисертаційній роботі «Система візуалізації руху автономного безпілотної підводного апарату» використані у розробках та дослідній роботі ТОВ «ІНЕРШИАЛ ЛЕБЗ ЮЕЙ», а саме:

- програмно-алгоритмічне забезпечення для формування та відтворення еталонних сигналів інерційних сенсорів для тестування навігаційних систем;
- програмно-алгоритмічне забезпечення інтеграції інерціальної навігаційної системи з системою довгої базової лінії;
- програмно-алгоритмічне забезпечення системи візуалізації побудованої на технології Node-RED

Зазначені результати використовуються під час розроблення, налагодження та тестування навігаційних систем товариства.

Директор



Владислав СОПЧИНСЬКИЙ

Директор технічний

Олег НЕСТЕРЕНКО

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Б.1. Публікації, у яких відображено основні результати дисертаційного дослідження

1. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Похибки передачі та візуалізації параметрів руху автономного безпілотної підводного апарату», *Механіка гіроскопічних систем*, № 50, С. 23–33, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771502025347444> (фахове видання).
2. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Імітаційне моделювання колового руху автономного безпілотної підводного апарату з урахуванням випадкових завад у сигналах сенсорів», *Електронне моделювання*, т. 47, № 6, С. 69–83, 2025. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.47.06.069> (фахове видання).
3. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Моделювання колового руху автономного безпілотної підводного апарату та сигналів датчиків інерціальної навігаційної системи», *Електронне моделювання*, т. 47, № 1, С. 116–132, 2025. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.47.01.116> (фахове видання).
4. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Застосування технологій Node-RED для візуалізації руху об'єктів», *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, № 1, С. 93–100, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-12> (фахове видання).
5. Н. І. Бурау та Є. О. Золотарьов, «Системи візуалізації руху безпілотних підводних апаратів», *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 34 (73), № 3, С. 83–89, 2023. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/14> (фахове видання).

Б.2. Публікації, що засвідчують апробацію результатів дисертаційного дослідження

1. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Затримки передачі даних у гідроакустичних системах зв'язку автономних безпілотних підводних апаратів», 5th International Scientific and Practical Conference «Research in Science, Technology and Economics», Luxembourg, 2025. – С. 710
2. Н. І. Бурау та Є. О. Золотарьов, «Інтегрований навігаційний комплекс автономного безпілотного підводного апарата», Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси, Київ, 2025. – С. 20-22
3. Є. О. Золотарьов та Н. І. Бурау, «Використання цифрових технологій при розробці систем відображення руху безпілотних об'єктів», Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси, Київ, 2024. – С. 33-35.
4. Є. О. Золотарьов, «Технології інтернету речей для візуалізації руху об'єктів», XIX Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», Київ, 2023. – С. 27.
5. Є. О. Золотарьов, «Методи передачі та відображення інформації про рух безпілотного підводного апарату», XVI Всеукраїнська науково-практична конференція «Погляд у майбутнє приладобудування», Київ, 2023. – С. 12–14.

ДОДАТОК В

Програмно-алгоритмічне забезпечення системи візуалізації у середовищі Node-RED

В.1. Лістинги програмних вузлів Node-RED

У цьому додатку наведено програмні фрагменти (JavaScript/HTML/CSS), що містяться у вузлах потоку Node-RED, який забезпечує приймання телеметрії, її розбір та відображення на Dashboard. Лістинги подано у вигляді, придатному для відтворення та перенесення у власні проєкти, а повний перелік вузлів наведено в таблиці Б.1.

Таблиця Б.1 – Перелік вузлів

Тип	Назва вузла	ID	Вміст
Function	OPVT2AHR_fun	1b380a2da24e4423	JS (func)
Function	STOP_fun	87d96ac1541d406e	JS (func)
Function	Orientation	afa49814f87d9f7b	JS (func)
Function	Parser	b5b291035c0db6c0	JS (func)
Function	Gyro	ae5e2ee0c32ce651	JS (func)
Function	Accel	ed76694eef70d69e	JS (func)
Function	Mag	ff4d419e903c6925	JS (func)
Function	Service info	a60ca7c4b315c5ab	JS (func)
Function	Coordinates INS map	24f0764fbe4db2e5	JS (func)
Function	Coordinates GNSS map	1d2a00f3479b2a9b	JS (func)
Function	Altitude_bar	ca35e47cd06c92b2	JS (func)
Function	Vel ENU	5df1732b6a0ebe48	JS (func)
Function	Coordinates	db3caef364e616de	JS (func)

Function	Coordinates_GNSS	6ea43df32d1e4cf0	JS (func)
Function	Vel ENU GNSS	ad9186b399d417dc	JS (func)
ui_template	Heading_SVG	3aa6127f16479a5a	HTML/CSS/JS (format)
ui_template	Pitch_SVG	8920bc84e369fccf	HTML/CSS/JS (format)
ui_template	Roll_SVG	f75db7a9c33ad1ec	HTML/CSS/JS (format)
ui_template	Map	96c4f0b7e50d904d	HTML/CSS/JS (format)

B.1.1. OPVT2AHR_fun

Назва: OPVT2AHR_fun

Тип: function

ID: 1b380a2da24e4423

Лістинг:

```
msg.payload = Buffer.from("AA5500000700585F00", "hex");
return msg;
```

B.1.2. STOP_fun

Назва: STOP_fun

Тип: function

ID: 87d96ac1541d406e

Лістинг:

```
msg.payload = Buffer.from("AA5500000700FE0501", 'hex');
return msg;
```


B.1.3 Parser

Назва: Parser

Тип: function

ID: b5b291035c0db6c0

ЛІСТИНГ:

```
var byte;
var step = 0;
var src = 0;
var src_rx = 0;
var type = 0;
var id = 0;
var len = 0;
var id_cmd = 0;

let count = msg.payload.length; // Кількість прийнятих байт
let k = 0;
let j = 0;
let i = 0;

while (count--)
{
    byte = msg.payload[k++];
    if (step == 0) // 0xaa
    {
        if (byte == '0xaa') step++;
        else step = 0;
        continue;
    }
    if (step == 1) // 0x55
    {
        if (byte == '0x55') step++;
        else step = 0;
        continue;
    }
    if (step == 2) // Message_type
    {
        src = byte;
        type = byte;
        if ((byte == 0) || (byte == 1)) step++;
        else step = 0;
        continue;
    }
    if (step == 3) // Message_id
    {
        id = byte; src += byte; step++; continue; // Reserv
    }
    if (step == 4) // len L
    {
        len = byte; src += byte; step++; continue; // Reserv
    }
    if (step == 5) // len H
    {
        j = 0; i = 0;
        len |= byte << 8; src += byte; // Reserv
        if (len > 0) step++;
        else step = 0;
        continue;
    }
    if (step == 6) // payload + src
```

```

{
    if (j < len - 6) // payload
    {
        src += byte;
    }
    else // src
    {
        src_rx |= byte << i * 8; i++;
        if (i > 1) // masegge is recived
        {
            step = 0;
            if (src_rx == src)
            {
                id_cmd = msg.payload[6];
                if (type == 1) id_cmd = id;
            }
        }
    }
    j++;
    continue;
}
}

// parse raw data
if (id_cmd == 88) // 0x58
{
    msg.Heading = msg.payload.readUInt16LE(6 + 0)/100;
    msg.Pitch = msg.payload.readInt16LE(6 + 2)/100;
    msg.Roll = msg.payload.readInt16LE(6 + 4)/100;
    //-----
    msg.GyroX = msg.payload.readInt32LE(6 + 6) / 100000;
    msg.GyroY = msg.payload.readInt32LE(6 + 10) / 100000;
    msg.GyroZ = msg.payload.readInt32LE(6 + 14) / 100000;
    //-----
    msg.AccX = msg.payload.readInt32LE(6 + 18) / 1000000;
    msg.AccY = msg.payload.readInt32LE(6 + 22) / 1000000;
    msg.AccZ = msg.payload.readInt32LE(6 + 26) / 1000000;

    msg.MagX = msg.payload.readInt16LE(6 + 30) * 10;
    msg.MagY = msg.payload.readInt16LE(6 + 32) * 10;
    msg.MagZ = msg.payload.readInt16LE(6 + 34) * 10;

    msg.USW = msg.payload.readUInt16LE(6 + 36);
    msg.Vinp = msg.payload.readUInt16LE(6 + 38) /100 ;
    msg.Temper = msg.payload.readInt16LE(6 + 40) / 10;

    msg.Latitude = Number(msg.payload.readBigUInt64LE(6 + 42)) / 1.0e9;
    msg.Longitude = Number(msg.payload.readBigUInt64LE(6 + 50)) / 1.0e9;
    msg.Altitude = msg.payload.readInt32LE(6 + 58) / 1000;

    msg.East_speed = msg.payload.readInt32LE(6 + 62) / 100;
    msg.North_speed = msg.payload.readInt32LE(6 + 66) / 100;
    msg.Vertical_speed = msg.payload.readInt32LE(6 + 70) / 100;

    msg.Latitude_GNSS = Number(msg.payload.readBigUInt64LE(6 + 74)) / 1.0e9;
    msg.Longitude_GNSS = Number(msg.payload.readBigUInt64LE(6 + 82)) / 1.0e9;
    msg.Altitude_GNSS = msg.payload.readInt32LE(6 + 90) / 1000;

    msg.Horizontal_speed_GNSS = msg.payload.readInt32LE(6 + 94) / 100;
    msg.Track_over_ground_GNSS = msg.payload.readUInt16LE(6 + 98) / 100;
    msg.Vertical_speed_GNSS = msg.payload.readInt32LE(6 + 100) / 100;

    msg.ms_gps = msg.payload.readUInt32LE(6 + 104);
    msg.GNSS_info_1 = msg.payload[6 + 109];
    msg.GNSS_info_2 = msg.payload[6 + 110];
    msg.solnSVs = msg.payload[6 + 111];
    msg.latency = msg.payload.readUInt16LE(6 + 111);
    msg.Angles_position_type = msg.payload[6 + 114];
}

```

```

msg.Heading_GNSS = msg.payload.readUInt16LE(6 + 114)/100;
msg.Latency_ms_head = msg.payload.readUInt16LE(6 + 116)/100;
msg.Latency_ms_pos = msg.payload.readUInt16LE(6 + 118)/100;
msg.Latency_ms_vel = msg.payload.readUInt16LE(6 + 120)/100;
msg.P_bar = msg.payload.readUInt16LE(6 + 122) *2;
msg.H_bar = msg.payload.readInt32LE(6 + 124) / 100;
msg.NewGPS = msg.payload[6 + 129];
}
if (id_cmd>0)
{
    msg.id_cmd = id_cmd;
    return msg;
}

```

B.1.4 Orientation

Назва: Orientation

Тип: function

ID: afa49814f87d9f7b

Лістинг:

```

let msg1 = {};
let msg2 = {};
let msg3 = {};

msg1.payload = msg.Heading;
msg2.payload = msg.Pitch;
msg3.payload = msg.Roll;

return [msg1, msg2, msg3];

```

B.1.5 Gyro

Назва: Gyro

Тип: function

ID: ae5e2ee0c32ce651

Лістинг:

```

let msg1 = {};
let msg2 = {};
let msg3 = {};

msg1.payload = msg.GyroX;
msg1.topic = 'Line1';

msg2.payload = msg.GyroY;
msg2.topic = 'Line2';

```

```
msg3.payload = msg.GyroZ;  
msg3.topic = 'Line3';  
  
return [msg1, msg2, msg3];
```

B.1.6 Accel

Назва: Accel

Тип: function

ID: ed76694eef70d69e

Лістинг:

```
let msg4 = {};  
let msg5 = {};  
let msg6 = {};  
  
msg4.payload = msg.AccX;  
msg4.topic = 'Line1';  
  
msg5.payload = msg.AccY;  
msg5.topic = 'Line2';  
  
msg6.payload = msg.AccZ;  
msg6.topic = 'Line3';  
  
return [msg4, msg5, msg6];
```

B.1.7 Mag

Назва: Mag

Тип: function

ID: ff4d419e903c6925

Лістинг:

```
let msg7 = {};  
let msg8 = {};  
let msg9 = {};  
  
msg7.payload = msg.MagX;  
msg7.topic = 'Line1';  
  
msg8.payload = msg.MagY;  
msg8.topic = 'Line2';  
  
msg9.payload = msg.MagZ;  
msg9.topic = 'Line3';
```

```
return [msg7, msg8, msg9];
```

B.1.8 Service info

Назва: Service info

Тип: function

ID: a60ca7c4b315c5ab

Лістинг:

```
let msg11 = {};
let msg12 = {};

msg11.payload = msg.Vinp;
msg12.payload = msg.Temper;

return [msg11, msg12];
```

B.1.9 Coordinates INS map

Назва: Coordinates INS map

Тип: function

ID: 24f0764fbe4db2e5

Лістинг:

```
// ===== INS -> worldmap: breadcrumbs (points only) =====
const LAYER = "INS_pts";           // шар для точок
const MAX_PTS = 3000;              // скільки точок тримати на карті
const ADD_EVERY = 1;               // додавати кожну N-ту точку (1 = кожну)

const lat = Number(msg.Latitude);
const lon = Number(msg.Longitude);

if (!isFinite(lat) || !isFinite(lon)) return null;

// --- лічильник для прорідження ---
let k = flow.get("INS_k") || 0;
k++;
flow.set("INS_k", k);

// ADD_EVERY > 1
if (k % ADD_EVERY !== 0) return null;

// --- список імен точок для керування буфером ---
let names = flow.get("INS_names") || [];

// унікальне ім'я точки
// (краще за Date.now(): не зіб'ється навіть якщо кілька точок в одну мс)
let id = flow.get("INS_id") || 0;
```

```

id++;
flow.set("INS_id", id);

const name = `INS_${id}`;
names.push(name);

// --- сформувати повідомлення для додавання точки ---
const addPoint = {
  payload: {
    name,
    layer: LAYER,
    lat,
    lon,

    // маленька "точка" як коло
    radius: 0.01,           // <-- розмір у метрах (зроби 1..5)
    color: "#cc0000",      // контур
    fillColor: "#cc0000",  // заливка
    fillOpacity: 0.9,
    stroke: false          // без контуру, якщо хочеш чисту "крапку"

    // опційно: маленький підпис/tooltip
    // tooltip: name
  }
};

// --- якщо перевищили MAX_PTS – видаляємо найстарішу ---
let deleteMsg = null;
if (names.length > MAX_PTS) {
  const oldName = names.shift();
  deleteMsg = {
    payload: {
      name: oldName,
      deleted: true
    }
  };
}

// зберегти оновлений список
flow.set("INS_names", names);

// --- відправка: спочатку delete (якщо треба), потім add ---
if (deleteMsg) return [[deleteMsg, addPoint]];
return [[addPoint]];

```

B.1.10 Coordinates GNSS map

Назва: Coordinates GNSS map

Тип: function

ID: 1d2a00f3479b2a9b

Лістинг:

```

// ===== GNSS -> worldmap: breadcrumbs points with size (circle radius) =====
const LAYER = "GNSS_pts";
const MAX_PTS = 3000;
const ADD_EVERY = 1;

const RADIUS_M = 0.01; // <-- розмір точки (метри):

```

```

const lat = Number(msg.Latitude_GNSS);
const lon = Number(msg.Longitude_GNSS);
const alt = Number(msg.Altitude_GNSS);

if (!isFinite(lat) || !isFinite(lon)) return null;

// прорідження (за потреби)
let k = flow.get("GNSS_k") || 0;
k++;
flow.set("GNSS_k", k);
if (k % ADD_EVERY !== 0) return null;

// список імен точок
let names = flow.get("GNSS_names") || [];

// унікальний id
let id = flow.get("GNSS_id") || 0;
id++;
flow.set("GNSS_id", id);

const name = `GNSS_${id}`;
names.push(name);

// додати точку (ціан) як circle
const addPoint = {
  payload: {
    name,
    layer: LAYER,
    lat,
    lon,
    alt: isFinite(alt) ? alt : undefined,

    // circle marker
    radius: RADIUS_M,
    color: "cyan",
    fillColor: "cyan",
    fillOpacity: 0.9,
    stroke: false
  }
};

// якщо перевищили – видалити найстарішу
let delMsg = null;
if (names.length > MAX_PTS) {
  const oldName = names.shift();
  delMsg = { payload: { name: oldName, deleted: true } };
}

flow.set("GNSS_names", names);

if (delMsg) return [[delMsg, addPoint]];
return [[addPoint]];

```

B.1.11 Altitude_bar

Назва: Altitude_bar

Тип: function

ID: ca35e47cd06c92b2

Лістинг:

```
let msg14 = {};  
msg14.payload = msg.H_bar;  
msg14.topic = 'Line2';  
return msg14;
```

B.1.12 Vel ENU

Назва: Vel ENU

Тип: function

ID: 5df1732b6a0ebe48

Flow: INS

Кількість виходів: 3

Лістинг:

```
let msg7 = {};  
let msg8 = {};  
let msg9 = {};  
  
msg7.payload = msg.East_speed;  
msg8.payload = msg.North_speed;  
msg9.payload = msg.Vertical_speed;  
  
return [msg7, msg8, msg9];
```

B.1.13 Coordinates

Назва: Coordinates

Тип: function

ID: db3caef364e616de

Лістинг:

```
let msg7 = {};  
let msg8 = {};  
let msg9 = {};  
  
msg7.payload = msg.Longitude;  
msg8.payload = msg.Latitude;  
msg9.payload = msg.Altitude;
```



```
return [msg7, msg8, msg9];
```

B.1.14 Coordinates_GNSS

Назва: Coordinates_GNSS

Тип: function

ID: 6ea43df32d1e4cf0

Лістинг:

```
let msg7 = {};
let msg8 = {};
let msg9 = {};

msg7.payload = msg.Longitude_GNSS;
msg8.payload = msg.Latitude_GNSS;
msg9.payload = msg.Altitude_GNSS;

return [msg7, msg8, msg9];
```

B.1.15 Vel ENU GNSS

Назва: Vel ENU GNSS

Тип: function

ID: ad9186b399d417dc

Flow: INS

Кількість виходів: 3

Лістинг:

```
let msg7 = {};
let msg8 = {};
let msg9 = {};

msg7.payload = msg.Horizontal_speed_GNSS * Math.sin(msg.Track_over_ground_GNSS*0.017453);
msg8.payload = msg.Horizontal_speed_GNSS * Math.cos(msg.Track_over_ground_GNSS*0.017453);
msg9.payload = msg.Vertical_speed_GNSS;

return [msg7, msg8, msg9];
```

B.1.16 Heading_SVG

Назва: Heading_SVG

Тип: ui_template

ID: 3aa6127f16479a5a

Flow: INS

Група Dashboard: Сенсори

ЛІСТИНГ:

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<title>Rotasi Smartphone SVG</title>
<style>
  /* Optional CSS styling */
  svg {
    //border: 1px solid #000;
    /* Add border for visualization */
    width: auto;
    /* Make SVG fill its container */
    height: auto;
    /* Maintain aspect ratio */
  }
</style>
</head>
<body>
<svg width="300mm" height="300mm" viewBox="0 0 300 300" stroke-linejoin="round" stroke-
linecap="round" fill="none"
  fill-rule="evenodd" xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" xmlns:bx="https://boxy-svg.com">
  <!-- Скорочено для додатків: статичні елементи SVG (path/line/text) опущено. -->
  <g id="rov_h"></g>
  <g id="arrow_h"></g>
</svg>

<script>
  // rov
  var smartphoneGroup = document.getElementById('rov_h');
  var transformValue = "matrix(-1, 0, 0, -1, 1.500003, 47.050003) rotate(" +
  "{{msg.payload}}" + ")";
  smartphoneGroup.setAttribute('transform', transformValue);

  // arrow_h
  var arrow_h_Group = document.getElementById('arrow_h');

  var bbox = arrow_h_Group.getBBox();

  // Hitung koordinat tengah (geometric center)
  var centerX = bbox.x + bbox.width / 2;
  var centerY = bbox.y + bbox.height / 2;

  arrow_h_Group.setAttribute('transform', "rotate(" + "{{msg.payload}}" + ", " + centerX +
  ", " + 150 + ")");
</script>
</div>
</body>
</html>
```

B.1.17 Pitch_SVG

Назва: Pitch_SVG

Тип: ui_template

ID: 8920bc84e369fccf

Flow: INS

Група Dashboard: Сенсори

ЛІСТИНГ:

```
<!DOCTYPE html>
<html>

<head>
<title>Rotasi Smartphone SVG</title>
<style>
  /* Optional CSS styling */
  svg {
    //border: 1px solid #000;
    /* Add border for visualization */
    width: auto;
    /* Make SVG fill its container */
    height: auto;
    /* Maintain aspect ratio */
  }
</style>
</head>
<body>
<svg width="300mm" height="300mm" viewBox="0 0 300 300" stroke-linejoin="round" stroke-
linecap="round" fill="none"
  fill-rule="evenodd" xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" xmlns:bx="https://boxy-svg.com">
  <!-- Скорочено для додатків: статичні елементи SVG (path/line/text) опущено. -->
  <g id="rov_p"></g>
  <g id="arrow_p"></g>
</svg>

<script>
  // rov
  var smartphoneGroup = document.getElementById('rov_p');
  var angle = "{{-msg.payload+90}}";
  var transformValue = "matrix(0, -1, 1, 0, 3.554989, 44.999985) rotate(" + angle + ")";
  smartphoneGroup.setAttribute('transform', transformValue);

  // arrow_h
  var arrow_p_Group = document.getElementById('arrow_p');

  var bbox = arrow_p_Group.getBBox();

  // Hitung koordinat tengah (geometric center)
  var centerX = bbox.x + bbox.width / 2;
  var centerY = bbox.y + bbox.height / 2;

  arrow_p_Group.setAttribute('transform', "rotate(" + angle + ", " + centerX + ", " + 150 +
  ")");
```

```

    </script>
</div>
</body>
</html>

```

B.1.18 Roll_SVG

Назва: Roll_SVG

Тип: ui_template

ID: f75db7a9c33ad1ec

Flow: INS

Група Dashboard: Сенсори

Лістинг:

```

<!DOCTYPE html>
<html>

<head>
<title>Rotasi Smartphone SVG</title>
<style>
  /* Optional CSS styling */
  svg {
    //border: 1px solid #000;
    /* Add border for visualization */
    width: auto;
    /* Make SVG fill its container */
    height: auto;
    /* Maintain aspect ratio */
  }
</style>
</head>
<body>
<svg width="300mm" height="300mm" viewBox="0 0 300 300" stroke-linejoin="round" stroke-
linecap="round" fill="none"
  fill-rule="evenodd" xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" xmlns:bx="https://boxy-svg.com">
  <!-- Скорочено для додатків: статичні елементи SVG (path/line/text) опущено. -->
  <g id="rov_r"></g>
  <g id="arrow_r"></g>
</svg>

  <script>
    // rov
    var smartphoneGroup = document.getElementById('rov_r');
    var angle = "{{msg.payload+90}}";
    var transformValue = "matrix(0, -1.880234, 1.880234, 0, 1.500001, 45) rotate(" + angle +
    ")";
    smartphoneGroup.setAttribute('transform', transformValue);

    // arrow_h
    var arrow_r_Group = document.getElementById('arrow_r');

    var bbox = arrow_r_Group.getBBox();

```

```

var angle_arr = "{{msg.payload}}";

// Hitung koordinat tengah (geometric center)
var centerX = bbox.x + bbox.width / 2;
var centerY = bbox.y + bbox.height / 2;

arrow_r_Group.setAttribute('transform', "rotate(" + angle_arr + "," + centerX + "," + 150
+ ")");

</script>
</div>
</body>
</html>

```

B.1.19 Map

Назва: Мапа

Тип: ui_template

ID: 96c4f0b7e50d904d

Flow: INS

Група Dashboard: Мапа

ЛІСТИНГ:

```

<style>
#nrLegendFixed {
  position: fixed;
  top: 70px;
  right: 420px;          /* стартова позиція, якщо ще не збережено */
  z-index: 99999;
  background: rgba(255,255,255,0.92);
  border: 1px solid #cfcfcf;
  border-radius: 8px;
  padding: 0;
  font: 13px/1.2 Arial, sans-serif;
  box-shadow: 0 2px 8px rgba(0,0,0,0.15);
  pointer-events: auto; /* важливо: щоб мишка працювала */
  user-select: none;
  min-width: 120px;
}

#nrLegendFixed .hdr {
  padding: 8px 10px;
  font-weight: 700;
  display: flex;
  align-items: center;
  justify-content: space-between;
  cursor: move;      /* пучка */
  border-bottom: 1px solid #e5e5e5;
}

#nrLegendFixed .body { padding: 8px 10px; }

#nrLegendFixed .row { display:flex; align-items:center; gap:8px; margin:6px 0; }
#nrLegendFixed .dot { width: 10px; height: 10px; border-radius: 50%; display:inline-block; }

```

```

#nrLegendFixed .ins { background:#cc0000; }
#nrLegendFixed .gnss{ background:cyan; }

#nrLegendFixed .hint {
  font-weight: 400;
  font-size: 11px;
  opacity: 0.6;
  margin-left: 10px;
}

.nr-legend-host { height: 0 !important; padding: 0 !important; margin: 0 !important; }
</style>

<div class="nr-legend-host"></div>

<div id="nrLegendFixed">
  <div class="hdr" id="nrLegendHandle" title="Перетягуй мишкою. Подвійний клік – скинути позицію">
    Легенда
    <span class="hint">drag</span>
  </div>
  <div class="body">
    <div class="row"><span class="dot ins"></span><span>IHC</span></div>
    <div class="row"><span class="dot gnss"></span><span>GNSS</span></div>
  </div>
</div>

<script>
(function(){
  const el = document.getElementById("nrLegendFixed");
  const handle = document.getElementById("nrLegendHandle");
  if (!el || !handle) return;

  // щоб не навішувати слухачі повторно при перевідкритті вкладки
  if (el.__dragInited) return;
  el.__dragInited = true;

  const KEY = "nrLegendPos_v1";

  // відновлення позиції
  try {
    const saved = JSON.parse(localStorage.getItem(KEY) || "null");
    if (saved && typeof saved.left === "number" && typeof saved.top === "number") {
      el.style.left = saved.left + "px";
      el.style.top = saved.top + "px";
      el.style.right = "auto";
      el.style.bottom = "auto";
    }
  } catch(e){}

  let dragging = false;
  let dx = 0, dy = 0;

  function clamp(v, min, max){ return Math.max(min, Math.min(max, v)); }

  function onDown(e){
    dragging = true;

    const rect = el.getBoundingClientRect();
    const clientX = (e.touches && e.touches[0]) ? e.touches[0].clientX : e.clientX;
    const clientY = (e.touches && e.touches[0]) ? e.touches[0].clientY : e.clientY;

    dx = clientX - rect.left;
    dy = clientY - rect.top;

    // перейти на left/top, щоб не залежати від right
    el.style.left = rect.left + "px";
    el.style.top = rect.top + "px";
    el.style.right = "auto";

```

```

el.style.bottom = "auto";

document.addEventListener("mousemove", onMove);
document.addEventListener("mouseup", onUp);
document.addEventListener("touchmove", onMove, {passive:false});
document.addEventListener("touchend", onUp);
e.preventDefault();
}

function onMove(e){
  if (!dragging) return;

  const clientX = (e.touches && e.touches[0]) ? e.touches[0].clientX : e.clientX;
  const clientY = (e.touches && e.touches[0]) ? e.touches[0].clientY : e.clientY;

  // межi вікна
  const w = window.innerWidth;
  const h = window.innerHeight;
  const rect = el.getBoundingClientRect();

  let left = clientX - dx;
  let top = clientY - dy;

  left = clamp(left, 0, w - rect.width);
  top = clamp(top, 0, h - rect.height);

  el.style.left = left + "px";
  el.style.top = top + "px";

  e.preventDefault();
}

function onUp(){
  if (!dragging) return;
  dragging = false;

  document.removeEventListener("mousemove", onMove);
  document.removeEventListener("mouseup", onUp);
  document.removeEventListener("touchmove", onMove);
  document.removeEventListener("touchend", onUp);

  // збергти
  const rect = el.getBoundingClientRect();
  try {
    localStorage.setItem(KEY, JSON.stringify({left: rect.left, top: rect.top}));
  } catch(e){}
}

// подвійний клік = скидання позиції
function resetPos(){
  try { localStorage.removeItem(KEY); } catch(e){}
  el.style.top = "70px";
  el.style.right = "420px";
  el.style.left = "auto";
  el.style.bottom = "auto";
}

handle.addEventListener("mousedown", onDown);
handle.addEventListener("touchstart", onDown, {passive:false});
handle.addEventListener("dblclick", resetPos);
})();
</script>

```

ДОДАТОК Г

Моделі простору станів та результати моделювання інтегрованої ІНС

Г.1. Рівняння похибок інерціальної навігаційної системи

Матриця стану A:

A	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔV_E	ΔV_N	ΔV_U	$\Delta\theta$	$\Delta\gamma$	ΔK	b_{a_x}	b_{a_y}	b_{a_z}	b_{ω_x}	b_{ω_y}	b_{ω_z}
$\Delta\dot{\varphi} =$					R^{-1}										
$\Delta\dot{\lambda} =$	$\lambda \operatorname{tg} \varphi$			$(R \cos \varphi)^{-1}$											
$\Delta\dot{h} =$						1									
$\Delta\dot{V}_E =$								$-a_z$	a_y	c_{11}	c_{12}	c_{13}			
$\Delta\dot{V}_N =$							a_z		$-a_x$	c_{21}	c_{22}	c_{23}			
$\Delta\dot{V}_U =$							$-a_y$	a_x		c_{31}	c_{32}	c_{33}			
$\Delta\dot{\theta} =$					$-R^{-1}$			$\Omega \sin \varphi$	$-\Omega \cos \varphi$				$-c_{11}$	$-c_{12}$	$-c_{13}$
$\Delta\dot{\gamma} =$	$-U \sin \varphi$			R^{-1}			$-\Omega \sin \varphi$		$-\dot{\varphi}$				$-c_{21}$	$-c_{22}$	$-c_{23}$
$\Delta\dot{K} =$	$V_E (R \cos^2 \varphi)^{-1} + U \cos \varphi$			$R^{-1} \operatorname{tg} \varphi$			$\Omega \cos \varphi$	$\dot{\varphi}$					$-c_{31}$	$-c_{32}$	$-c_{33}$
$\dot{b}_{a_x} =$															
$\dot{b}_{a_y} =$															
$\dot{b}_{a_z} =$															
$\dot{b}_{\omega_x} =$															
$\dot{b}_{\omega_y} =$															
$\dot{b}_{\omega_z} =$															

(Г.1)

Матриця випадкових вхідних збурень G:

G	η_{a_x}	η_{a_y}	η_{a_z}	η_{ω_x}	η_{ω_y}	η_{ω_z}	ξ_{a_x}	ξ_{a_y}	ξ_{a_z}	ξ_{ω_x}	ξ_{ω_y}	ξ_{ω_z}
$\Delta\dot{\phi} =$												
$\Delta\dot{\lambda} =$												
$\Delta\dot{h} =$												
$\Delta\dot{V}_E =$	c_{11}	c_{12}	c_{13}									
$\Delta\dot{V}_N =$	c_{21}	c_{22}	c_{23}									
$\Delta\dot{V}_U =$	c_{31}	c_{32}	c_{33}									
$\Delta\dot{\theta} =$				$-c_{11}$	$-c_{12}$	$-c_{13}$						
$\Delta\dot{\gamma} =$				$-c_{21}$	$-c_{22}$	$-c_{23}$						
$\Delta\dot{K} =$				$-c_{31}$	$-c_{32}$	$-c_{33}$						
$\dot{b}_{a_x} =$							1					
$\dot{b}_{a_y} =$								1				
$\dot{b}_{a_z} =$									1			
$\dot{b}_{\omega_x} =$										1		
$\dot{b}_{\omega_y} =$											1	
$\dot{b}_{\omega_z} =$												1

(Г.2)

В матрицах не показані елементи з нульовим значенням.

Г.2. Моделювання інерціальної навігаційної системи з інтеграцією системи дальньої базової лінії

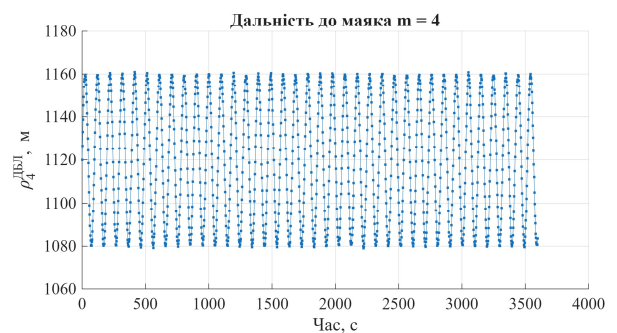
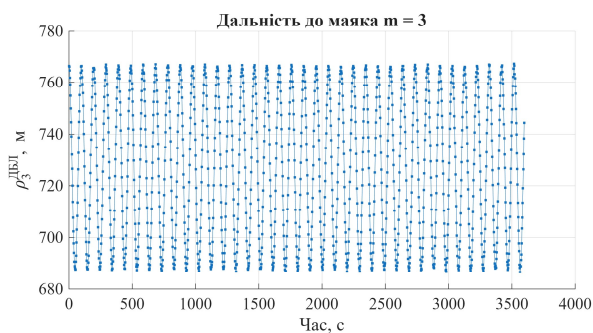
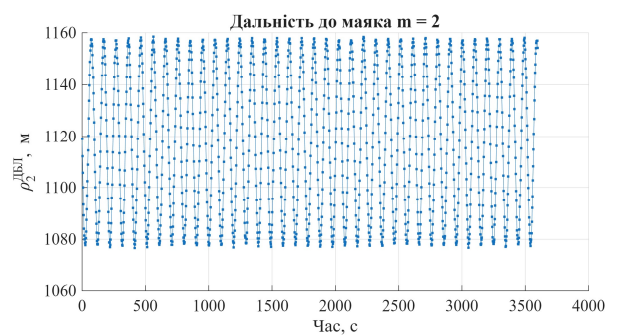
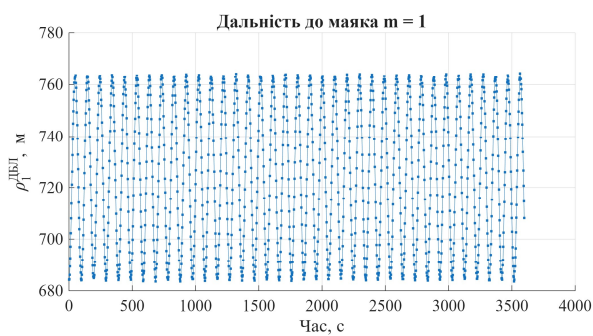


Рис. Г.1. Розраховані дальності системи акустичної навігації ДБЛ з еталонних координат і координат донних маяків.

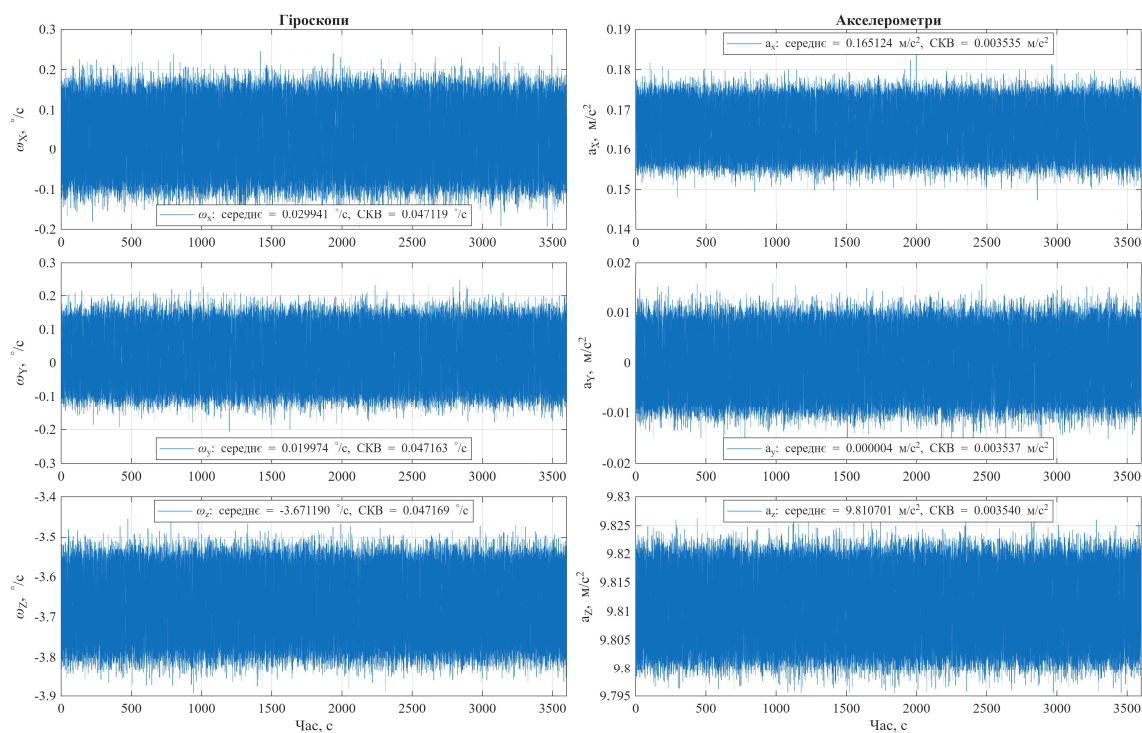


Рис. Г.2. Змодельовані сигнали ІВМ для імітаційного моделювання роботи ІНС з корекцією ДБЛ.

Г.3. Напівнатурне моделювання інерціальної навігаційної системи з інтеграцією системи дальньої базової лінії

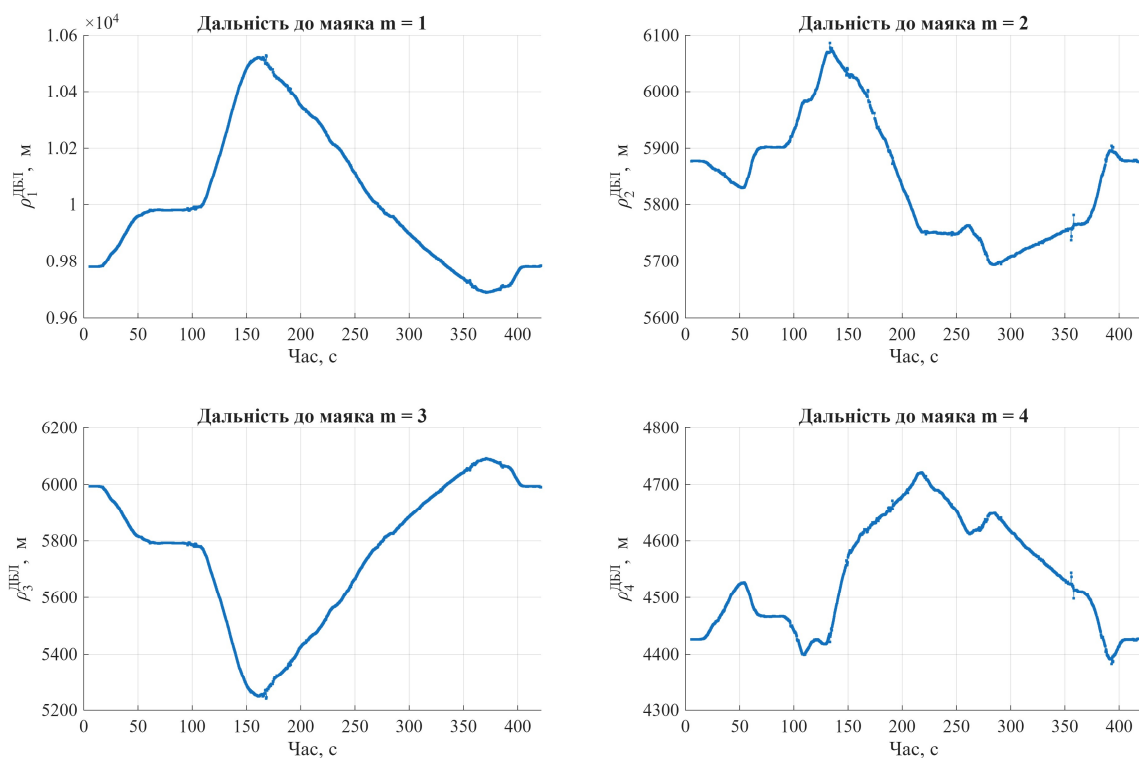


Рис. Г.3. Зміна дальностей $\rho_t^{\text{ДБЛ}}(t)$ до маяків системи ДБЛ під час руху АБПА

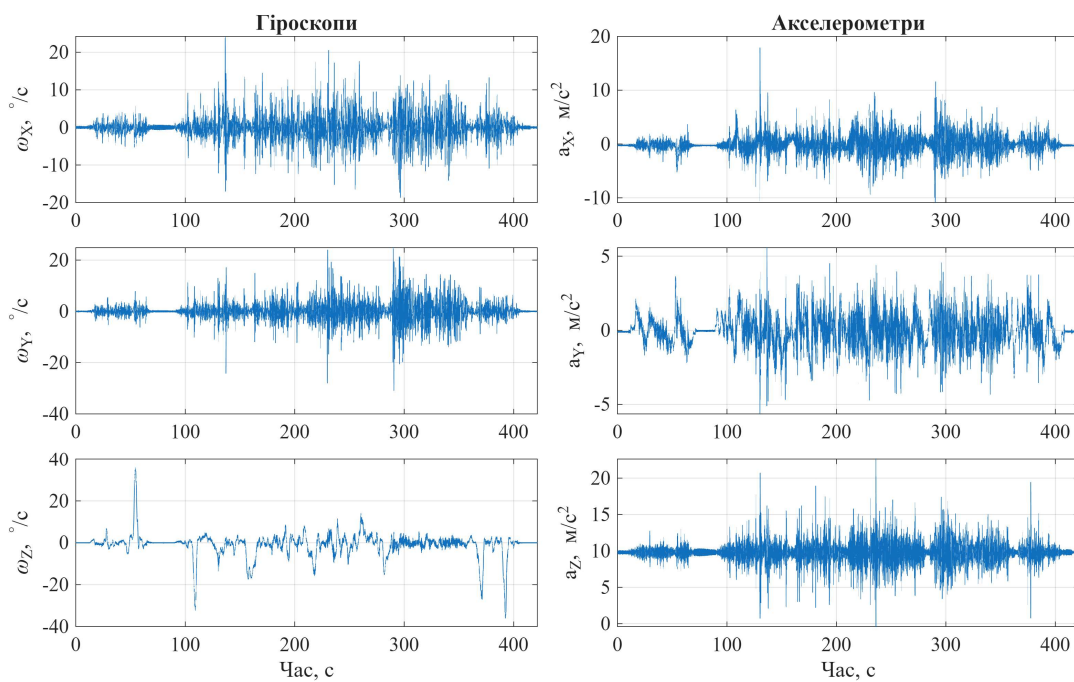


Рис. Г.4. Сигнали ІВМ з INS-B, 200 Гц

Діагональні елементи матриці коваріації ФК при комплексуванні ІНС/ДБЛ

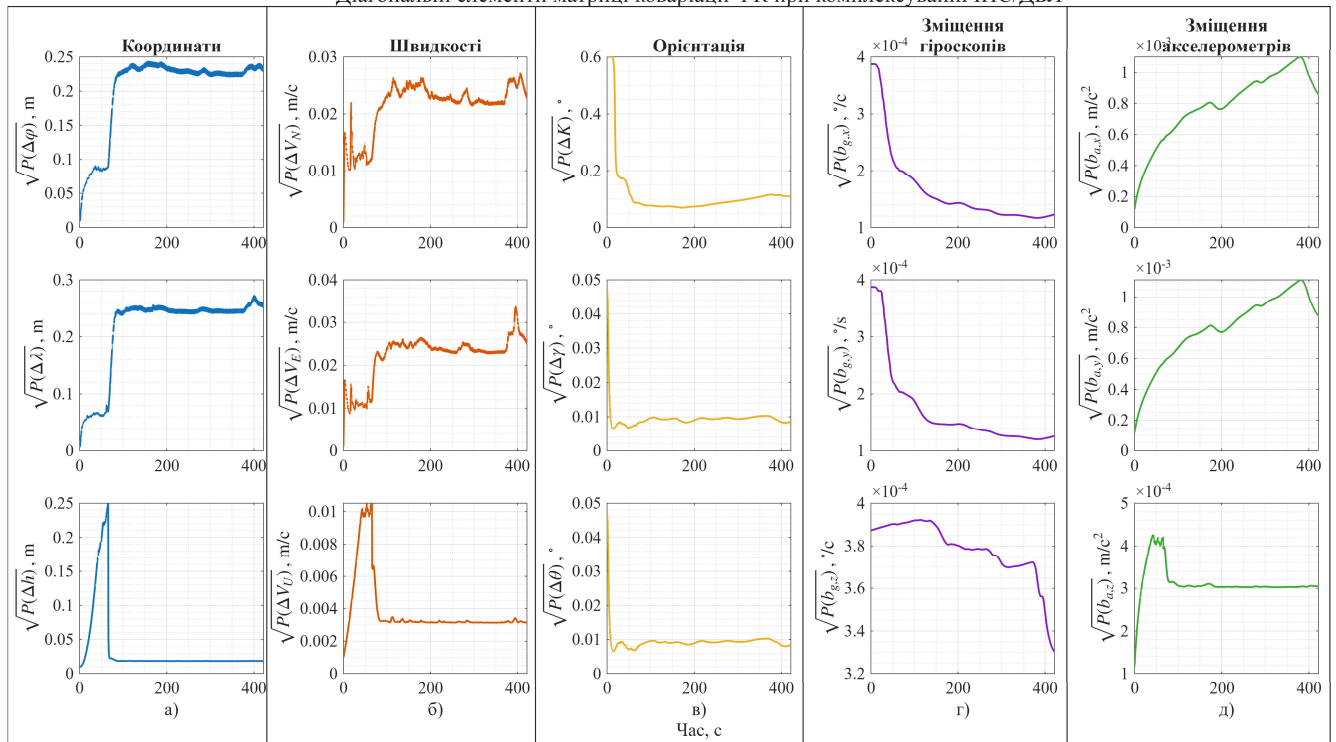


Рис. Г.5. Діагональні елементи матриці коваріації ФК при комплексуванні ІНС/ДБЛ: а) координат $\sqrt{P(\Delta\varphi)}$, $\sqrt{P(\Delta\lambda)}$, $\sqrt{P(\Delta h)}$ б) швидкості $\sqrt{P(\Delta V_E)}$, $\sqrt{P(\Delta V_N)}$, $\sqrt{P(\Delta V_U)}$, в) орієнтації $\sqrt{P(\Delta K)}$, $\sqrt{P(\Delta\gamma)}$, $\sqrt{P(\Delta\theta)}$, г) зміщень нулів гіроскопів $\sqrt{P(b_{g_x})}$, $\sqrt{P(b_{g_y})}$, $\sqrt{P(b_{g_z})}$, д) зміщень нулів акселерометрів $\sqrt{P(a_{g_x})}$, $\sqrt{P(b_{g_y})}$, $\sqrt{P(b_{g_z})}$