

## СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗЕКІПАЖНОГО КАТЕРА ЯК СКЛАДОВА ЙОГО СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

**Войтасик А. М.**, к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: andrii.voitasyk@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9409-6108;

**Костенко Д. В.**, к.т.н., доцент, завідувач кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: dmi.kostenko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2251-6932;

**Сірівчук А. С.**, к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: sirivchuka@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2927-2600.

*Розроблено структуру та принципи роботи системи вимірювання динамічних параметрів руху безекіпажного надводного катера, яка входить до складу його системи автоматичного керування для забезпечення ефективного маневрування та виконання операцій у морському середовищі. Систему вимірювання динамічних характеристик реалізовано за допомогою єдиного модуля сенсорів, що включає трьохосові акселерометри, магнітометри, гіроскопи та GPS-приймач. Для обробки даних застосовуються медіанні фільтри для зменшення шуму, алгоритм Маджвіка для підвищення точності визначення кутового положення та метод Адамса для розрахунку лінійних прискорень через інтегрування. Всі процеси обробки та візуалізації реалізовані у програмному середовищі MATLAB Simulink із використанням UDP-протоколу передачі даних. Запропонована система вимірювання динамічних характеристик здатна забезпечити визначення основних параметрів руху безекіпажного надводного катера в режимі реального часу. Система дозволяє оптимізувати роботу автоматичного керування безекіпажного надводного катера, підлаштовуючи його до умов експлуатації та гарантувати об'єднану роботу з іншими підсистемами. Розроблена система вперше реалізує інтегроване рішення для вимірювання динамічних параметрів безекіпажного надводного катера на базі компактного модуля сенсорів. Інформаційна обробка здійснюється за допомогою алгоритмів, що забезпечують високу точність вимірювань та мінімізацію помилок, викликаних зовнішніми впливами. Система вимірювання динамічних характеристик є основою для створення автоматизованих безекіпажних катерів, що можуть виконувати широкий спектр завдань, зокрема патрулювання, моніторинг та оперативне реагування. Її використання знижує витрати на експлуатацію та підвищує ефективність морських операцій. Основними її відмінностями є особливості схематехнічної реалізації, форма інформаційного представлення засобами програмного середовища MATLAB Simulink та менша собівартість виробництва чинного зразка у порівнянні зі світовими аналогами.*

**Ключові слова:** безекіпажний надводний катер; система автоматичного керування; динамічні характеристики; сенсор.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.049-057**

**Вступ.** Розвиток безекіпажних надводних катерів (БНК, в англійській літературі – Unmanned surface vessels, USV) є одним із пріоритетних напрямів сучасної морської робототехніки, з огляду на їхній потенціал для виконання різноманітних завдань в умовах високого ризику [1, 2]. БНК знаходять застосування у сфері охорони об'єктів морської критичної інфраструктури, моніторингу навколишнього середовища, виконання наукових досліджень та у військовій галузі. Ефективність виконання місій БНК значною мірою залежить від точності його систем автоматичного керування (САК), які забезпечують автономну навігацію, стійкість та виконання заданих маневрів [3].

Одним із важливих компонентів САК БНК є система вимірювання динамічних характеристик, яка дозволяє оцінювати параметри руху БНК у реальному часі та адаптувати керування до змін зовнішніх умов. Висока динамічність руху, вплив хвилювання моря, змінні вітрові та течійні навантаження потребують застосування високоточних і

швидкодійних вимірювальних систем, здатних надавати інформацію з різноманітних сенсорів [4, 5].

**Постановка проблеми.** Сучасні виклики, пов'язані з забезпеченням безпеки та виконанням завдань в акваторіях з підвищеним ризиком, вимагають широкого впровадження БНК у складі морських систем. Основним фактором, що впливає на ефективність їхньої експлуатації, є надійність САК, яка дозволяє гарантувати автономну навігацію, точну роботу у різноманітних умовах, а також підлаштування до змінних зовнішніх факторів. Для підвищення функціональних можливостей БНК необхідно створити ефективну систему вимірювання динамічних характеристик, яка забезпечувала б точну оцінку параметрів руху в реальному часі. Зокрема, виникає потреба в аналізі поступальних і кутових швидкостей, лінійних і кутових прискорень, а також кутового положення корпусу катера з урахуванням впливу хвиль, вітру та течій. Дані параметри важливі для корекції траєкторії та забезпечення стійкості руху БНК. Особливої актуальності це завдання набуває в умовах, коли БНК експлуатується в режимі автономного патрулювання, виконання рятувальних чи дослідницьких операцій, а також для забезпечення охорони критичних об'єктів морської інфраструктури.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У сучасній морській робототехніці для визначення динамічних параметрів руху БНК активно застосовують інерціальні навігаційні системи (ІНС), які базуються на використанні лазерних або волоконно-оптичних гіроскопів [6, 7]. Вироби, такі як серії «БІНС-500», забезпечують визначення параметрів курсу, крену, диференту, а також кутових і лінійних прискорень, але їх вартість і складність інтеграції можуть бути обмежувальними факторами [8, 9]. Серед наявних пристроїв для визначення параметрів руху БНК можна виділити прийомні індикатори глобальної навігаційної супутникової системи, такі як «РК-2106», які забезпечують функції визначення координат і швидкості руху [10].

З метою підвищення точності та автономності САК використовуються супутникові компаси, наприклад, «Furuno» або «Koden», які доповнюють дані Global Positioning System (GPS) координатами та швидкісними параметрами руху [11, 12]. Однак їхня частота оновлення (10–30 Гц) є недостатньою для аналізу високочастотних коливань, що впливають на систему кріплення обладнання.

Сучасні аналоги, такі як пристрої компанії «Sitex», забезпечують точні вимірювання з використанням GPS, але мають обмеження у доступі до первинних даних сенсорів через стандартизовані протоколи NMEA. Це, у свою чергу, ускладнює їх використання для задач, що потребують підлаштування до специфічних умов експлуатації БНК [13, 14, 15]. Отож, виникає потреба у розробці об'єднаної системи, яка поєднувала б високу частоту оновлення сигналу, доступ до первинних даних сенсорів і здатність адаптуватися до вимог САК БНК.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є розробка структури та принципів функціонування системи вимірювання динамічних характеристик руху, які мають входити до складу САК БНК.

**Виклад основного матеріалу.** Вимірювання динамічних характеристик безекіпажного катера здійснюється за допомогою спеціалізованого модуля, що містить інтегровані сенсори, які включають акселерометр, магнітометр і гіроскоп. Дані сенсори дозволяють отримувати точні дані про рух катера в різних напрямках, забезпечуючи необхідну інформацію для аналізу його поведінки в умовах реального часу. Окрім того, модуль оснащений GPS-приймачем, що дає змогу не лише точно визначити географічні координати катера, але й синхронізувати вимірювання з точним часом, що є надзвичайно важливим для детального аналізу його руху та ефективного контролю за операціями, які виконуються безекіпажним катером. Завдяки цьому, даний модуль дозволяє здійснювати високоточне спостереження та управління навіть за складних умов, коли необхідно отримувати й обробляти дані в реальному часі [16, 17].

Модуль із сенсорами розроблений з урахуванням специфічних вимог експлуатації безекіпажних катерів в умовах різних кліматичних і погодних ситуацій, що вимагає високої

надійності та стійкості до зовнішніх впливів. Для забезпечення такого рівня захисту, модуль має клас захисту IP67, що гарантує його працездатність у складних умовах морського середовища. Даний клас захисту дозволяє ефективно використовувати пристрій на катерах, які працюють в умовах хвилювання моря до 3–5 балів, а також при потраплянні бризок чи хвиль на корпус катера, що може статися під час руху або внаслідок змін погодних умов. Модуль із сенсорами включає кілька ключових компонентів, що забезпечують точне і стабільне вимірювання різноманітних динамічних характеристик катера. До його складу входять:

– GPS-приймач, який забезпечує визначення місця розташування катера, його швидкості та курсу;

– блок сенсорів руху, який включає:

а) 3-осьовий гіроскоп для вимірювання кутових швидкостей;

б) 3-осьовий акселерометр для оцінки лінійних прискорень;

в) 3-осьовий компас на базі сенсорів Холла, який забезпечує орієнтацію по курсу.

Всі сенсори, що використовуються в даному модулі, розташовані на одній мікросхемі, що має значні переваги у порівнянні з традиційними підходами, де кожен сенсор функціонує окремо. Така інтеграція усуває необхідність у корекції показників, які можуть виникнути через можливі помилки, що пов'язані з неспіввісним встановленням окремих сенсорів, а також з їхнім механічним або електричним взаємодіям. Коли сенсори розташовуються окремо, виникає ймовірність того, що незначні помилки у їхньому розташуванні можуть вплинути на точність отримуваних даних. Завдяки інтеграції всіх сенсорів в єдину мікросхему, забезпечується максимальна точність вимірювань, оскільки всі компоненти працюють як єдине ціле, що дозволяє значно знизити ймовірність помилок, які виникають через механічні похибки або несумісність між окремими елементами.

Система опитування сенсорів забезпечує постійний та безперервний збір даних про динамічні характеристики руху катера, що дозволяє в реальному часі здійснювати моніторинг його поведінки. Зібрані дані обробляються у режимі реального часу, після чого формуються пакети даних у форматі UDP (User Datagram Protocol), які готуються до подальшої передачі до САК. Таке рішення дозволяє забезпечити високошвидкісну передачу інформації, що необхідно для керування безкіпажними катерами, оскільки така передача здійснюється без затримок і дозволяє негайно реагувати на зміни в стані катера або його навколишньому середовищі. Формат UDP обраний завдяки своїй ефективності та низькій затримці і необхідний для оперативного прийняття рішень у системах керування безкіпажними катерами.

Основні технічні характеристики модуля наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики модуля сенсорів

№	Найменування параметра	Значення
1	Напруга постійного живлення, В	12
2	Частота опитування даних, Гц	100
3	Протокол передачі даних	UDP (авторський)
4	Вимірювальні параметри	GPS 3-осьовий гіроскоп: $\pm 1000$ °/с, 3-осьовий акселерометр: $\pm 8g$ 3-остовий компас на базі сенсорів Холла: $\pm 4800$ мкТл
5	Клас захисту	IP67
6	Габаритні розміри, мм	Ø120x290
7	Маса, кг	2,21

Модуль сенсорів із представленими технічними характеристиками добре себе зарекомендував при проведенні експериментальних досліджень законів групового керування безекіпажним рухомих об'єктом як агентом групи [18]. При цьому, були проведені натурні випробування САК скоординованим спільним рухом двох безекіпажних рухомих об'єктів.

Для обробки даних, що надходять від блоку сенсорів, використовується спеціалізований бортовий обчислювальний модуль або персональний комп'ютер, на якому встановлене програмне забезпечення MATLAB Simulink (рис. 1). Однією з головних переваг використання даного програмного забезпечення є можливість застосовувати високопродуктивні алгоритми інтегрування та диференціювання, що дозволяють точно обчислювати важливі динамічні характеристики катера, такі як швидкість, прискорення, кути нахилу та інші параметри, необхідні для точного контролю за рухом катера.

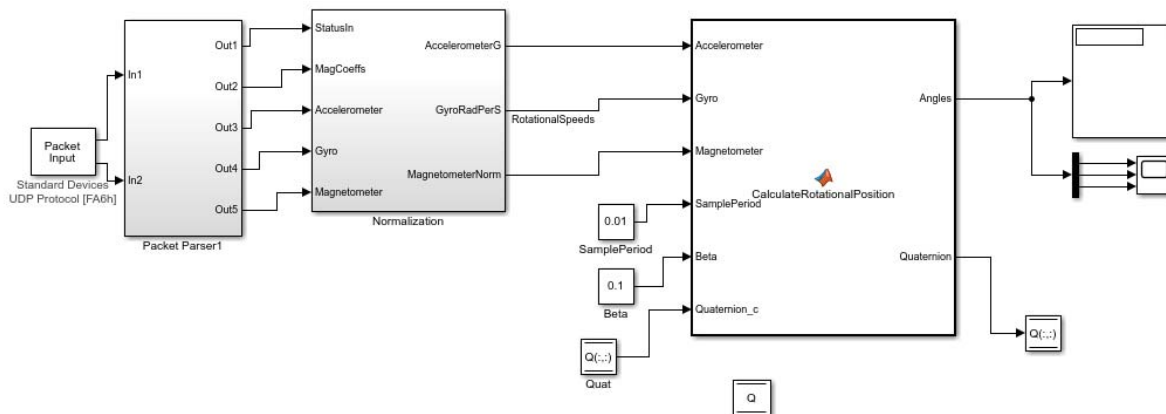


Рисунок 1 – Програма обробки даних

Основні компоненти системи обробки даних, що використовується для збору, аналізу та обробки інформації, отриманої від сенсорів безекіпажного катера, включають кілька основних компонентів, кожен з яких виконує свою функцію в процесі обробки сигналів і трансформації даних у зручний для подальшого аналізу вигляд. Система обробки даних побудована на платформі MATLAB Simulink дозволяє легко налаштовувати та модифікувати кожен етап обробки залежно від потреб конкретного застосування.

Основні компоненти системи обробки даних включають:

- блок Packet Input – стандартний блок середовища Simulink, який відповідає за отримання даних через мережевий протокол UDP. Такий протокол використовується для передачі даних у реальному часі з мінімальними затримками для систем безекіпажних катерів, де кожна мілісекунда може впливати на ефективність керування. Блок Packet Input забезпечує безперервне та стабільне отримання даних від сенсорів гарантуючи безперервний потік інформації для подальшої обробки. Даний блок важливий для того, щоб всі отримані пакети були своєчасно доставлені до наступних компонентів системи для обробки та аналізу.

- підсистему Packet Parser, яка відповідає за перетворення отриманих пакетів байт, що надходять через протокол UDP, у числові значення вимірних параметрів. Важливо, що отримані дані у вигляді пакетів байт не є безпосередньо придатними для подальшого аналізу, тому цей блок займається їх інтерпретацією та перетворенням у відповідні фізичні величини, які відображають стан катера. Наприклад, це можуть бути параметри руху, такі як швидкість, прискорення, кути нахилу, чи інші характеристики, які необхідно оцінити для контролю за рухом катера. Підсистема забезпечує надійну обробку вхідних даних, коректно інтерпретуючи їх у реальний час, що дає змогу динамічно реагувати на зміни в русі катера.

- блок Normalization (рис. 2) відповідає за приведення отриманих даних до фізичних величин. Враховуючи, що сенсори можуть надавати сигнали, які потребують коригування, блок Normalization виконує декілька важливих функцій. Зокрема, він забезпечує калібрування сигналів, що дозволяє враховувати можливі відхилення або похибки в вимірюваних значеннях, зокрема ті, що можуть бути зумовлені неідеальними умовами

експлуатації. У даному блоці StatusIn – визначає швидкість роботи АЦП гіроскопа та надає відповідний множник даних; X, G\_Off, MagCoeffs – матриця корекції даних акселерометра, гіроскопа та магнітометра (визначаються експериментально [19]);

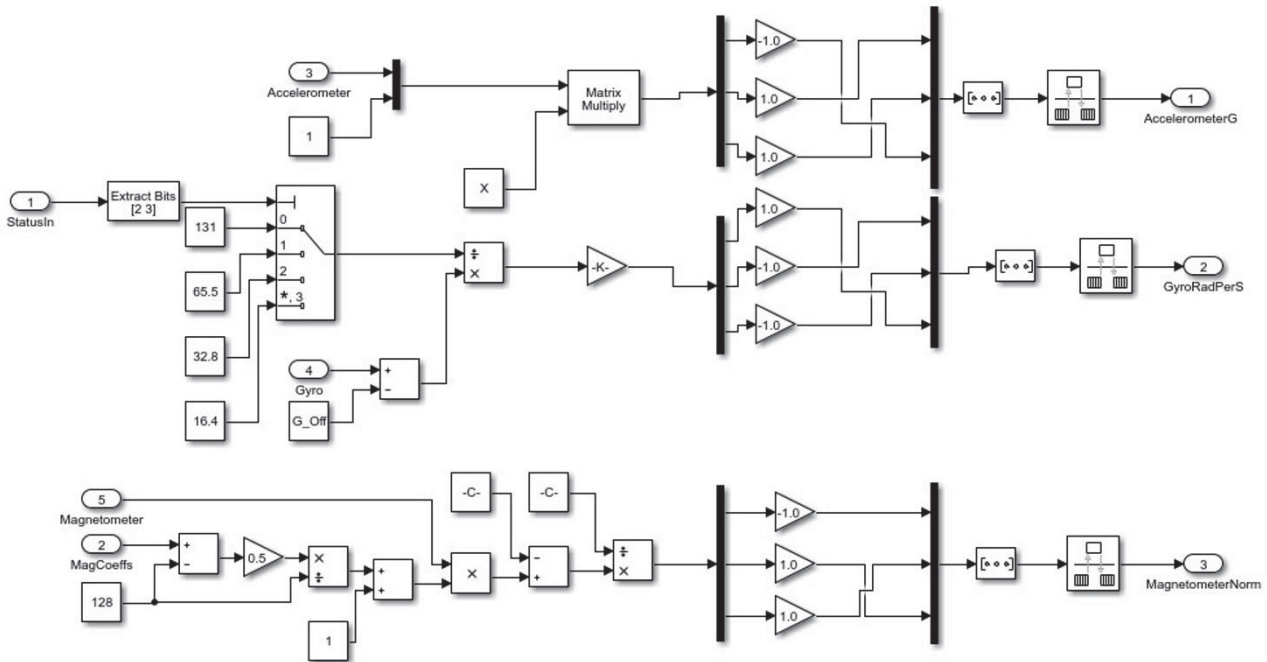


Рисунок 2 – Структура блоку Normalization

Реальні сенсори, які використовуються у складі цієї системи, завжди потребують регулярної корекції та фільтрації сигналів для зменшення впливу шумів і похибок вимірювання [20, 21]. Важливо зазначити, що сенсори можуть мати різний рівень точності, і залежно від типу сенсора, погрішності можуть виникати через зовнішні фактори або внаслідок самого процесу вимірювання. Наприклад, температурні коливання, зміни вологості, механічні вібрації або електричні перешкоди можуть спотворювати показники сенсорів.

Функція CalculateRotationalPosition проводить розрахунок кутів повороту вимірювального пристрою. Розрахунок кутів повороту проводиться у вигляді кватерніонів  $q$ , що забезпечує більш точне визначення вихідних кутів. Код розрахунку представлений нижче:

```
function [Angles, Quaternion] = CalculateRotationalPosition(Accelerometer, Gyro,
Magnetometer, SamplePeriod, Beta, Quaternion_c)
Angles = [0 0 0];
q = Quaternion_c; % short name local variable for readability
% Reference direction of Earth's magnetic feild
h = quaternProd(q, quaternProd([0 Magnetometer], quaternConj(q)));
b = [0 norm([h(2) h(3)]) 0 h(4)];
% Gradient decent algorithm corrective step
F = [2*(q(2)*q(4) - q(1)*q(3)) - Accelerometer(1)
2*(q(1)*q(2) + q(3)*q(4)) - Accelerometer(2)
2*(0.5 - q(2)^2 - q(3)^2) - Accelerometer(3)
2*b(2)*(0.5 - q(3)^2 - q(4)^2) + 2*b(4)*(q(2)*q(4) - q(1)*q(3)) - Magnetometer(1)
2*b(2)*(q(2)*q(3) - q(1)*q(4)) + 2*b(4)*(q(1)*q(2) + q(3)*q(4)) - Magnetometer(2)
2*b(2)*(q(1)*q(3) + q(2)*q(4)) + 2*b(4)*(0.5 - q(2)^2 - q(3)^2) - Magnetometer(3)];
J = [-2*q(3), 2*q(4), -2*q(1), 2*q(2)
2*q(2), 2*q(1), 2*q(4), 2*q(3)
0, -4*q(2), -4*q(3), 0
-2*b(4)*q(3), 2*b(4)*q(4), -4*b(2)*q(3)-2*b(4)*q(1), -4*b(2)*q(4)+2*b(4)*q(2)
```

```

-2*b(2)*q(4)+2*b(4)*q(2), 2*b(2)*q(3)+2*b(4)*q(1), 2*b(2)*q(2)+2*b(4)*q(4),
-2*b(2)*q(1)+2*b(4)*q(3)
2*b(2)*q(3), 2*b(2)*q(4)-4*b(4)*q(2), 2*b(2)*q(1)-4*b(4)*q(3), 2*b(2)*q(2)];
step = (J*F);
step = step / norm(step); % normalise step magnitude
qDot = 0.5 * quaternProd(q, [0 Gyro(1) Gyro(2) Gyro(3)]) - Beta * step';
q = q + qDot * SamplePeriod;
Quaternion = q / norm(q); % normalise quaternion
Angles =quatern2euler(quaternConj(Quaternion)) * (180/pi);
End

```

У такому випадку функція quatern2euler розраховує формулу:

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{arctg} \left( \frac{2(q_3q_4 - q_1q_2)}{2q_1^2 - 1 + 2q_4^2} \right) \\ -\operatorname{arctg} \left( \frac{2(q_2q_4 + q_1q_3)}{\sqrt{1 - (2q_2q_4 + 2q_1q_3)^2}} \right) \\ \operatorname{arctg} \left( \frac{2(q_2q_3 - q_1q_4)}{2q_1^2 - 1 + 2q_2^2} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

де  $\varphi, \theta, \psi$  – кут ристання, диферент та крен відповідно;  
 $q_{1,2,3,4}$  – кватерніони, якими задано положення пристрою.

Однак при використанні магнітометра для визначення орієнтації катера потрібно враховувати певні фактори, які можуть впливати на точність вимірювань. Зокрема, магнітометр чутливий до зовнішніх впливів, таких як наявність магнітотвердих матеріалів у близькому оточенні сенсора. Такі матеріали можуть створювати локальні магнітні поля, що призводять до викривлення вимірювань та зниження точності визначення курсу.

Зібрані та збережені дані можуть бути інтегровані в САК для підвищення ефективності автономних операцій безекіпажного катера. Отож, можливо забезпечити достатній рівень автоматизації і точності в керуванні безекіпажним катером. Інтеграція таких даних у САК забезпечує можливість реалізації складних алгоритмів навігації та маневрування і підвищує ефективність та надійність роботи безекіпажних катерів.

**Основні результати та їх обговорення.** Розроблена система вимірювання динамічних характеристик базується на використанні трьохосових сенсорів, які включають акселерометр, магнітометр, гіроскоп і GPS-приймач. Всі компоненти об'єднані в єдиний конструктивний модуль, що забезпечує компактність і зручність монтажу. Система здатна точно вимірювати ключові динамічні параметри руху безекіпажного катера, включаючи лінійні прискорення, кутові швидкості, просторове положення та курс. Таким чином, існує можливість використовувати отримані дані для підвищення точності САК безекіпажним надводним катером, а також для підлаштування його роботи до умов середовища. Також, запропонована система буде корисною для проектування та оптимального вибору начіпного обладнання, необхідного для виконання спеціалізованих завдань безекіпажними надводними катерами.

#### Висновки.

1. Розроблена система вимірювання динамічних характеристик безекіпажного катера підготовлена до проведення натурних випробувань. Випробування мають бути проведені на базі БНК із використанням сучасних алгоритмів обробки даних для оцінки ефективності САК.

2. Запропонована система характеризується особливостями схемотехнічної реалізації, формою інформаційного представлення засобами програмного середовища MATLAB Simulink та невеликою собівартістю виробництва чинного зразка. Розробка сприяє

підвищенню точності автоматичного керування та відкриває можливості для широкого використання в безпечних надводних системах.

**Перспективи подальших досліджень.** Автори вважають за доцільне спрямувати подальші дослідження на вирішення ключових проєктних задач, пов'язаних із розробкою удосконаленої САК БНК, облаштованої системою вимірювання динамічних характеристик для забезпечення ефективної взаємодії із зовнішніми системами зв'язку та керування. Особлива увага буде приділена оптимізації роботи САК, вдосконаленню алгоритмів обробки даних від сенсорів та розширенню функціональності системи, зокрема для виконання спеціалізованих завдань у складних умовах експлуатації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yujuan W., Chao S., Jiahui H., Hua C. Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. *Systems science & control engineering: an open access journal*, 2024. 12 (1). 1–9.
2. Zhao Y., Fenglei H., Duanfeng H., Xiao P., Wangyuan Z. Decision-making for the autonomous navigation of USVs based on deep reinforcement learning under IALA maritime buoyage system. *Ocean Engineering*, 2022. 266 (5), 112557.
3. Zheng Y. B., Fan W. X., Han M. Y. Research on multi-agent collaborative hunting algorithm based on game theory and Q-learning for a single escaper. *Journal of intelligent fuzzy system*, 2021. 40 (03), 1–15.
4. Gongxing, Wu, Taotao Xu, Yushan Sun, Jiawei Zhang. Review of multiple unmanned surface vessels collaborative search and hunting based on swarm intelligence. *International journal of advanced robotic systems*, 2022. 19 (2), 1–20.
5. Sun X., Wang G., Fan Y. A formation collision avoidance system for unmanned surface vehicles with leader-follower structure. *IEEE Access*, 2019. 7, 24691–24702.
6. Tan G., Zhuang J., Zou J. Coordination control for multiple unmanned surface vehicles using hybrid behavior-based method. *Ocean Engineering*, 2021. 232, 109147.
7. Wei G.A., Zhang J.Q. Research on formation navigation of USV based on improved A\* and DWA fusion algorithm. *Journal of computational methods in sciences and engineering*, 2024. 24 (4-5), 3191–3209.
8. Zhou C., Gu S., Wen Y. The review unmanned surface vehicle path planning: Based on multi-modality constraint. *Ocean Engineering*, 2020. 200, 107043.
9. Tao Y., Du J., Lewis F.L. Integrated intelligent guidance and motion control of USVs with anticipatory collision avoidance decision-making. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2024. 25 (11), 17810–17820.
10. Rybczak M., Lazarowska A. The development of algorithms for safe control of an autonomous ship. *International journal of electronics and telecommunications*, 2024. 70 (4), 997–1003.
11. Zhu F., Shen Y., Wang Y., Jia J., Zhang X. Fusing GNSS/INS/Vision with a priori feature map for high-precision and continuous navigation. *IEEE Sensors journal*, 2021. 21 (20), 23370–23381.
12. Guo M. Z., Guo C., Zhang C. SINS/GNSS-integrated navigation of surface vessels based on various nonlinear Kalman filters and large ship dynamics. *Journal of electrical engineering & technology*, 2021. 16 (1), 531–546.
13. Guo M., Zhou X., Guo C., Liu Y., Zhang C., Bai W. Adaptive federated filter-combined navigation algorithm based on observability sharing factor for maritime autonomous surface ships. *Journal of marine engineering & technology*, 2024. 23 (2), 98–112.
14. Wang Q., Zhang M. Inertial navigation system gyroscopic on-line calibration assisted by marine star sensor based on forgetting factor selection of a Sage-Husa filter. *Journal of marine engineering & technology*, 2022. 21 (1), 1–8.
15. Zitouni F., Maamri R., Harous S. FA-QABC-MRTA: a solution for solving the multi-robot task allocation problem. *Intellig service robot*, 2019. 12 (4), 407–418.

16. Tang H., Yin Y., Shen H. A model for vessel trajectory prediction based on long short-term memory neural network. *Journal of marine engineering & technology*, 2022. 21 (3), 136–145.
17. Liu J., Achurra A., Zhang C., Bury A., Wang X. A long short term memory network-based, global navigation satellite system/inertial navigation system for unmanned surface vessels. *Journal of marine engineering & technology*, 2024. 23 (1), 1–13.
18. Burunina Zh. Yu., Voitasyk A. M., Aloba L. T., Korytskyi V. I., Sirivchuk A. S., Klochkov O. P. Experimental study of group control laws for an autonomous unmanned underwater vehicle as a group agent. *Shipbuilding and marine infrastructure*, 2018. №2(10), 116–126.
19. AN5192: application note LSM6DSO: Always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. URL: <https://www.pololu.com/file/0J1900/dm00517282-lsm6dso-always-on-3d-accelerometer-and-3d-gyroscope-stmicroelectronics.pdf> (дата звернення: 15.01.2025).
20. Aghamirbaha E., Toloei A., Alizadeh Roknabadi M. H. Analysis of marine navigation methods and systems. *20<sup>th</sup> International conference of Iranian Aerospace*, 2022. 1–6.
21. Liu W., Chen S., Hu Y., Lou N., Wang S. Enhancing USVs navigation based on minimum error entropy of GPS vector tracking. *Measurement science and technology measurement science and technology*, 2024. 35 (7), 076307.

## REFERENCES

1. Yujian, W., Chao, S., Jiahui, H., Hua, C. (2024). Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. *Systems science & control engineering: an open access journal*. 12 (1). 1–9.
2. Zhao, Y., Fenglei, H., Duanfeng, H., Xiao, P., Wangyuan, Z. (2022). Decision-making for the autonomous navigation of USVs based on deep reinforcement learning under IALA maritime buoyage system. *Ocean Engineering*. 266 (5), 112557.
3. Zheng, Y. B., Fan, W. X., Han, M. Y. (2021). Research on multi-agent collaborative hunting algorithm based on game theory and Q-learning for a single escaper. *Journal of intelligent fuzzy system*. 40 (03), 1–15.
4. Gongxing, Wu, Taotao, Xu, Yushan, Sun, Jiawei, Zhang (2022). Review of multiple unmanned surface vessels collaborative search and hunting based on swarm intelligence. *International journal of advanced robotic systems*. 19 (2), 1–20.
5. Sun, X., Wang, G., Fan, Y. (2019). A formation collision avoidance system for unmanned surface vehicles with leader-follower structure. *IEEE Access*. 7, 24691–24702.
6. Tan, G., Zhuang, J., Zou, J. (2021). Coordination control for multiple unmanned surface vehicles using hybrid behavior-based method. *Ocean Engineering*. 232, 109147.
7. Wei, G. A., Zhang, J. Q. (2024). Research on formation navigation of USV based on improved A\* and DWA fusion algorithm. *Journal of computational methods in sciences and engineering*. 24 (4–5), 3191–3209.
8. Zhou, C., Gu, S., Wen, Y. (2020). The review unmanned surface vehicle path planning: Based on multi-modality constraint. *Ocean Engineering*. 200, 107043.
9. Tao, Y., Du, J., Lewis, F. L. (2024). Integrated intelligent guidance and motion control of USVs with anticipatory collision avoidance decision-making. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. 25 (11), 17810–17820.
10. Rybczak, M., Lazarowska, A. (2024). The development of algorithms for safe control of an autonomous ship. *International journal of electronics and telecommunications*. 70 (4), 997–1003.
11. Zhu, F., Shen, Y., Wang, Y., Jia, J., Zhang, X. (2021). Fusing GNSS/INS/Vision with a priori feature map for high-precision and continuous navigation. *IEEE Sensors journal*. 21 (20), 23370–23381.
12. Guo, M. Z., Guo, C., Zhang, C. (2021). SINS/GNSS-integrated navigation of surface vessels based on various nonlinear Kalman filters and large ship dynamics. *Journal of electrical engineering & technology*. 16 (1), 531–546.



13. Guo, M., Zhou, X., Guo, C., Liu, Y., Zhang, C., Bai, W. (2024). Adaptive federated filter-combined navigation algorithm based on observability sharing factor for maritime autonomous surface ships. *Journal of marine engineering & technology*. 23 (2), 98–112.
14. Wang, Q., Zhang, M. (2022). Inertial navigation system gyroscopic on-line calibration assisted by marine star sensor based on forgetting factor selection of a Sage-Husa filter. *Journal of marine engineering & technology*. 21 (1), 1–8.
15. Zitouni, F., Maamri, R., Harous, S. (2019). FA-QABC-MRTA: a solution for solving the multi-robot task allocation problem. *Intelligent service robot*. 12 (4), 407–418.
16. Tang, H., Yin, Y., Shen, H. (2022). A model for vessel trajectory prediction based on long short-term memory neural network. *Journal of marine engineering & technology*. 21 (3), 136–145.
17. Liu, J., Achurra, A., Zhang, C., Bury, A., Wang, X. (2024). A long short term memory network-based, global navigation satellite system/inertial navigation system for unmanned surface vessels. *Journal of marine engineering & technology*. 23 (1), 1–13.
18. Burunina, Zh. Yu., Voitasyk, A. M., Aloba, L. T., Korytskyi, V. I., Sirivchuk, A. S., Klochkov, O. P. (2018). Experimental study of group control laws for an autonomous unmanned underwater vehicle as a group agent. *Shipbuilding and marine infrastructure*. №2(10), 116–126.
19. AN5192: application note LSM6DSO: Always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. URL: <https://www.pololu.com/file/0J1900/dm00517282-lsm6dso-alwayson-3d-accelerometer-and-3d-gyroscope-stmicroelectronics.pdf> (дата звернення: 15.01.2025).
20. Aghamirbaha, E., Toloei, A., Alizadeh Roknabadi, M. H. (2022). Analysis of marine navigation methods and systems. *20<sup>th</sup> International conference of Iranian Aerospace*. 1–6.
21. Liu, W., Chen, S., Hu, Y., Lou, N., Wang, S. (2024). Enhancing USVs navigation based on minimum error entropy of GPS vector tracking. *Measurement science and technology measurement science and technology*. 35 (7), 076307.

**Voitasyk A. M., Sirivchuk A. S., Kostenko D. V. SYSTEM FOR MEASURING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN UNMANNED VESSEL AS A COMPONENT OF ITS AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

*The development of modern automatic control systems for unmanned vessels is an important direction for ensuring the efficiency and autonomy of their operation. These systems aim to reduce human intervention while enhancing operational capabilities. One of the important elements of such systems is a dynamic characteristics measurement system, which can provide accurate monitoring and analysis of the vessel's movement. This system enables real-time feedback on the vessel's performance and trajectory. The article discusses the task of increasing the efficiency of unmanned vessel control by creating a measurement system for dynamic characteristics. The proposed system uses a GPS receiver to enhance positional accuracy and multi-axis motion sensors, including accelerometers, magnetometers, and gyroscopes, to collect precise data on the vessel's movement. Specialized algorithms process the sensor data to determine dynamic parameters such as speed, acceleration, and orientation. These parameters are essential for maintaining control over the vessel's movement and improving overall efficiency. The system's ability to operate in sea conditions is emphasized, as it can provide a high data update frequency for real-time trajectory correction. This ensures the vessel remains on course even in challenging environments. The implementation of the system into the MATLAB Simulink environment allows for real-time visualization and data analysis. The system's data filtering and correction processes are detailed, showing how parameters are fine-tuned for optimal performance. Particular attention is paid to algorithms for calculating angular positions, accelerations, and speeds, which are crucial for the precise control of the vessel in autonomous mode. These algorithms enable the vessel to adapt to dynamic environmental changes and ensure stability during operation. The results of the study form the basis for further improvement of automatic control systems for unmanned vessels, which opens up the possibility of their widespread use in various tasks, in particular for monitoring, patrolling and maintenance of marine facilities.*

**Key words:** unmanned surface vessel; automatic control system; dynamic characteristics; sensor.

© Войтасик А. М., Костенко Д. В., Сірівчук А. С.

Статтю прийнято до редакції 06.12.2024